

Исследование особенностей спектрально–корреляционных характеристик низкочастотных шумов мелкого моря для целей пассивной томографии

А. В. Гринюк², В. Н. Кравченко², П. Ю. Муханов¹, И. Р. Сабиров¹, С. Н. Сергеев¹, А. С. Шуруп^{1*}

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

²АО «НИИ «Атолл». Россия, 141981, Дубна, ул. Приборостроителей, д. 5

(Статья поступила 04.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

В работе рассматриваются результаты корреляционной обработки низкочастотных шумов, зарегистрированных в Баренцевом море разнесенными в пространстве донными гидрофонами. Сопоставление экспериментальных данных с результатами численного моделирования показывает, что на формирование спектрально–корреляционных характеристик низкочастотных шумов заметное влияние может оказывать межмодовая интерференция, а не только наличие точки стационарной фазы вблизи минимума дисперсионных зависимостей групповых скоростей мод, как это предполагалось ранее. Демонстрируется, что выделение частотной области, где шумовое поле сформировано только низшей модой, позволяет увеличить выходное отношение сигнал/помеха при корреляционной обработке, что может быть использовано при построении схем пассивной томографии.

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

УДК: 551.463.21

Ключевые слова: мелкое море, пассивная томография, интерференция мод.

ВВЕДЕНИЕ

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

Основой пассивной томографии является возможность оценки функции Грина двух разнесенных в пространстве точек на основе взаимной функции корреляции шумовых сигналов, зарегистрированных в этих точках [2]. Ранее возможность подобной оценки использовалась в работах [3, 4], где на основе анализа спектрограммы взаимной функции корреляции шумов удалось оценить параметры волновода. Следует отметить, что внешний вид спектрограмм в рабо-

тах [3, 4] заметно отличается: если в работе [3] на спектрограмме наблюдаются локализованные максимумы, то в работе [4] спектрограмма содержит протяженные линии, соответствующие дисперсионным зависимостям групповых скоростей различных мод. Одной из причин формирования локализованных максимумов в спектрограмме корреляционной функции шумов, как отмечалось в [3], может являться наличие точки стационарной фазы в области минимума групповых скоростей. В настоящей работе показано, что для объяснения максимумов в спектрограмме требуется учет еще одного фактора, а именно, интерференции мод различных номеров. Результат этой интерференции может заметно влиять на структуру спектрограммы взаимной функции корреляции шума, что требует учета при построении схем пассивной томографии.

1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В МЕЛКОМ МОРЕ

В качестве модели рассматривался волновод Пекериса, акустическое поле в котором рассчитывалось в соответствии с выражением из [5]:

$$\psi(f, r) = \frac{2\pi i}{h} \sum_l \frac{\sin(x_l(1 - \frac{z_0}{h})) \sin(x_l(1 - \frac{z}{h})) H_0^{(1)}(kr \sin \theta_l)}{1 - \left(\frac{kh\nu}{mx_l}\right)^2 \left(\frac{1}{x_l}\right) \operatorname{tg}(x_l) \sin^2(x_l)} \quad (1)$$

где $k \sin(\theta_l) = 1/h \sqrt{(kh)^2 - x_l^2}$, l — порядковый номер гидроакустической моды, $k = 2\pi f/c$ — волновое число

в воде, f — частота, h — глубина волновода, z и z_0 — расстояния от дна волновода до приёмника и источника соответственно, $\nu^2 = 1 - (c/c_1)^2$, c и c_1 — скорости

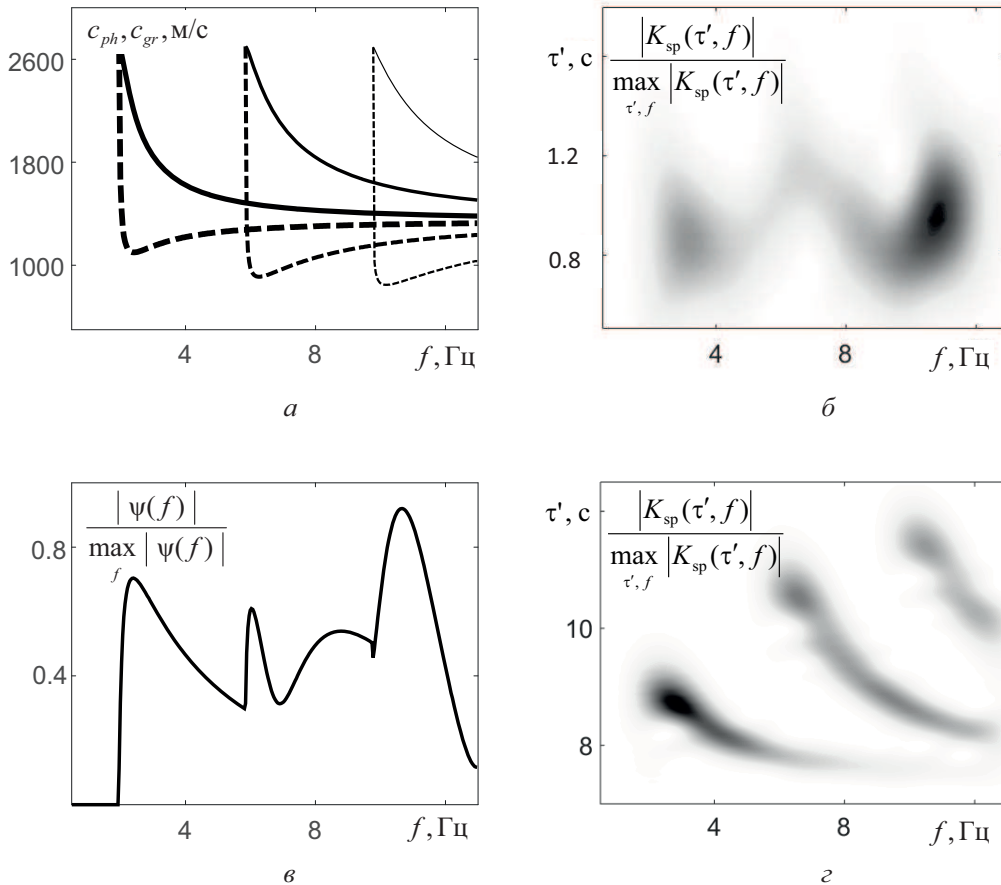


Рис. 1: Результаты численного моделирования: а — зависимости фазовых c_{ph} и групповых c_{gr} скоростей первых трех мод от частоты для рассматриваемой модели волновода; б — нормированный модуль спектрограммы при значении $r = 1$ км; в — нормированный модуль спектра сигнала; г — нормированный модуль спектрограммы при $r = 13$ км

звука в воде и дне волновода соответственно, x_l — вертикальное волновое число l -ой моды, домноженное на глубину волновода, r — расстояние между источником и точкой наблюдения, i — мнимая единица; для сокращения записи, в (1) указаны не все аргументы функции ψ .

На рис. 1 приведены результаты численного моделирования, полученные для следующих параметров рассматриваемой модели, близких к условиям эксперимента в [3]: $c = 1450$ м/с, $c_1 = 2770$ м/с, $h = 209$ м. На рис. 1,а видно, что в рассматриваемом диапазоне частот 0.5–13 Гц присутствуют моды первых трех номеров. Вычислялись значения поля (1) на разных частотах f для заданной полосы, после чего Фурье преобразование полученных значений позволяло оценить временную зависимость поля $\psi(t, r)$, принятого на расстоянии r от источника. Полученный результат $\psi(t, r)$ соответствует функции Грина, оценку которой в натурном эксперименте получают из функции взаимной корреляции шумов. На рис. 1,б, г приведены нормированные модули спектрограмм $K_{sp}(\tau', f)$, вычисленных для полей $\psi(t, r)$ на основе оконного преобразования

Фурье [3], где τ' — временная задержка, соответствующая сдвигу окна вдоль временной оси. Полученные результаты (рис. 1,б, г) в полной мере соответствуют данным из [3, 4]. Так при $r = 1$ км спектрограмма смоделированного поля имеет максимумы, локализованные по временной задержке и частоте (рис. 1,б), как это и наблюдается в эксперименте [3]. Для большего расстояния $r = 13$ км, когда в значительной мере проявляются дисперсионные свойства волновода, в спектрограмме начинается формирование протяженных линий, соответствующих дисперсионным зависимостям групповых скоростей мод (рис. 1,г), что также наблюдается в эксперименте [4]. Однако, на рис. 1,б присутствуют лишь два выраженных всплеска, которые можно соотнести с минимумами групповых скоростей первой и третьей моды, в то время как присутствие трех мод должно приводить к наличию трех подобных максимумов. В ходе детального численного исследования для различных параметров задачи было показано, что заметную роль в формировании наблюдаемых максимумов может играть интерференция между модами различных номеров, что ранее не учитывалось.

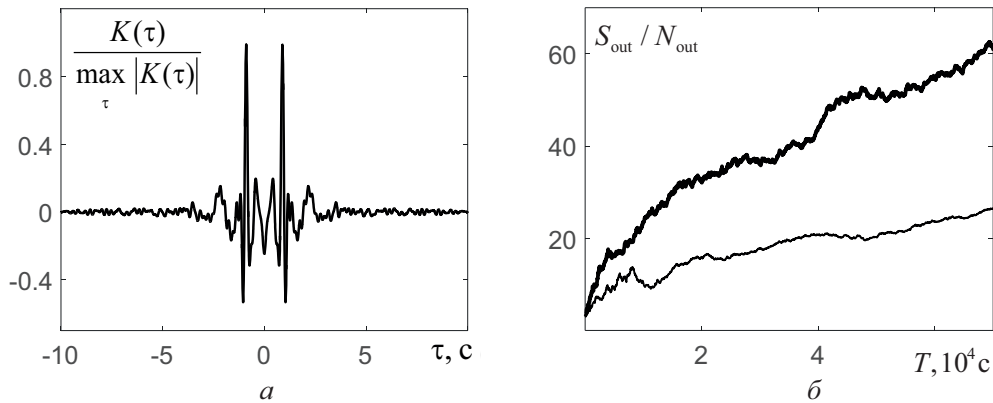


Рис. 2: Результаты обработки экспериментальных данных: *a* — нормированная взаимная функция корреляции шумовых полей, зарегистрированных донными гидрофонами, разнесенными на расстояние ≈ 1 км в полосе частот 0.5–5 Гц; *б* — зависимость выходного отношения сигнал/помеха от времени накопления для полосы частот 0.5–5 Гц (толстая линия) и 5–15 Гц (тонкая линия)

Например, при постепенном увеличении расстояния r , при неизменных параметрах волновода, наблюдаются смещения локализованных максимумов не только по временным задержкам, но и по частоте. В этих случаях всплески на спектрограммах уже не соответствуют минимумам групповых скоростей различных мод. На рис. 1, *б* приведена зависимость нормированного модуля поля $|\psi(f, r)|$ от частоты для значения $r = 1$ км. На рис. 1, *б* видно, что структура поля вблизи минимума групповой скорости второй моды оказывается сильно искаженной за счет межмодовой интерференции. В результате максимум, соответствующий второй моде, оказывается слабо заметным на фоне максимумов первой и третьей мод на рис. 1, *б*.

Следует отметить, что всплеск интенсивности на спектрограмме, соответствующий минимуму групповых скоростей первой гидроакустической моды остается локализованным по частоте вне зависимости от изменения расстояния r . Это позволяет однозначно соотнести положение максимума спектрограммы на шкале частот с положением минимума дисперсионной зависимости групповой скорости низшей гидроакустической моды. Кроме этого, корреляционная обработка шумового поля, сформированного только одной гидроакустической модой, должна давать заметный выигрыш по времени накопления [2], что демонстрируется далее.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ПОМЕХА

В качестве экспериментальных данных используются шумовые записи, зарегистрированные донными гидрофонами в Баренцевом море. Запись производилась интервалами около 30 с каждые 1.5 мин в течение примерно 4 суток. Расстояние между двумя гидрофонами

составляло $r \approx 1$ км, параметры волновода были близки к параметрам, использовавшимся выше при моделировании.

При исследовании выходного отношения сигнал/помеха S_{out}/N_{out} в качестве сигнала S_{out} на выходе коррелятора принимается значение максимума функции взаимной корреляции, соответствующего положительным временным задержкам (изменение максимума, соответствующего отрицательным временным задержкам, было аналогичным). Шумом N_{out} считается среднее квадратичное отклонение функции взаимной корреляции в области, где анализируемый максимум отсутствует.

Предполагалось, что в диапазоне частот 0.5–5 Гц в регистрируемом шумовом поле присутствует преимущественно низшая гидроакустическая мода. Это предположение подтверждается результатами численного моделирования с различными параметрами волновода, близкими к условиям реального эксперимента, а также тем, что именно в этой частотной области присутствует первый максимум спектрограммы взаимной функции корреляции шума.

На рис. 2, *а* приведена нормированная взаимная функция корреляции, вычисленная в полосе 0.5–5 Гц при усреднении за все время наблюдения. Видны (рис. 1, *а*) два максимума, симметричных относительно нулевой задержки, которые соответствуют временам распространения первой моды между рассматриваемыми гидрофонами во взаимно противоположных направлениях. На рис. 2, *б* приведена зависимость S_{out}/N_{out} от времени накопления T для двух частотных диапазонов 0.5–5 Гц (рис. 2, *б*, толстая линия) и 5–15 Гц (рис. 2, *б*, тонкая линия). Как видно на рис. 2, *б*, корреляционная обработка шумового поля, сформированного преимущественно низшей гидроакустической модой дает лучшее выходное отношение сигнал/помеха.

На высоких частотах гидроакустическое поле более чувствительно к изменениям характеристик волновода, которые происходят в течение времени накопления, что приводит в ограничению роста отношения S_{out}/N_{out} в этом случае. Различного рода межмодовые взаимодействия в диапазоне 5–15 Гц также могут приводить к снижению отношения S_{out}/N_{out} по сравнению с одномодовым случаем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выделение частотной области, где шумовое поле формируется только низшей гидроакустической модой, позволяет исключить эффекты межмодовой интерференции и однозначно соотнести в этом случае положение максимума спектрограммы с положением миниму-

ма групповой скорости низшей моды. Также, корреляционная обработка шумового поля, сформированного одной модой, позволяет улучшить выходное отношение сигнал/помеха по сравнению с многомодовым режимом обработки на более высоких частотах. Полученные результаты могут быть использованы при разработке пассивных методов мониторинга характеристик мелкого моря по данным с одиночных гидрофонов, расположенных на сравнительно небольших расстояниях, когда влияния межмодовой дисперсии оказывается недостаточно для разделения сигналов отдельных мод в точках приема.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-29-02097 офи_м, № 16-02-00680, а также гранта Президента РФ по программе поддержки ведущих научных школ № НШ-7062.2016.2.

-
- [1] Гончаров В. В., Зайцев В. Ю., Куртенов В. М., Нечаев А. Г., Хилько А. И. Акустическая томография океана. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997.
[2] Буров В. А., Сергеев С. Н., Шуруп А. С. Акуст. журн. 2008. **54**, №1. С. 51.
[3] Буров В. А., Гринюк А. В., Кравченко В. Н., Муханов П. Ю. и др. Акустич. журнал. 2014. **60**, № 6. С. 611.

- [4] Сергеев С. Н., Шуруп А. С., Годин О. А., Веденев А. И. и др. Акуст. журнал. 2017. **63**, № 1. С. 73.
[5] Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.

Investigation of peculiarities of low-frequency noises' spectral-correlation characteristics in shallow sea for purposes of passive tomography

A. V. Grinyuk², V. N. Kravchenko², P. Yu. Mukhanov¹, I. R. Sabirov¹, S. N. Sergeev¹, A. S. Shurup^{1,a}

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

²RJSC «Scientific Research Institute «Atoll», Dubna 141981, Russia

E-mail: ^ashurup@physics.msu.ru

Results of the correlation processing for the low-frequency noise recorded in the Barents Sea by spatially separated bottom hydrophones are considered. Comparison of experimental data with results of numerical simulation shows that the inter-mode interference may play a significant role in the formation of the spectral-correlation characteristics of low-frequency noises, but not only the presence of the stationary phase point near the minimum of the dispersion curves of the group velocities for the different modes, as it was assumed before. It is demonstrated that the filtration of the frequency range, where the noise field is formed only by the lowest mode, makes it possible to increase the output signal-to-noise ratio in correlation processing that can be used during the development of passive tomography schemes.

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

Keywords: shallow sea, passive tomography, interference of modes.

Received 04 July 2017.

Сведения об авторах

1. Гринюк Анатолий Владимирович — нач. отдела; тел.: (495) 740-77-95, e-mail: anatoly_grinyuk@mail.ru.
2. Кравченко Владимир Николаевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, нач. отделения; тел.: (495) 740-77-95, e-mail: vladimirkra@gmail.com.
3. Муханов Павел Юрьевич — аспирант; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: pavel.mukhanov@gmail.com
4. Сабиров Ильдар Равильевич — студент; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: sabirany@gmail.com
5. Сергеев Сергей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: sergeev@aesc.msu.ru.
6. Шуруп Андрей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: shurup@physics.msu.ru.