И.Р. Сабиров¹, С.Н. Сергеев^{1,2}, А.С. Шуруп^{1,2,3}

ВЫДЕЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ МОД МЕТОДАМИ ШУМОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ПРИЕМНЫМИ ГИДРОФОНАМИ

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: sabirov.ir14@physics.msu.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, г. Москва, Б. Грузинская ул., 10/1,

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

Рассматривается возможность выделения мод, то есть идентификации их номеров и оценки параметров, которые могут быть использованы для решения обратной задачи восстановления характеристик волновода, при различном расстоянии между одиночными гидрофонами. В качестве исходных данных рассматривается корреляция шумовых сигналов от естественных источников моря (шумовая интерферометрия). Когда волноводная дисперсия позволяет распространяющимся модам разделиться (большое расстояние между гидрофонами), происходит выделение отдельных мод из спектрограммы взаимной корреляционной функции шумов. В случае небольших расстояний между гидрофонами используется обнаруженная авторами возможность оценки критических частот мод на основе скачков фазы функции взаимной корреляции шумов.

Ключевые слова: выделение акустических мод, шумовая интерферометрия, шумы, гидрофоны, частоты мод, методы гидроакустики

Вызвавший большой интерес разных авторов в последнее время [1–2] метод шумовой интерферометрии в своем применении к задачам гидроакустики прошел стадии теоретического обоснования [3–4] и апробирование в виде отдельных экспериментов [5–6], в целом подтвердивших его принципиальную работоспособность. На следующей стадии возникают вопросы, касающиеся возможностей практического применения, например, выбор различных режимов в зависимости от конкретной задачи, решаемой рассматриваемым методом. Цель данной

работы – предложить практические схемы использования метода шумовой интерферометрии для выделения акустических мод (в целях последующего восстановления параметров водного слоя и дна) акваторий мелкого моря разных размеров.

Отличительной особенностью рассматриваемого подхода является выделение акустических мод по корреляции шумовых сигналов, принятых одиночными гидрофонами. Для выделения отдельных мод по данным с одиночных гидрофонов (без использования вертикальных антенн) изначально предполагалось использовать дисперсионное «разбегание» мод, если горизонтальное расстояние между приемными гидрофонами позволяет модам разделиться вследствие дисперсии, которая, как правило, тем больше, чем меньше глубина волновода.

Однако проведенное численное исследование особенностей спектрограммы функции взаимной корреляции шумов и сопоставление полученных результатов с данными натурных измерений продемонстрировало [7], что дисперсионные кривые, наблюдаемые в спектрограмме, в случае больших расстояний между гидрофонами, при уменьшении этого расстояния трансформируются в отдельные максимумы, локализованные как по частоте, так и по временной задержке. Для численного моделирования бралась модель Пекериса с параметрами, близкими к эксперименту [5–6]. Скорость звука в водном слое считалась постоянной и равной 1538 м/с, в дне – 1770 м/с, глубина моря бралась 100 м, отношение плотностей в дне и воде – 1.8, рассматривалось распространение первых четырех мод, которые наблюдались в эксперименте [6].

На рис. 1 показана эволюция спектрограммы корреляционной функции сигналов с двух гидрофонов, разнесенных на расстояния 1 км (рис. 1а), 5 км (рис. 1б) и 500 км (рис. 1в). Из серии рисунков хорошо видно, что на расстоянии ≈ 1 км моды еще не разделились: спектрограмма представляет собой набор локализованных по частоте и времени максимумов – «пятен».

Численное моделирование показало [7], что причиной возникновения подобных «пятен» может быть как межмодовая (в области частот, где поле формируется несколькими модами), так и внутримодовая интерференция. В последнем случае за счет наличия минимума групповых скоростей, а также в областях, где дисперсионная кривая достаточно пологая, мода одного номера на разных частотах может распространяться с примерно одинаковой скоростью, т.е. разные частоты могут присутствовать в одно и то же время в одной и той же пространственной области и, как следствие, могут конструктивно интерферировать, формируя тем самым локальные максимумы поля. Также «пятна» в спек-

программе могут соответствовать точке стационарной фазы в области минимума групповых скоростей мод [7], формирующей волну Эйри. Наиболее ярко влияние минимума групповой скорости проявляется в частотной области, где присутствует только низшая мода. В этом случае межмодовая интерференция отсутствует, а внутримодовая оказывается незначительной по сравнению с вкладом волны Эйри. В итоге, «пятно» в спектрограмме соответствует минимуму групповой скорости низшей моды, что позволяет оценить значение этой частоты, а также минимальную групповую скорость первой моды.

При увеличении расстояния между гидрофонами вид спектрограммы функции взаимной корреляции шумов изменяется. На расстоянии ≈ 5 км (соответствует поставленному во Флоридском проливе эксперименту [5–6]) моды уже разделяются на спектрограмме (для выделения мод в этом случае из экспериментальных данных могут применяться «скручивающие» операторы [1, 6]), однако моды еще не могут быть выделены во времени (рис. 1г). На больших расстояниях (≈ 500 км) моды разделимы и на спектрограмме корреляционной функции (рис. 1в), и во времени, что и следовало ожидать.

Таким образом, при небольших расстояниях, на которых моды еще не сильно разделились из-за дисперсии, использование метода шумовой интерферометрии требует дополнительных усилий. В этом случае, как показал анализ модельных и экспериментальных данных, работа с сигналом в полосе частот, где заведомо возбуждена только низшая гидроакустическая мода, обладает рядом преимуществ [4, 7]. Во-первых, в этом случае удастся однозначно интерпретировать наблюдаемый максимум спектрограммы (он всегда соответствует точке стационарной фазы – минимуму групповой скорости – ввиду того, что межмодовая интерференция исключена в этом случае), что дает дополнительную информацию для решения обратной задачи; во-вторых, подтверждено, что время накопления шумового сигнала, требуемое для достижения приемлемого (для оценки времен распространений) значения отношения «сигнал/помеха», существенно уменьшается при рассмотрении именно этого частотного диапазона (где поле формируется только первой модой), что соответствует полученным ранее теоретическим результатам о преимуществе одномодовой корреляционной обработки шумового поля [4]. Также в этом случае возможна идентификация выраженных скачков фазы функции взаимной корреляции шумов, соответствующих критическим частотам гидроакустических мод [8]. Получаемая экспериментальная оценка критических частот мод разных номеров также может использоваться в качестве исходной информации для решения обратной задачи.

Рис. 1. Эволюция нормированной спектрограммы корреляционной функции при увеличении расстояния между гидрофонами: 1 км (а), 5 км (б), 500 км (в). Разделение мод во времени: расстояние между гидрофонами 5 км – моды не разделимы во времени (г), но разделимы на спектрограмме (б).

Таким образом, можно сделать вывод о возможности выделения отдельных мод в пассивной схеме при использовании двух пространственно разнесенных гидрофонов: 1) в том случае, когда расстояние между гидрофонами достаточно для того, чтобы можно было выделить моды по результатам их дисперсионного «разбегания», моды выделяются по соответствующим им отдельным корреляционным пикам (или отдельным полосам на спектрограмме); 2) в том случае, когда расстояние между отдельными гидрофонами мало и моды дисперсионно не разбегаются, необходимо работать в частотной полосе, соответствующей первым модам и выделять моды по фазовым скачкам, проявляющимся на критических частотах отдельных мод.

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

Литература

1. Tan T.W., Godin O.A., Brown M.G., Zabotin, N.A. Characterizing the seabed in the Straits of Florida by using acoustic noise interferometry and time warping // J. Acoust. Soc. Am. 2019. Vol. 146. No. 4. P. 2321–2334.

2. Li F., Yang X., Zhang Y., Luo W., Gan W. Passive ocean acoustic tomography in shallow water // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. Vol. 145. No. 5. P. 2823–2830.
3. 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.
4. 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.
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., Brown M.G. Выделение акустических мод во Флоридском проливе методом шумовой интерферометрии // *Акустический журнал.* 2017. Т. 63. № 1. С. 73–83.
7. Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Муханов П.Ю., Сабиров И.Р., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Исследование особенностей спектрально-корреляционных характеристик низкочастотных шумов мелкого моря для целей пассивной томографии // *Ученые записки физического факультета Московского университета.* 2017. № 5. 1750113.
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.

I.R. Sabirov¹, S.N. Sergeev^{1,2}, A.S. Shurup^{1,2,3}

SEPARATION OF ACOUSTIC MODES BY NOISE INTERFEROMETRY METHODS DEPENDING ON THE DISTANCE BETWEEN RECEIVING HYDROPHONES

*¹Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University
Leninskie Gory, 1/2, Moscow, Russia, 119991,*

Tel.: 8(495)939-30-81, E-mail: sabirov.ir14@physics.msu.ru

*²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
Nakhimovskiy prospekt, 36, Moscow, Russia 117997,*

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

*³Shmidt Institute of the Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences
Bolshaya Gruzinskaya str., 10/1, Moscow, Russia, 123242,*

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

The possibility of modes separation, i.e. identifying their numbers and estimating parameters that can be used to solve the inverse problem of a waveguide characteristics reconstruction, at different distances between single hydrophones is considered. As the initial data, we consider the correlation of ambient noise signals (noise interferometry). When waveguide dispersion allows propagating modes to separate (large distance between hydrophones), individual modes are extracted from the spectrogram of the mutual noise correlation function. In the case of small distances between hydrophones, the authors use the opportunity to estimate the critical frequency of modes based on phase jumps of the noise cross-correlation function.

Keywords: selection of acoustic modes, noise interferometry, noise, hydrophones, mode frequencies, hydroacoustic methods

Acknowledgment: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant 18-05-00737, as well as by the grant of the President of the Russian Federation for scientific schools No. NSh 5545.2018.5.

References

1. Tan T.W., Godin O.A., Brown M.G., and Zaboltn N.A. Characterizing the seabed in the Straits of Florida by using acoustic noise interferometry and time warping. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2019, Vol. 146, No. 4, pp. 2321–2334.
2. Li F., Yang X., Zhang Y., Luo W., and Gan W. Passive ocean acoustic tomography in shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2019, Vol. 145, No. 5, pp. 2823–2830.
3. 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.
4. Burov V.A., Sergeev S.N., and Shurup A.S. The use of low-frequency noise in passive ocean tomography. *Acoustic Journal*, 2008, Vol. 54, No. 1, pp. 51–61.
5. Goncharov V.V., Shurup A.S., Godin O.A., Zaboltn N.A., Vedenev A.I., Sergeev S.N., Brown M.G., and Shatravin A.V. Tomographic inversion of the measured cross-correlation functions of ocean noise in shallow water using ray theory. *Akust.*, 2016, Vol. 62, No. 4, pp. 431–411.
6. Sergeev S.N., Shurup A.S., Godin O.A., Vedenev A.I., Goncharov V.V., Mukhanov P.Yu., Zaboltn N.A., and Brown M.G. Isolation of acoustic modes in the Florida Strait by the method of noise interferometry. *Acoustic journal*, 2017, Vol. 63, No. 1, pp. 73–83.
7. Grinyuk A.V., Kravchenko V.N., Mukhanov P.Yu., Sabirov I.R., Sergeev S.N., and Shurup A.S. Investigation of the peculiarities of the spectral-correlation characteristics of low-frequency noises of the shallow sea for the purpose of passive tomography. *Scientific notes of the Faculty of Physics of Moscow University*, 2017, No. 5, 1750113.
8. Sabirov I.R. and Shurup A.S. Investigation of the phase of the cross-correlation function of the noise field of the oceanic waveguide. *Izvestiya RAN. Physical series*, 2020, Vol. 84, No. 1, pp. 106–109.