К.В. Дмитриев¹, С.Н. Сергеев^{1,2}, А.С. Шуруп^{1,2,3}

ПАССИВНАЯ ТОМОГРАФИЯ ОКЕАНА МЕТОДОМ ШУМОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, 1/2,

Тел. 8(495)939-30-81, E-mail: kdmitrie@lanat.ru

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Россия, 117218, Москва, Нахимовский пр. 36

Тел. 8(495)380-41-50, E-mail: sergeev@lanat.ru

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
Россия, 123242, Москва, Б. Грузинская ул., 10/1,

Тел.: 8(499)254-90-80; E-mail: shurup@physics.msu.ru

Шумовая интерферометрия – сравнительно новый и многообещающий подход к восстановлению параметров акватории (скорость звука, течения) и, в случае мелкого моря, – некоторых характеристик дна в пассивной гидроакустической схеме. Основным преимуществом подхода, делающим его привлекательным для возможного практического использования, является относительная дешевизна. Во-первых, для него не требуются излучающие системы, а во-вторых, прием может осуществляться одиночными гидрофонами, а не многоэлементными антеннами. Вместе с тем, непосредственное использование метода ставит ряд вопросов, без ответа на которые шумовая интерферометрия не выйдет из постановочной стадии. В работе авторы анализируют современное состояние исследований в данной области и приводят результаты как теоретического характера, так и обработки данных различных экспериментов, в том числе собственных, на шельфе Белого моря.

Ключевые слова: шумовая интерферометрия, скорость звука, гидрофон

Введение. Шумовая интерферометрия – перспективный метод экспериментального исследования акваторий акустическими методами – вызвал интерес различных групп исследователей, прежде всего, возможностью отказа от излучающих систем, изготовление, развертывание и питание которых являются основным сдерживающим фактором полевых исследований. Помимо решения указанных технических проблем, отказ от активных излучателей, то есть использование пассивной

акустической схемы, в свою очередь, является важным преимуществом в ряде решаемых гидроакустикой задач, например, при необходимости снижения воздействия на морскую фауну.

Акустическая томография океана – метод восстановления параметров морской среды и, в перспективе применения к мелководным регионам, – подстилающего пространства. Это единственный метод мониторинга в реальном времени больших (сотни и тысячи километров) морских акваторий. Однако он не вышел за рамки отдельных экспериментов, прежде всего, из-за высокой стоимости развертывания и обеспечения функционирования излучающих и приемных гидроакустических систем, а также по причине появления конкурирующих, относительно дешевых, контактных методов: зондов и глайдеров с размещенными на них датчиками. В последние годы возник интерес к северным регионам, которые по большей части покрыты льдом. Лед делает невозможным выход зондов на поверхность для передачи накопленных данных на базу по каналу связи. Это побуждает искать иные подходы к акустическому мониторингу подводной обстановки. Возможности шумовой интерферометрии, в случае ее применимости, позволяют преодолеть те факторы, которые сдержали развитие классической томографии.

К настоящему времени можно считать доказанной принципиальную работоспособность метода шумовой интерферометрии в том смысле, что, во-первых, создана теоретическая база метода; во-вторых, имеется ряд экспериментов, которые явно продемонстрировали, что получаемые с помощью метода данные позволяют проводить их интерпретацию с приемлемой точностью, и они чувствительны к параметрам среды. Следует отметить, что большинство экспериментов изначально преследовали иные цели, и поэтому экспериментальная база метода остается существенно ограниченной. Тем не менее, можно декларировать, что за время, прошедшее с начала попыток применения метода шумовой интерферометрии в гидроакустических приложениях, его принципиальные возможности доказаны. В настоящее время необходимо поставить вопросы о выводе данного метода на этап практического применения. Полученные ответы позволяют либо использовать его в гидроакустических задачах, либо, как это произошло с «классической» томографией океана, оставить его в истории гидроакустики в качестве научного результата без практических перспектив.

Следует отметить, что метод шумовой интерферометрии не завязан на томографическую схему восстановления параметров среды и может быть использован также в других задачах подводного распространения звука, что делает его самоценным.

Физические основы метода шумовой интерферометрии. Идея метода шумовой интерферометрии [1, 2] сама по себе достаточно проста. Пусть в исследуемом регионе в точках с координатами r_A и r_B расположены два гидрофона, которые обозначим А и В. Акустические сигналы $U(r_A, t)$, $U(r_B, t)$, регистрируемые обоими гидрофонами (неважно, от расположенного где-либо активного источника или, в пассивной схеме, являющиеся естественным шумом моря или шумом удаленного судоходства), позволят при последующей обработке получить данные о влияющих на распространение звука параметрах среды между этими двумя гидрофонами. В случае пассивной схемы оба гидрофона играют роль источника: шум, идущий на рис. 1 слева направо (от А к В), сперва проходит через гидрофон А, который в данном контексте играет роль излучателя этого шума, потом через гидрофон В, который здесь играет роль приемника. То же для шума, идущего справа налево (от В к А). Такой шум, проходящий через оба гидрофона и распространяющийся преимущественно в вертикальной плоскости, содержащей эти гидрофоны, мы будем далее называть «сигналом», в то время как часть шумов моря, распространяющихся в других направлениях, будем далее называть «помехой» (характерный размер области вблизи каждого из гидрофонов, которая дает вклад в «сигнальную» часть общего шума, определяется радиусом пространственной когерентности шумового поля [2]). Поскольку при такой интерпретации решается задача, близкая к классической задаче об обнаружении известного сигнала на фоне аддитивной

Рис. 1. Схема корреляционной обработки шумовых полей $U(r_A)$, $U(r_B)$, зарегистрированных гидрофонами, расположенными в А и В.

помехи (второй гидрофон должен зафиксировать сигнал, как бы излученный первым), то естественным представляется построение в процессе обработки взаимной функции когерентности шумовых сигналов $\langle U(\mathbf{r}_A, t)U^*(\mathbf{r}_B, t + \tau) \rangle$ (здесь $\langle \dots \rangle$ означает усреднение по множеству реализаций шума), принятых обоими гидрофонами, два пика которой (получаемые при должном накоплении), соответствуют сигналам, распространяющимся через гидрофоны А и В в обоих направлениях.

В акустике развитие методов шумовой интерферометрии началось после «переоткрытия» хорошо известного в квантовой теории поля соотношения между взаимной корреляционной функцией и двухточечной функцией Грина [3, с. 97]. Метод успешно апробирован в задачах сейсмоакустики [4], и сделаны первые шаги к адаптации метода к задачам гидроакустики [5, 6]. Сразу стало ясно, что основной проблемой использования описываемого подхода к гидроакустическим задачам становится время накопления шумового сигнала, которое разными авторами оценивалось в диапазоне от суток до нескольких часов. Существенного сокращения времени накопления удастся достигнуть при использовании корреляции акустических мод [2], когда их удастся выделить. Как показало дальнейшее исследование, в зависимости от расстояния между гидрофонами, можно использовать два режима. Если расстояние достаточно для того, чтобы моды «разбежались» за счет дисперсии, их выделение возможно по временам прихода. На меньших расстояниях для увеличения отношения сигнал/помеха при корреляционной обработке разумно использовать для обработки ту частотную полосу принимаемого сигнала, в которой существуют только нижние моды, например, только первая.

Теоретические основы метода шумовой интерферометрии рассмотрены в различных работах [1, 2, 5], для случая модовых сигналов они впервые были рассмотрены в работе [2]. В основу положена связь между функцией взаимной когерентности шумов $\langle U(\mathbf{r}_A, t)U^*(\mathbf{r}_B, t + \tau) \rangle$ и разностью запаздывающей $G^+(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_L, \tau)$ и опережающей $G^-(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_L, \tau)$ функциями Грина, которая может быть записана в виде [2]:

$$\langle U(\mathbf{r}_A, t)U^*(\mathbf{r}_B, t + \tau) \rangle \approx iD \int_{-\infty}^{\infty} [G^+(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \eta - \tau) - G^-(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \eta - \tau)] C(\eta) d\eta, \quad (1)$$

где $C(\eta) = \langle U(\mathbf{r}, t)U^*(\mathbf{r}, t + \eta) \rangle$ – функция автокогерентности шума (в случае изотропного шумового поля $C(\eta)$ одинакова для всех точек наблюдения $\mathbf{r}$), а безразмерный коэффициент D характеризуется радиусом когерентности регистрируемого шума. Как показано авторами в [2],

использование корреляций полей отдельных мод, а не полных полей, позволяет существенно сократить время накопления шумовых сигналов. Очень важно, что в силу принципа причинности, запаздывающая и опережающая функции Грина обращаются в ноль на отрицательных или положительных временных задержках τ , то есть при рассмотрении только положительных (или только отрицательных) временных задержек в правой части формулы (1) фактически останется не разность, а та или иная функция Грина, которая будет ассоциироваться с сигналом, проходящим через два гидрофона «справа налево» или «слева направо». Тем самым пики взаимной корреляционной функции (в случае их разрешимости) соответствуют функции Грина, а значит, могут быть использованы для восстановления информации о среде распространения сигнала.

Несмотря на то, что взаимная корреляционная функция позволяет выделить пики, соответствующие отдельным модам или провести восстановление в одномодовом режиме, следует отметить, что в соответствии с формулой (1), правильно говорить о восстановлении функции Грина. Также нужно обратить внимание, что в формуле (1) используется разность опережающей и запаздывающей функций Грина, которые являются комплексно сопряженными, а значит, спектр этой разности равен удвоенной мнимой части запаздывающей функции Грина.

По-видимому, впервые явное выделение функции Грина методом шумовой интерферометрии было произведено В.В. Гончаровым в работе [5] по экспериментальным данным, полученным одиночными гидрофонами, установленными во Флоридском проливе на глубинах около 100 м. Акустические моды в том же эксперименте выделялись с помощью так называемого «оператора скручивания» по методу, изложенному в работе [6].

Время накопления сигналов в методе шумовой интерферометрии. Как уже указывалось, значительное время накопления шумового сигнала является главным сдерживающим фактором для использования рассматриваемого метода [7]. Авторами были проведены исследования данного вопроса теоретически и по имеющимся данным эксперимента в Баренцевом море, где одиночные гидрофоны размещались на глубинах около 200 м. Рассматривалась зависимость отношения сигнал/помеха $S_{\text{out}}/N_{\text{out}}$ (рассчитываемого как отношение максимума взаимной корреляционной функции к уровню корреляционных остатков) в зависимости от времени накопления T , расстояния между гидрофонами R , полосы частот Δf с центральной частотой f_0 , и скоростью звука в среде c . Для теоретической оценки использовалась формула [2]:

$$S_{\text{out}}/N_{\text{out}} \approx \sqrt{2 \Delta f T c / 2\pi^2 f_0 R}.$$

Сравнение теоретической зависимости с экспериментальными данными показывает совпадение только на начальном участке. По мере увеличения времени накопления отношение практически не изменяется, что, по-видимому, связано с нестационарностью параметров волновода и шумовой картины. При этом отношение сигнал/помеха понижается с ростом центральной частоты f_0 (при заданной Δf); с увеличением же f_0 при одновременном увеличении Δf так, что минимальная частота полосы всегда оставалась равной 5 Гц, оказалось (рис. 2), что в области центральных частот от 10 до 20 Гц, наблюдается максимум. Затем, при увеличении центральной частоты, экспериментальные зависимости спадают и выходят на постоянный уровень. Такое поведение позволяет сделать вывод о том, что на указанных расстояниях между гидрофонами (будем называть его «малым», имея в виду, что на этом расстоянии еще не осуществилось дисперсионное разбегание мод) оптимальным режимом использования метода шумовой интерферометрии является маломодовый режим, то есть та частотная область, в котором шумовое поле формируется небольшим количеством мод, лучше – одной низшей модой.

Практическая реализация метода: два режима. Выявленные зависи-

Рис. 2. Зависимость нормированного отношения сигнал/помеха $S_{\text{out}}/N_{\text{out}}$ от времени накопления T (слева); нормированное отношение $S_{\text{out}}/N_{\text{out}}$ как функция центральной частоты f_0 при максимально возможной ширине полосы частот Δf (справа). Сплошные линии отображают экспериментальные зависимости для различных пар гидрофонов, расположенных на расстояниях $R=500$ м, пунктирные линии – теоретические ненормированные зависимости.

мости отношения $S_{\text{out}}/N_{\text{out}}$ позволили найти оптимальные режимы применимости метода шумовой интерферометрии, которые для заданной акватории определяются расстоянием между гидрофонами. Последнее обстоятельство вызвано именно тем, что для приема сигнала в рамках

представляемой работы используются одиночные гидрофоны. Хотя метод шумовой интерферометрии не требует этого строго, исключение многоэлементных приемных антенн позволяет понизить требования к экспериментальной схеме. Разделить акустические моды одиночными гидрофонами можно было, если бы расстояние между гидрофонами позволило бы модам «разбежаться» за счет дисперсии, что происходит не всегда. Поэтому при практической реализации метода шумовой интерферометрии приходится реализовывать один из двух случаев.

На небольших расстояниях пики взаимной корреляционной функции обуславливаются двумя факторами: наличием точки стационарной фазы вблизи минимума групповых скоростей мод (точка Эйри) и влиянием интерференции мод. В этом случае приходится использовать нижнюю полосу частот принимаемых шумовых сигналов, в которых возбуждена только первая мода. Следует отметить также, что при этом существенно сокращается время накопления (о чем говорилось в предыдущем разделе), что делает метод работоспособным.

На больших расстояниях моды выделяются по соответствующим им отдельным корреляционным пикам (или отдельным полосам на спектрограмме). Кроме того, выделение мод возможно за счет скачка фазы принятого сигнала на критических частотах учитываемых мод. Подробнее данный вопрос рассмотрен в работе [8].

Эксперимент. В апреле 2019 г. авторами был проведен эксперимент по апробации разработанной схемы и оборудования на шельфе Белого моря в районе мыса Киндо. Глубина составляла от 6 до 8 м. Море было покрыто слоем льда толщиной 42 см. Лед уже начинал таять; в сочетании с приливами и отливами это приводило к его растрескиванию, которое хорошо слышно на записях. Сигналы записывались синхронно в двух точках, разнесенных друг относительно друга на расстояние

50 м. Глубина в точках размещения гидрофонов составляла около 7 м. На рис. 3 представлен результат расчета модуля корреляционной функции при времени накопления, равном 5 мин. Аргумент корреляционной функции умножен на скорость звука в воде $c \approx 1500$ м/с, что позволяет перейти от рассмотрения временного сдвига к расстояниям. Хорошо видны 2 максимума, соответствующие

Рис. 3. Модуль корреляционной функции, вычисленной по результатам измерений в Белом море.

расстояниям ± 50 м. С ними можно сопоставить волны, идущие от одного гидрофона к другому или обратно. Существенная разница амплитуд максимумов обусловлена анизотропией задачи: одним концом линия, соединяющая гидрофоны, упиралась в берег, а другим – в открытое море.

На данной однолучевой трассе делалась попытка решения обратной задачи томографического типа по восстановлению приливной активности. В ходе обработки данных было замечено перемещение максимумов корреляционной функции с течением времени, которое хорошо коррелирует с приливной активностью по данным объективного контроля (рис. 4).

Рис. 4. Смещение с течением времени максимумов корреляционной функции (верхняя панель); справочная информация глубины моря, вызванной приливной активностью (нижняя панель).

Проведенные наблюдения позволяют отметить также несколько особенностей. Во-первых, при постоянном параметре накопления отношение величины наблюдаемых максимумов к уровню корреляционных остатков зависит от времени суток. Это можно объяснить разной скоростью таяния льда и, соответственно, разной интенсивностью его треска. Во-вторых, увеличение глубины в момент прилива приводит к синхронному увеличению временного сдвига, для которого наблюдаются максимумы. Это сравнительно просто объясняется в рамках лучевой модели, которая в условиях эксперимента (расстояние между гидрофонами порядка десяти глубин водоема) вполне применима. В итоге результаты даже относительно простых проведенных экспериментов позволяют осуществлять некоторый мониторинг акватории.

Заключение. Метод шумовой интерферометрии, прошедший стадию теоретического обоснования и начальных постановочных экспери-

ментов, может быть рекомендован к более широкому использованию в задачах мониторинга гидроакустических акваторий. В зависимости от имеющихся задач могут быть установлены различные режимы, использование различного времени накопления и другие параметры, которые «подстраиваются» под конкретную задачу.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 18-05-00737.

Литература

1. Godin O.A. Recovering the acoustic Green's function from ambient noise cross-correlation in an inhomogeneous moving medium // *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol. 97. No. 5. P. 054301.
2. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Использование в пассивной томографии океана низкочастотных шумов // *Акустический журнал.* 2008. Т. 54. № 1. С. 51–61.
3. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 784 с.
4. Яновская Т.Б., Лыскова Е.Л. Скоростное строение верхней мантии Европы по результатам шумовой поверхностно-волновой томографии // *Физика земли.* 2013. № 5. С. 3–11.
5. Гончаров В.В., Шуруп А.С., Годин О.А., Заботин Н.А., Веденев А.И., Сергеев С.Н., Brown M.G., Шатравин А.В. Томографическая инверсия измеренных функций взаимной корреляции шумов океана в мелкой воде с использованием лучевой теории // *Акустический журнал.* 2016. Т. 62. № 4. С. 431–411.
6. Сергеев С.Н., Шуруп А.С., Годин О.А., Веденев А.И., Гончаров В.В., Муханов П.Ю., Заботин Н.А. Выделение акустических мод во флоридском проливе методом шумовой интерферометрии // *Акустический журнал.* 2017. Т. 63. № 1. С. 73–83.
7. Курьянов Б.Ф. К возможности пассивной акустической томографии в диффузном шумовом поле // Доклады XI школы-семинара акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XVII сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2006. С. 179–185.
8. Сабиров И.Р., Шуруп А.С. Исследование фазы функции взаимной корреляции шумового поля океанического волновода // *Известия РАН. Серия физическая.* 2020. Т. 84. № 1. С. 106–109.

K.V. Dmitriev¹, S.N. Sergeev^{1,2}, A.S. Shurup^{1,2,3}

PASSIVE OCEAN TOMOGRAPHY BY USE OF NOISE INTERFEROMETRY

¹ Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University
Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1/2,
Tel.: 8(495)939-30-81; E-mail: sabirov.ir14@physics.msu.ru

² Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
Russia, 117997, Moscow, Nakhimovskiy prospekt, 36,
Tel.: 8(495)380-41-50; E-mail: sergeev@lanat.ru

³ Shmidt Institute of the Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences
Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya str., 10–1,
Tel.: 8(499)254-90-80; E-mail: shurup@physics.msu.ru

Noise interferometry is new and perspective approach to the recovering of the sea parameters (such as sound velocity, flows) and some bottom characteristics in case of shallow sea by use of passive scheme. The main advantage of the approach, which makes it attractive for possible practical use, is its relative cheapness. Firstly, it does not require radiating systems, and secondly, reception can be carried out by single hydrophones, rather than multi-element antennas. At the same time, the direct use of the method raises a number of questions, without which noise interferometry will not leave the stage of first experiments. The authors analyze the current state of research in this field and give the results of both a theoretical investigation and computer simulations, also by processing data from various experiments, including their own experiments on the shelf of the White Sea.

Keywords: noise interferometry, speed of sound, hydrophone

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant 18-05-00737.

References

1. Godin O.A. Recovering the acoustic Green's function from ambient noise cross-correlation in an inhomogeneous moving medium. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, Vol. 97, No. 5, pp. 054301.
2. Burov V.A., Sergeyev S.N., and Shurup A.S. Ispolzovaniye v passivnoy tomografii okeana nizkочастотных шумов. *Akusticheskiy zhurnal*, 2008, Vol. 54, No. 1, pp. 51–61.
3. Peskin M. and Shreder D. Vvedeniye v kvantovuyu teoriyu polya. Izhevsk: NITs Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2001, 784 p.
4. Yanovskaya T.B. and Lyskova E.L. Skorostnoye stroyeniye verkhney mantii Evropy po rezul'tatam шумовой поверхностно-волновой томografii. *Fizika zemli*, 2013, No. 5, pp. 3–11.
5. Goncharov V.V., Shurup A.S., Godin O.A., Zabotin N.A., Vedenev A.I., Sergeyev S.N., Brown M.G., and Shatravin A.V. Tomograficheskaya inversiya izmerennykh funktsiy vzaimnoy korrelyatsii шумов океана в мелкой воде с использованием лучевой теории. *Akusticheskiy zhurnal*, 2016, Vol. 62, No. 4, pp. 431–441.
6. Sergeyev S.N., Shurup A.S., Godin O.A., Vedenev A.I., Goncharov V.V., Mukhanov P.Yu., Zabotin N.A., and Brown M.G. Vydeleniye akusticheskikh mod vo flordiskom prolyve metodом шумовой интерферметрии. *Akusticheskiy zhurnal*, 2017, Vol. 63, No. 1, pp. 73–83.
7. Kurianov B.F. K vozmozhnosti passivnoy akusticheskoy tomografii v diffuznom шумовом pole. *Doklady XI shkoly-seminara akad. L.M. Brekhovskikh «Akustika океана» sovmeshchennoy s XVII sessiyeй Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva*. Moskva: GEOS, 2006, pp. 179–185.
8. Sabirov I.R. and Shurup A.S. Issledovaniye fazy funktsii vzaimnoy korrelyatsii шумового polya океанического волновода. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2020, Vol. 84, No. 1, pp. 106–109.