УДК 551.463.21

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗЫ ФУНКЦИИ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ШУМОВОГО ПОЛЯ ОКЕАНИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

© 2020 г. И. Р. Сабиров^{1, *}, А. С. Шуруп^{1, 2, 3}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", физический факультет, Москва, Россия ²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт океанологии имени П.П. Ширшова

Феоеральное госуоарственное оюожетное учрежоение науки – институт океанологии имени 11.11. Ширшова Российской академии наук", Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук", Москва, Россия

> **E-mail: sabirov.ir14@physics.msu.ru* Поступила в редакцию 29.07.2019 г. После доработки 30.08.2019 г. Принята к публикации 27.09.2019 г.

Обсуждаются преимущества и ограничения метода оценки критических частот гидроакустических мод по данным о фазе функции взаимной корреляции шумов мелкого моря. Результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными, зарегистрированными в Баренцевом море.

DOI: 10.31857/S0367676520010275

ВВЕДЕНИЕ

Критические частоты мод волновода играют важную роль при решении задач геоакустической инверсии и при решении обратных задач акустического рассеяния [1]; информация о критических частотах требуется при реализации методов обработки регистрируемых полей, при калибровке волноводов. Экспериментальную оценку критических частот обычно проводят на основе анализа записей сигналов, генерируемых активными источниками [1-3]. Сравнительно недавно был предложен метод, позволяющий проводить оценку критических частот на основе анализа функции взаимной корреляции шумового поля, регистрируемого разнесенными в пространстве одиночными приемниками звукового давления [4]. Важной отличительной особенностью этого подхода является отсутствие в его схеме дорогостоящих излучателей. Основой рассматриваемого метода является возможность использования функции взаимной корреляции шумовых полей, зарегистрированных в разнесенных точках океанической акватории, при оценке функции Грина волновода для данных точек [5, 6]. В настоящей работе исследуется фаза функции взаимной корреляции шумов, полученной на основе обработки экспериментальных данных, зарегистрированных в Баренцевом море, а также анализируется фаза численно промоделированной функции

Грина волновода Пекериса, проводится их сравнительный анализ.

ФАЗА ФУНКЦИИ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ШУМОВ

Под фазой подразумевается угловая компонента комплексного спектра S(f,r), f – частота, 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: arctg[Im S(f,r)/Re S(f,r)]. Значение полученной таким образом величины для фиксированной частоты соответствует разнице фаз волны между ее значениями в начале и конце пройденного волной пути. Из данного выше определения можно графически представить фазы функции взаимной корреляции шумов как функции от частоты, область определения которой лежит в полосе, ограниченной сверху частотой Найквиста, а модуль разницы между максимальным и минимальным значениями составляет период тангенса. При работе с экспериментальными данными оказалось, что фаза на некоторых участках, где ожидался монотонный рост, обладала выраженными особенностями. Для более наглядного представления наблюдаемых особенностей применили обработку по программе, которая нивелировала разрывы фазы величиной в 2π. В результате такой обработки значения полученной функции на графике для каждой частоты соответствовали суммарно набежавшей фазе волны при ее прохождения между разнесенными точками акватории. Простейшей интерпретацией полученной функции является зависимость от частоты произведения волнового числа на выступающее в роли параметра расстояние, которое прошла волна с текущим волновым числом. В данном представлении фаза корреляционной функции имела особенности, внешне представлявшие собой характерные скачки, локализованные вблизи отдельных частот.

При анализе экспериментальных данных было установлено, что при постепенном увеличении расстояния между гидрофонами фаза взаимной функции корреляции зарегистрированных ими шумов постепенно деформируется вблизи отдельных частот (рис. 1), вследствие чего образуются ранее упомянутые характерные скачки фазы. При дальнейшем увеличении расстояния частоты, вблизи которых можно наблюдать данные особенности, сохраняются. Примечательно также и то, что имеются расстояния, при которых идентификация определенных скачков фазы не представляется возможной из-за их недостаточной выраженности.

ФАЗА ФУНКЦИИ ГРИНА МОДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

Численное моделирования спектра функции Грина изотропного волновода Пекериса с изоскоростным водным слоем, лежащим на жидком полупространстве, проводилось в соответствии с выражением из [7]:

$$S(f,r) = \frac{2\pi i}{h} \times \sum_{l} \frac{\sin\left(x_{l}\left(1-\frac{z_{0}}{h}\right)\right) \sin\left(x_{l}\left(1-\frac{z}{h}\right)\right) H_{0}^{(1)}\left(kr\sin\theta_{l}\right), (1)}{1-\left(\frac{khv}{mx_{l}}\right)^{2} \left(\frac{1}{x_{l}}\right) \operatorname{tg}(x_{l}) \sin^{2}(x_{l})}$$

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, h – глубина волновода, z и z_0 – расстояния от дна волновода до приемника и источника соответственно, $v^2 = 1 - (c/c_1)^2$, c и c_1 – скорости звука в воде и на дне волновода соответственно, x_l – вертикальное волновое число l-ой моды, умноженное на глубину волновода, r – расстояние между источником и точкой наблюдения, m – отношение плотности жидкого слоя к плотно-



Рис. 1. Фаза функции взаимной корреляции шумовых сигналов, зарегистрированных в эксперименте в Баренцевом море донными гидрофонами, разнесенными на расстояния порядка 240 м (жирная линия), 600 м (полужирная линия) и 1 км (тонкая линия).

сти полупространства, i — мнимая единица; для сокращения записи в (1) указаны не все аргументы функции.

Сопоставление экспериментальных данных (рис. 1*a*) и результатов численного моделирования (рис. 1*b*) демонстрирует, что скачки фазы функции взаимной корреляции шумовых полей, зарегистрированных в разнесенных точках волновода, наблюдаются именно вблизи критических частот гидроакустических мод. В соответствии с этим оценка критических частот по фазе функции взаимной корреляции шумов возможна при определении частот, вблизи которых расположены характерные особенности.

Моделирование также показало, что интерференция мод соседних номеров приводит к изменению характера поведения фазы вблизи критических частот. В условиях, когда начинается формирование особенности вблизи критической частоты, амплитуда скачка фазы мала. При этом она испытывает излом строго на соответствующей критической частоте. Последующее увеличение расстояния приводит к росту амплитуды скачка и постепенному переходу излома в гладкую кривую. При этом участок, обладающий наибольшей по модулю крутизной, перемещается в сторону большей частоты (рис. 2). Данное обстоятельство необходимо учитывать при проведении оценки критических частот по экспериментальными данными.

При численном моделировании, так же как и в эксперименте, были обнаружены ситуации, в которых идентификация скачков фазы становилась затруднительной или вовсе невозможной. Такое затруднение испытывалось одновременно лишь с фазой вблизи единственной критической частоты. Иными словами, невозможность идентификации скачков фазы вблизи критических частот различных номеров происходит при различных расстоя-



Рис. 2. Фаза функции Грина, рассчитанная для волновода Пекериса, с параметрами, близкими к условию эксперимента, для точек, разнесенных на те же расстояния, что и на рис. 1.

ниях между точками, для которых строилась модельная функция Грина. Однако при этом амплитуды обнаруживаемых скачков фазы могут быть относительно малыми, что при наличии шумов (как в случае с экспериментальными данными) приводит к невозможности их идентификации.

Важно отметить, что приведенный выше анализ результатов моделирования, во первых, относится к полосе частот, лежащей выше критической частоты первой гидроакустической моды, так как используемое в настоящей работе модельное поле описывает только спектр распространяющихся гидроакустических мод; во вторых, применим к области небольших значений набежавшей фазы, так как в противном случае результат взаимодействия мод соседних номеров приводит к рождению особенностей фазы при частотах, далеких от критических, что сводит к минимуму достоверность оценки критических частот по описываемому подходу.

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ОЦЕНКИ КРИТИЧЕСИХ ЧАСТОТ

Границы применимости рассматриваемого метода оценки критических частот определяются разрешением по частоте спектра функциии корреляции. Для достоверности получаемых результатов анализа необходимо, чтобы шаг по фазе за один отсчет по частоте был существенно меньше 2π, что приводит к соотношению: $d\phi \ll 2\pi \Leftrightarrow rdk(f) \ll 2\pi \quad \Rightarrow \quad r df/c(f) \ll 1$ $\Rightarrow k(f)r \ll fT$, где T – длительность записи коррелируемых сигналов. При больших расстояниях для обнаружения скачков будет требоваться существенное разрешение по частоте, что в свою очередь приведет к необходимости более длительного накопления шумового сигнала. Дополнительное увеличение времени накопления нежелательно, так как этом случае растет влияние



Рис. 3. Фаза функции Грина волновода Пекериса, с параметрами, близкими к условию эксперимента в Баренцевом море, для точек, разнесенных на расстояния 250 м (тонкая линия) и 320 м (толстая линия), вблизи критической частоты второй гидроакустической моды (5.8 Гц).

нестационарности шумового поля, а также становятся существенными вариации характеристик изучаемого волновода (например, вследствие около суток). Все это приводит к уменьшению точности и достоверности получаемых оценок критических частот. В то же время на малых расстояних влияние неоднородных волн будет мешать идентификации скачков фазы. Данным влиянием можно пренечбречь в случае выполнения условия $k(f)r \ge 1$ в соответствии с [7].

В результате приведенных выше рассуждений приходим к выводу, что описанный в данной работе метод оценки критических частот может быть применен в случае, если расстояние между приемниками *r* такое, что:

$$1 \ll k(f)r \ll Tf.$$
⁽²⁾

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты обработки экспериментальных данных подтверждают возможность оценки критических частот мод волновода на основе характерных скачков фазы функции взаимной корреляции сигналов, зарегистрированных разнесенными в пространстве звукоприемниками. При работе с данными, полученными в пассивном режиме, для достижения приемлемой точности и достоверности результатов требуется высокое выходное отношение сигнал/помеха (порядка 10 для условий рассматриваемого эксперимента). Также факторами, оказывающими негативное влияние на границы применимости рассматриваемого ме-

№ 1

том 84

2020

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ

тода оценки критических частот, являются: нестационарность характеристик волновода в период сбора данных, влияние межмодовой интерференции, а также недостаточно высокое разрешение по частоте спектра функции взаимной корреляции регистируемых сигналов.

Одним из преимуществ предлагаемого подхода является возможность его применения в условиях, когда расстояние между точками приема сигналов недостаточно для последующего разделения гидроакустических мод за счет дисперсии волновода (по данным рассматриваемого эксперимента оценку критических частот удается произвести при расстояниях, составляющих несколько глубин волновода). Следует отметить также, что предложенный метод оценки критических частот применим и в активном режиме. В этом случае ситуация упрощается, так как за счет высокого отношения сигнал/помеха гарантируется возможность получения требуемого разрешения фазы на различных частотах.

Авторы благодарят НИИ "Атолл" и лично В.Н. Кравченко и А.В. Гринюка за предоставленные экспериментальные данные. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-29-02097-офи_м и № 18-05-00737).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Лазарев В.А. и др. // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 3. С. 354; Grinyuk A.V., Kravchenko V.N., Lazarev V.A. et al. // Acoust. Phys. 2013. V. 59. № 3. Р. 312.
- Munk W., Worcester P., Wunsch C. Ocean acoustic tomography. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995. 433 p.
- 3. Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртепов В.М. и др. Акустическая томография океана. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997. 255 с.
- Муханов П.Ю., Сабиров И.Р., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Акустика океана. Докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских, совм. с XXXI сессией Рос. акуст. об-ва. М.: ГЕОС, 2008. С. 247.
- 5. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 51; Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S. // Acoust. Phys. 2008. V. 54. № 1. P. 42.
- 6. Буров В.А., Гринюк А.В., Кравченко В.Н. и др. // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 6. С. 611; Burov V.A., Mukhanov P.Y., Sergeev S.N. et al. // Acoust. Phys. 2014. V. 60. № 6. Р. 647.
- 7. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.