

Пассивная томография мелкого моря по данным о фазе функции взаимной корреляции шумов

И. Р. Сабиров^{1,*}, А. С. Шуруп^{1,2,3}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт океанологии имени П.П. Шириова РАН, Россия, 117997, Москва

³Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123242, Москва

(Статья поступила 01.07.2019; Подписана в печать 30.09.2019)

В работе анализируются возможности и ограничения использования информации о фазе функции взаимной корреляции шумовых сигналов, зарегистрированных в пространственно разнесенных точках акватории, для целей пассивной томографии мелкого моря. В рамках численного моделирования демонстрируется наличие характерных особенностей фазы функции Грина вблизи критических частот гидроакустических мод. Выявлено, что на этих частотах производная фазы испытывает разрыв, что может использоваться в качестве критерия оценки критических частот мод волновода. Предложена и численно реализована схема восстановления характеристик волновода по данным в виде фазы функции взаимной корреляции шумового поля и критических частот гидроакустических мод. Показано, что учёт значений критических частот, как дополнительной информации при решении обратной задачи, улучшает точность реконструкции параметров волновода и помехоустойчивость предлагаемого алгоритма.

PACS: 43.30.+m 43.60.+d 43.60.Pt

УДК: 551.463.21

Ключевые слова: пассивная томография мелкого моря, критические частоты мод, функция взаимной корреляции шумов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, в связи с полномасштабным освоением ресурсов Мирового океана, актуальным является вопрос о возможности мониторинга характеристик обширных водных акваторий в режиме близком к реальному времени. Акустические волны низкой частоты способны распространяться в морской воде на большие расстояния без существенных потерь и поэтому активно используются при решении упомянутой выше задачи. Не смотря на долгую историю применения методов акустической томографии [1, 2] в гидрологических исследованиях, разработка и апробация новых эффективных подходов по-прежнему является актуальной задачей.

Традиционные методы гидроакустического мониторинга [1, 2], как правило, основаны на использовании низкочастотных излучателей и многоэлементных приемных систем, что приводит к высокой стоимости проведения эксперимента и требует решения заметного количества технических проблем, связанных, например, с позиционированием и энергообеспечением приёмноизлучающих элементов. В связи с этим, перспективным подходом представляется пассивная акустическая томография [3], не требующая использования специальных низкочастотных источников акустического поля, а также, в отдельных случаях, и применения многоэлементных протяженных антенн [4, 5].

Основой пассивной томографии является возможность оценки функции Грина двух разнесенных в пространстве точек на основе взаимной функции корреляции шумовых сигналов, зарегистрированных в этих точках [3]. Основным фактором, определяющим возможность применения пассивной томографии, является время накопления шумового сигнала. Оценки разных авторов дают величины приемлемой длительности накопления порядка суток [6] или даже месяца [7], что превышает время динамических изменений океана, могущих представлять интерес. Однако, при задействовании модового подхода время накопления может уменьшиться до порядка часа [8]. По этой причине для использования шумовой томографической схемы нужно решить задачу выделения полей отдельных мод. В случае, когда влияние волновода на межмодовую дисперсию существенно, разделение мод может быть реализовано как при анализе функции взаимной корреляции шумов, так и при анализе её спектрограммы. В ситуации, когда межмодовая дисперсия выражена слабо, применение известных методов не представляется возможным. Для использования преимуществ модового описания в томографической задаче в данном случае необходимо использовать другой подход, развитию которого и было посвящено исследование, описанное в данной работе.

1. ИНФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ШУМОВ

Сравнительно недавно был предложен метод [9], позволяющий проводить оценку критических частот гидроакустических мод мелкого моря на основе анали-

*E-mail: sabirov.ir14@physics.msu.ru

за функции взаимной корреляции шумового поля, регистрируемого разнесенными в пространстве волновода одиночными приемными системами. Ключевая идея описанного подхода заключается в возможности идентификации характерных особенностей фазы корреляционной функции, которые, при соблюдении определенных условий, локализуются вблизи критических частот, соответствующих гидроакустических мод. Здесь и далее под фазой подразумевается угловая компонента комплексного спектра, соответствующей функции (либо функции взаимной корреляции сигналов, зарегистрированных в разнесенных точках волновода, либо функции Грина для точек волновода, разнесенных на то же расстояние), которую можно вычислить как обратный тангенс отношения мнимой части спектра к вещественной. Получаемые при этом для различных частот значения фазы, образуют функциональную зависимость $\phi_{\text{эксп.}}(f)$. Причем модуль разницы между максимальным и минимальным значениями фазы составляет 2π .

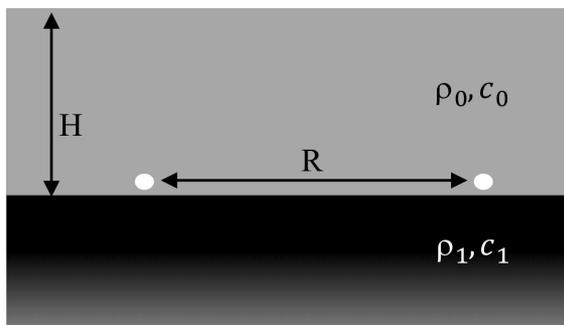


Рис. 1: Схематичное изображение постановки задачи и параметров численного моделирования при исследовании особенностей фазы функции Грина для разнесенных точек в волноводе Пекериса

Детальное численное исследование функции Грина, построенной для волновода Пекериса в соответствии с теорией из [10], в случае разнесения точек излучения и приема на расстояние R (рис. 1), показало, что основную информацию о критических частотах гидроакустических мод ($f_{\text{крит.}}$) несёт первая производная фазы функции Грина $\phi'(f)$: $\phi'(f) = \frac{\partial}{\partial f} \phi(f)$, которая испытывает разрыв на частотах отсечки. Визуально этот эффект характеризуется наличием излома функции $\phi(f)$ при $f = f_{\text{крит.}}$ (рис. 2а). Данное обстоятельство указывает на возможность оценки критических частот реальных волноводов не по характерным скачкам $\phi_{\text{эксп.}}(f)$, как предполагалось ранее в [9], а по частотам локализации разрывов $\phi'(f)$ (рис. 2б). Стоит отметить, что параметры волновода выбирались близкими к условию эксперимента [5] и принимались равными для скорости звука c_0 , плотности ρ_0 и толщины H водного слоя, а также для скорости звука

c_1 и плотности ρ_1 полупространства 1450 м/с , 1 г/см^3 , 210 м , 2770 м/сб 1.8 г/см^3 , соответственно.

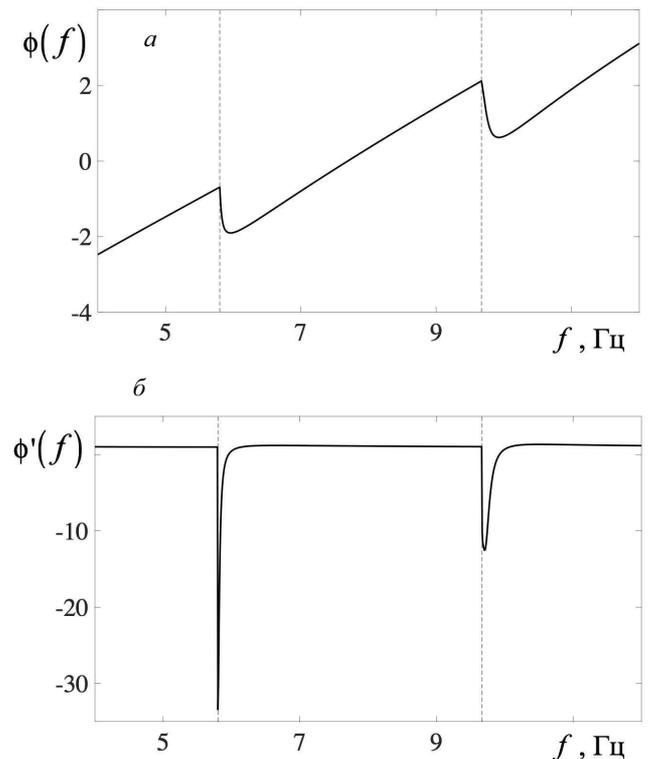


Рис. 2: Зависимость от частоты фазы функции Грина волновода Пекериса (а), а также ее первой производной (б). Расстояние R принималось равным 200 м . Пунктирные вертикальные линии обозначают критические частоты второй и третьей (левая и правая соответственно) гидроакустических мод рассматриваемого волновода

Именно интерференция мод соседних номеров приводит к формированию особенностей $\phi(f)$, которые формируются на частотах, отличных от $f_{\text{крит.}}$. В случае, когда определяющийся как произведение горизонтального волнового числа $k_{\text{гор.}}(f)$ и пройденного волной расстояния R суммарный набег фазы волны на рассматриваемой частоте мал ($k_{\text{гор.}}(f) \cdot R \ll 1$), то характерные скачки фазы локализуются в непосредственной близости к $f_{\text{крит.}}$ (рис. 3,а). Однако, при больших значениях $k_{\text{гор.}}(f) \cdot R$, данные скачки могут быть обнаружены на частотах далёких от критических (рис. 3,б), что делает определение критических частот по «скачкам фазы» неоднозначной задачей. При рассмотрении производной фазы по частоте подобных сложностей не возникает, т.к. на критических частотах производная имеет идентифицируемые разрывы, а во всей остальной полосе остаётся гладкой (рис. 3,в,г).

Наиболее удобна, в случае работы с экспериментальными данными (или зашумленными модельными данными), является ситуация, когда правая производная фазы на критической частоте $\phi'_{\text{пр}}(f_{\text{крит.}})$ принимает

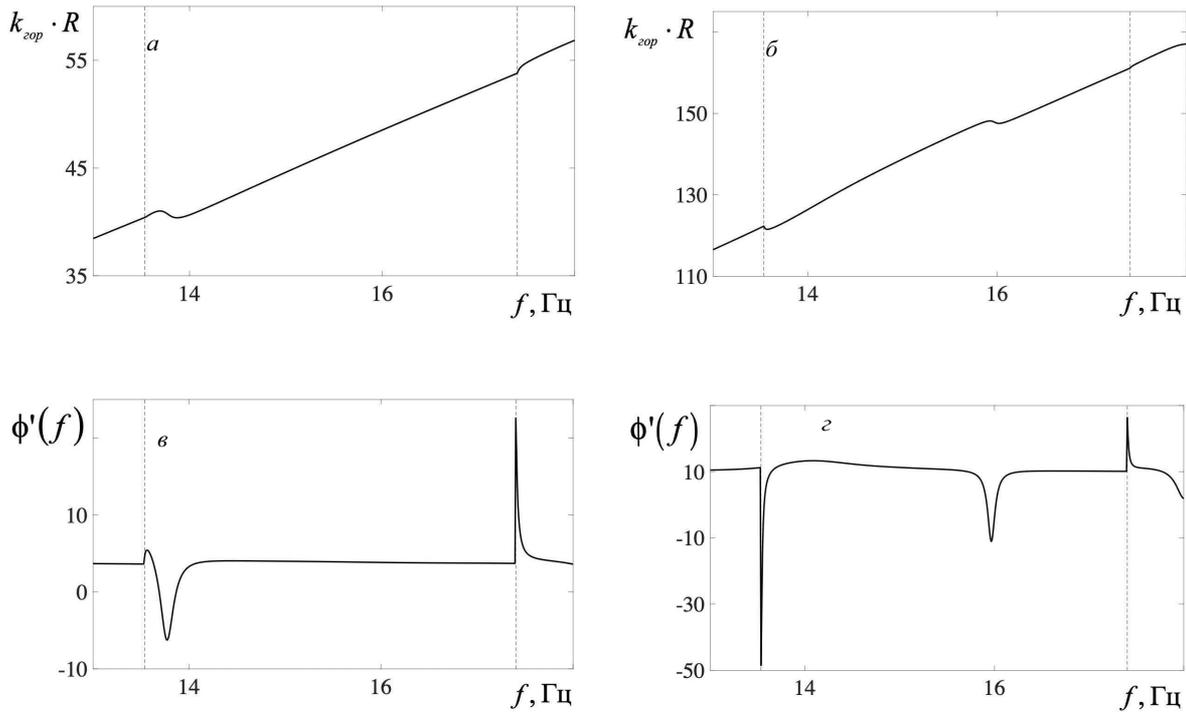


Рис. 3: Зависимость произведения расстояния между точками наблюдения и горизонтального волнового числа полного акустического поля в волноводе Пекериса ($k_{гор.}(f) \cdot R$) — (а, б), а также зависимость от частоты первой производной фазы функции Грина — (в, з), в случае сравнительно небольшого расстояния между точками излучения и приема ($R = 677$ м) — (а, в) и в случае больших расстояний ($R = 1930$ м) — (б, з). Пунктирные вертикальные линии обозначают критические частоты четвертой и пятой (левая и правая линии, соответственно) гидроакустических мод

отрицательный знак, т.к., в связи с тем, что значение левой производной фазы на критической частоте $\phi'_л(f_{крит.})$ имеет всегда положительное значение (растущее вместе с увеличением параметра R), характерный излом $\phi(f)$ и величина разрыва производной фазы на критической частоте $\Delta\phi'$ ($\Delta\phi' = \phi'_{пр}(f_{крит.}) - \phi'_л(f_{крит.})$) будут существенными для большого диапазона значений R .

Были обнаружены также условия, при которых оценка отдельных критических частот не представлялась возможной ни по разрывам $\phi'(f)$, ни по характерным скачкам $\phi(f)$. Фаза при этом являлась монотонной функцией вблизи рассматриваемой $f_{крит.}$.

Дополнительное численное моделирование выявило чувствительность значений критических частот к независимым вариациям параметров моделируемого волновода. Данное обстоятельство обуславливает потенциальную возможность использования информации о $f_{крит.}$ (оценку которых можно произвести по фазе экспериментальной корреляционной функции $\phi_{эсп.}(f)$) при решении задач как пассивной, так и активной акустической томографии.

2. РЕКОНСТРУКЦИЯ МОДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА ПО ДАННЫМ О ФАЗЕ

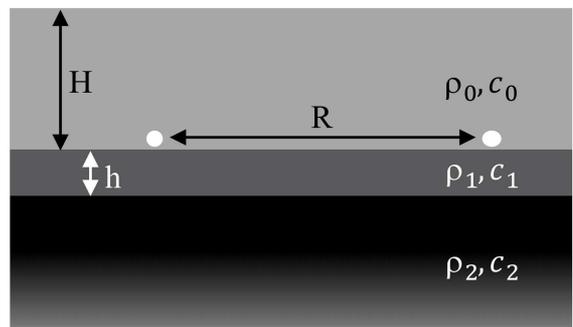


Рис. 4: Схематичное изображение постановки задачи и параметров численного моделирования при исследовании особенностей фазы функции Грина для разнесенных точек в волноводе с промежуточным слоем

В качестве модели рассматривался волновод Пекериса (рис. 4), представленный в виде однородных

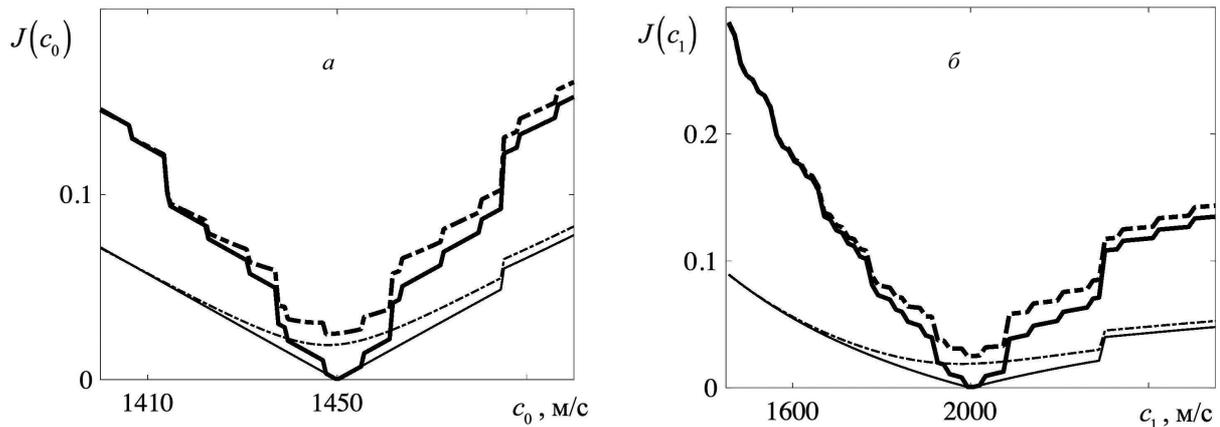


Рис. 5: Значения невязок при варьировании скорости звука в водном слое (а), при варьировании скорости звука в промежуточном слое (б). Сплошные линии — построение при отсутствии шумов в данных рассеяния, штрих-пунктирные линии — внесение трёхпроцентного уровня шума. Тонкие линии — построение без учета информации о критических частотах волноводных мод ($\beta = 0$), жирные линии — построение с учетом информации о критических частота ($\beta = 1$)

и изоскоростных водного и промежуточного слоёв, а также полупространства. Скорости звука, плотности и толщины слоёв воды и осадков, а также дна далее обозначаются как $c_0, c_1, c_2, \rho_0, \rho_1, \rho_2, h, H, \infty$, соответственно. Было принято, что вода граничит с воздухом и при этом все границы раздела плоскопараллельны. Точки волновода, для которых численно строилась функция Грина, лежат на поверхности промежуточного слоя и разнесены на расстояние R .

В рассматриваемой постановке в качестве извлекаемых из моделируемой функции Грина информативных характеристик были выбраны её фаза $\phi(f)$, а также критические частоты двух низших гидроакустических мод $f_{\text{крит.},j}, j = 1, 2$, которые к тому же определяют границы полосы частот в которой вычислялась фаза, используемая для решения обратной задачи.

Решение задачи восстановления совокупности параметров волновода $\alpha = \{c_0, c_1, c_2, \rho_0, \rho_1, \rho_2, h, H, R\}$ рассматривалось в вариационной постановке, направленной на поиск глобального минимума функционала невязки $J(\alpha)$. Значения $J(\alpha)$ определялись как норма разницы между модельными данными рассеяния (фаза функции Грина и критические частоты), рассчитанными для заданного текущего набора параметров волновода ($\alpha_{\text{тек.}}$), и «экспериментальными» данными рассеяния, рассчитанными для волновода с параметрами, которые полагались истинными ($\alpha_{\text{ист.}}$):

$$J(\alpha_{\text{тек.}}) = \|\phi(\alpha_{\text{ист.}}) - \phi(\alpha_{\text{тек.}})\| + \beta \|f_{\text{крит.}}(\alpha_{\text{ист.}}) - f_{\text{крит.}}(\alpha_{\text{тек.}})\|, \quad (1)$$

где коэффициент β определяют вклад соответствующих слагаемых в $J(\alpha_{\text{тек.}})$.

Искомый минимум невязки реализуется при наилучшем сходстве текущих и истинных значений параметров волновода:

$$\alpha_{\text{ист.}} : J(\alpha_{\text{ист.}}) = \min_{\alpha} J(\alpha) = 0 \quad (2)$$

В качестве нормы для разности фаз бралась величина среднеквадратичного отклонения. Для нормы разности критических частот бралась сумма модулей разности частот, нормированных на соответствующие значения истинных критических частот.

Оказалось, что при использовании фазы в её исходном представлении, значения невязки уже при варьировании всего лишь одного параметра формируют зависимость, обладающую большим количеством локальных минимумов, в достаточно узком (с точки зрения возможного практического применения) диапазоне перебираемых значений варьируемого параметра волновода, что приводит к критическому осложнению задачи глобальной минимизации функционала невязки, как при восстановлении одного, так и при восстановлении сразу нескольких параметров. С целью максимально приблизиться к формированию функционала невязки выпуклого типа (с единственным локальным минимумом) в интересующей области значений параметров, была реализована дополнительная обработка исходной фазы, в результате которой были устранены неоднозначности $\pm 2\pi n, n = 1, 2, \dots$, после чего $\phi(f)$ стала представлять собой не периодическую функцию, изменяющуюся в диапазоне от -2π до 2π , а функцию, монотонно растущую с увеличением частоты. Полученная в результате такой обработки фаза, в рассматриваемой полосе частот представляла собой «гладкую» функцию, за исключением участков вблизи критических частот гидроакустических мод. Анализ сформир-

рованной таким образом невязки показал, при использовании фазы и при варьировании любого параметра волновода (в пределах, представляющих практический интерес), функционал невязки имеет единственный локальный минимум. Данный результат получается, как в случае $\beta = 0$, так и в случае β отличных от нуля. При этом стоит отметить, что учет критических частот положительным образом сказывается на помехоустойчивость предлагаемого алгоритма (рис. 5).

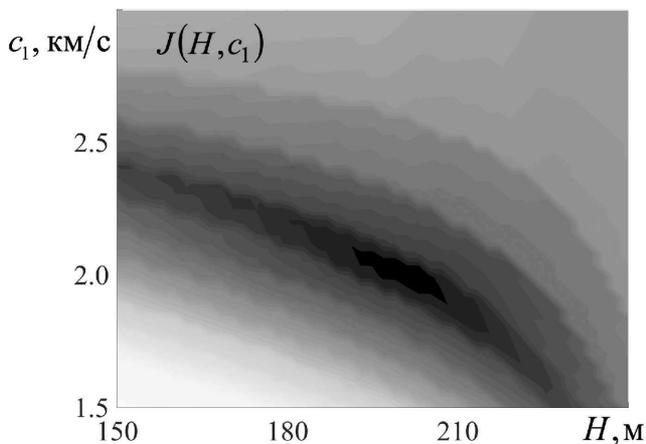


Рис. 6: Значения невязок при варьировании одновременно двух параметров волновода: скорости звука в промежуточном слое c_1 и глубину водного слоя H . Более темный оттенок соответствует меньшему значению невязки $J(H, c_1)$, и наоборот, более светлый — большему значению

Варьирование одновременно двух параметров волновода во всех рассмотренных случаях приводило к картине, характерный вид которой представлен на рис. 6. В этом случае, если вдоль выбранной траектории поиска экстремума наблюдается множество локальных минимумов, то одним из которых будет глобальный. При этом в случае рассмотрения траекторий, пересекающих описываемую выше траекторию под достаточно большим углом (близким к прямому), наблюдается единственный локальный минимум. Данная особенность позволяет в перспективе предложить метод поиска глобального экстремума в обратных задачах рассматриваемого типа, при использовании комбинации нескольких методов, например, при помощи алгоритма имитации отжига, который зарекомендовал себя при решении многомерных задач геоакустической инверсии [11], а также алгоритмов полного перебора. Особый интерес представляет возможность решения обратной задачи в случае зашумления данных рассея-

ния, что всегда происходит в условиях натурального эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Донная пассивная акустическая томография шельфовых морей обладает рядом преимуществ по сравнению с другими схемами гидроакустического мониторинга. Обсуждаемые в настоящей работе идеи, связанные с извлечением информативных характеристик из фазы функции Грина, могут представлять интерес при решении задач реконструкции параметров волновода на основе экспериментальных данных, так как они легко переносятся на случай работы с функциями взаимной корреляции шумов исследуемого волновода.

Отмечавшаяся в недавних исследованиях [9] возможность проведения оценки критических частот гидроакустических мод по информации о фазе корреляционной функции реализовывалась в соответствии с предположением о том, что зависимость фазы от частоты испытывала, характерные скачки вблизи частот отсечек. Однако результаты проведенного в настоящей работе исследования указывают на то, что данная идея применима лишь в случае сравнительно небольшого расстояния между приёмными системами. В общем же случае, наиболее информативным источником информации о критических частотах является первая производная фазы по частоте, испытывающая разрывы на критических частотах. Важно, что отмеченные особенности использования фазовой информации в задачах пассивной томографии мелкого моря, применимы и в случае активного мониторинга.

Использование при решении обратной задачи дополнительной информации о значениях критических частот мод позволяет повысить точность и улучшить помехоустойчивость результатов восстановления. Предложенный в работе алгоритм решения задачи пассивной томографии мелкого моря, основанный на использовании информации о фазе функции взаимной корреляции шумов, требует дальнейшего исследования в условиях, когда уровень помехи становится близким к реальной ситуации. Возможность однозначного восстановления одновременно всей совокупности параметров волновода в рамках развиваемого подхода требует дополнительного рассмотрения, что относится к перспективам дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-05-00737, 18-05-70034, а также гранта Президента РФ для научных школ № НШ 5545.2018.5.

- [1] Munk W., Worcester P., Wunsch C. Ocean Acoustic Tomography. Cambridge University Press, 1995.
 [2] Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Курменов В.М., Неча-

- ев А.Г., Хилько А.И. Акустическая томография океана. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997.
 [3] Godin O. A. // Phys. Rev. Lett. 2006. **97**, 054301.

- [4] *Сергеев С.Н., Шуруп А.С., Годин О.А., Веденев А.И., Гончаров В.В., Муханов П.Ю., Зоботин Н.А., Brown M.G.* // Акуст. ж. 2017. **63**, № 1. С. 73.
- [5] *Буров В.А., Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Муханов П.Ю.* и др. // Акуст. ж. 2014. **60**, № 6. С. 611.
- [6] *Zabotin N.A., Godin O.A.* // Acta Acust. U. Acust. 2011. **97**. P. 44.
- [7] *Курьянов Б.Ф.* К возможности пассивной акустической томографии в диффузном шумовом поле // Доклады XI школы-семинара акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещённой с XVII сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2006. С. 179-185.
- [8] *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* // Акуст. ж. 2008. **51**, С. 51.
- [9] *Муханов П.Ю., Сабиров И.Р., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* Акустика океана. Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских, совмещённой с XXXI сессией Российского Акустического Общества. М.: ГЕОС, 2008, С. 247.
- [10] *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
- [11] *Bonnel J., Gervaise C., Nicolas B., Mars J.I.* // Acoustical Society of America. 2012. **131**. P. 119.

Passive tomography of shallow water based on the phase of the cross-correlation function of noise

I. R. Sabirov^{1,a}, A. S. Shurup^{1,2,3}

¹*Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, 117997, Russia*

³*The Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, 123242, Russia*

E-mail: ^asabirov.ir14@physics.msu.ru

The possibilities and limitations of using information about the phase of the cross-correlation function of noise signals recorded in spatially separated points of the water area for the purposes of passive tomography of the shallow sea are discussed. In the framework of numerical simulation, the presence of characteristic features of the phase of the Green function near the critical frequencies of hydroacoustic modes is demonstrated. It is revealed that at these frequencies the derivative of the phase has a discontinuity, which can be used as a criterion for estimating the critical frequencies of the waveguide modes. A scheme for reconstructing waveguide characteristics from data in the form of a phase of the mutual correlation function of the noise field and critical frequencies of sonar modes is proposed and implemented numerically. It is shown that taking into account the values of critical frequencies as additional information in the inverse problem solving improves the accuracy of the reconstruction of the waveguide parameters and the noise immunity of the proposed algorithm.

PACS: 43.30.+m 43.60.+d 43.60.Pt

Keywords: passive tomography of shallow sea, critical frequency of modes, cross-correlation function of noise.

Received 01 July 2019.

Сведения об авторах

1. Сабиров Ильдар Равильевич — студент; e-mail: sabirov.ir14@physics.msu.ru.

2. Шуруп Андрей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (499) 939-30-81, e-mail: shurup@physics.msu.ru.
