УДК 534.2,517.4

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ МОДОВОГО СОСТАВА ПРИБРЕЖНОГО ВОЛНОВОДА НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

© 2020 г. К. В. Дмитриев^{1, *}, А. С. Липавский^{1, 2}, И. А. Панков¹, С. Н. Сергеев^{1, 2}

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 Российской академии наук", Москва, Россия

**E-mail: kdmitrie@aesc.msu.ru* Поступила в редакцию 29.07.2019 г. После доработки 30.08.2019 г. Принята к публикации 27.09.2019 г.

Предложен подход к выделению мод волновода, образованного в мелком водоеме или шельфовой зоне. Параметры распространяющихся мод определяются из взаимной корреляционной функции ЛЧМ-посылки и принятого сигнала методом согласованной обработки. Проведено экспериментальное выделение мод волновода, образованного дном и поверхностью арктического шельфа.

DOI: 10.31857/S036767652001010X

введение

Распространение звука в арктических морях носит сложный характер [1–3], в первую очередь по причине их мелководности. Большинство северных морей России имеют глубину, не превышающую десятков метров на протяжении 100-мильной зоны, представляющей особый интерес в хозяйственных, природоохранных и иных целях. Использование акустических методов мониторинга в таких морях затруднено из-за сильного влияния дна и поверхности (часто покрытой льдом), однако именно звуковые волны являются единственным видом излучения, которое способно распространяться на большие расстояния и, следовательно, несет информацию о неоднородностях (температуре, течениях, параметрах дна и ледовой поверхности) зондируемого региона.

Изменчивость свойств мелководных северных морей в пространстве и во времени приводит к необходимости экспериментальной верификации теоретических результатов, рассматривающих распространение акустических полей в арктическом регионе, однако даже относительно простые по своему содержанию эксперименты, проводимые в условиях южных морей и мелководных водоемов средней полосы, становятся невероятно сложными на арктическом побережье. Это связано как с повышенными требованиями, предъявляемыми к надежности используемой аппаратуры, так и с чисто инфраструктурными проблемами – отсутствием подъезда к местам, представляющим интерес, отсутствием электричества (следовательно, появлением дополнительных требований к автономности работы), в конце концов, со сложными условиями для работы исследователей (как правило, полевые гидроакустические эксперименты проводятся в условиях подготовленного полигона или с борта научно-исследовательского судна, что абсолютно исключено в условиях Арктики, по крайней мере, в сезон наличия ледового покрова на шельфе). По указанной причине авторы данной работы, разрабатывая новую аппаратуру и методы обработки, апробировали отдельные элементы эксперимента в условиях мелководного озера в Подмосковье, определяя образованный в озере волновод как волновод арктического типа, и только потом провели решающий эксперимент на арктическом шельфе в Белом море.

МОДЫ МЕЛКОВОДНОГО ВОДОЕМА

Возможность модового описания распространения звука под водой обусловливается образованием в водоеме акустического волновода. Волноводное распространение звука в океане было открыто советским ученым Л.М. Бреховских в 1946 г. [4]. Исторически получилось так, что работы проводились в глубоком море, т.е. в таком регионе, где волноводное распространения осуществлялось за счет наличия так называемого подводного звукового канала — расположенного на некоторой глубине минимума величины скорости звука, обусловленного прогревом верхних слоев океана и ростом гидростатического давления на больших глубинах. В результате распространяющийся на дальнее расстояние звук не взаимодействовал с изменяющимися границами — дном и поверхностью. На мелководье совсем иная ситуация – как раз наличие границ обеспечивает волноводное распространение, однако именно этот случай оказался наименее изученным. Его относительная математическая простота обусловливается исключительно использованием идеализированных моделей, применимость которых к реальным условиям требует серьезного исследования. Интерес к шельфовой зоне, возникший и сильно возросший в последние годы, сделал такое исследование актуальным. Основная проблема состоит в том, что в мелком море условия на поверхности и дне, как правило, неизвестны: поверхность может иметь ледовый покров (в виде, например, пакового или однолетнего льда, а это совершенно разные условия), воздушную прослойку подо льдом. Дно даже в одном и том же регионе может быть акустически жестким или мягким, импедансным, оно может быть покрыто слоем газонасыщенных осадков, иметь неровности рельефа и т.д.

Модой в математическом понимании называется собственная функция краевой задачи с заданными граничными условиями. Физически на профиль молы и параметры ее распространения (фазовая и групповая скорости) влияют вертикальный профиль скорости звука – в случае глубокого океана, где сформировался подводный звуковой канал; границы (дно и поверхность) — в случае мелкого моря. Моды являются удобным базисом для представления акустического поля. Во-первых, они представляют собой устойчивое в горизонтальном направлении (т.е. по акустической трассе) образование. Во-вторых, по всей глубине волновода моды ортонормированы, что позволяет использовать их как базис для разложения акустических полей. В-третьих, моды являются двумерным объектом в пространстве (распространяются вдоль обеих горизонтальных координат, но параметры распространения содержат в себе информацию о параметрах среды вдоль глубинной координаты), что позволяет использовать модовое описание поля в удобном подходе "вертикальные моды-горизонтальные лучи". Это свойство оказывается очень полезным в двух актуальных задачах современной акустики: восстановление объемных неоднородностей океана в задачах томографического типа, в которых для распространения каждой моды строится двумерная карта распространения, и в задачах шумовой интерферометрии (пассивная томография, использующая естественные шумы моря в качестве источника), в которых время накопления сигнала существенно уменьшается в случае использования "двумерных" мод.

Зная модовую структуру волновода, можно восстановить сами параметры волновода, в том

числе его внутренние неоднородности. При этом хорошо известные методы выделения мод, как правило, сводятся к двум подходам: выделение по времени прихода (в том случае, если расстояние между источником и приемником позволяет модам "разбежаться" за счет межмодовой дисперсии) и выделение мод с помощью вертикальной гидроакустической антенны (за счет ортогональности мод по всей глубине волновода).

Однако техническая сложность проведения морских экспериментов привела к тому, что использование модового подхода оказалось возможным только с некоторыми ограничениями, которые не позволяют говорить о математической строгости, но, тем не менее, оставляют работоспособным главное свойство мод, а именно - зависимость параметров распространения от свойств волновода и, следовательно, возможность восстановления параметров волновода. По большому счету, для решения многих задач подводной акустики было бы достаточно использовать любую систему базисных функций, по которой можно удобно и математически экономно разложить (и собрать) распространяющееся поле. Даже ортогональность мод здесь не имеет особого значения, поскольку это свойство оказывается необходимым только в том случае, если обработка сигнала требует применения скалярного произведения, что требуется не всегда.

По указанным причинам частым случаем является использование вертикальных антенн, не перекрывающих весь волновод. Обоснованием здесь является то, что антенна размещается на глубинах, на которых "сосредоточена основная энергия сигнала", что еще можно считать справедливым в случае глубокого океана, если антенна расположена вблизи минимума скорости звука, но это явно не так в случае мелководья, где антенны часто предпочитают развертывать горизонтально.

По-видимому, самым сложным вопросом для постобработки является вопрос об адиабатичности распространяющихся мод. В глубоком океане, где большинство неоднородностей имеют плавные границы, использование адиабатического приближения представляется оправданным. Совсем иная ситуация возникает в мелком море. И хотя, как показало численное моделирование, даже относительно большие неоднородности, например, рельефа, не нарушают адиабатичности распространения мод при условии плавности границы, вероятность распространяюшемуся сигналу "столкнуться" с какой-то "ступенькой" рельефа и тем самым породить или усилить моды иных номеров, в данном случае не может быть сброшена со счетов. Между тем неадиабатическое распространение делает невозможным использование классических схем восстановления параметров морского волновода, так как из принятых данных невозможно понять, где именно произошло неадиабатическое перерождение мод (а оно, в принципе, может происходить и в нескольких точках и даже непрерывно по трассе распространения), а введение того или иного "неадиабатического" базиса (что необходимо на этапе решения задачи томографической инверсии) приведет к появлению фантомных мод, вызванных искусственно на границах базисных элементов.

ВЫДЕЛЕНИЕ МОД МЕЛКОВОДНОГО ВОДОЕМА

В свете сказанного оказывается удобным ввести для мелководного водоема разложение по неким максимально упрощенным "модам" и выяснить, насколько такое разложение окажется адекватным для расчета акустических полей. Алгоритм разложения выглядит следующим образом. В качестве мод выбираются куски функции "синус" (что представляется оправданным в мелком волноводе, который с большой степенью уверенности можно считать изоскоростным).

Эксперимент и последующая обработка осуществлялись следующим образом. В исследуемом водоеме излучается ЛЧМ-посылка частотой от 100 Гц до 10 кГц в течение 10-20 с. Такая посылка содержит все частоты в интересующем диапазоне. В частности, содержатся низкие околокритические частоты первой и, естественно, последующих мод, на которых велико влияние дисперсии, что позволит определить граничные условия, а значит, позволит сделать некоторые выводы о свойствах дна и поверхности; а также высокие частоты, на которых все моды распространяются с одинаковыми скоростями и когерентно накапливаются. Важным достоинством именно ЛЧМ-сигнала является узкая автокорреляционная функция, что, по сути, позволяет рассматривать процесс корреляционной обработки как импульсный отклик волновода, при этом энергия сигнала "размазана" по всей длительности посылки, что позволяет минимизировать воздействие на окружающую среду (в арктическом эксперименте авторы работали в окружении большого количества животных, в том числе краснокнижных) и ослабить требования на работающий в автономном режиме излучатель. Принятый сигнал коррелировался с сигналом-посылкой, полученная корреляционная функция использовалась для последующей обработки. Прием сигналов осуществлялся на разных расстояниях (от 10 до 300 м) от источника, между последующими ЛЧМпосылками принимающий гидрофон перемещался по глубине с шагом 20 см, что позволило синтезировать вертикальную антенну, используя некалиброванный гидрофон. Гидрофон (как и другое использованное оборудование) изготовлен авторами самостоятельно, он состоял из пьезокерамической сферы со встроенными фильтром низких частот (позволяющим избежать перегрузки от скачков гидростатического давления) и предварительным усилителем, позволившим существенно улучшить помехозащищенность принятого сигнала в процессе его передачи на регистрирующее устройство.

Путем согласованной обработки, как это описано в [5], из рассчитанной корреляционной функции происходит выделение первой моды. Строится корреляция модового сигнала данной моды (т.е., как если бы поле состояло только из нее) с исходной посылкой, которая вычитается из полного поля, далее таким же образом происходит выделение второй моды и т.д., пока остаток после выделения всех мод не станет пренебрежимо малым. Если введенные таким образом моды позволят адекватно описать акустическое поле на разных расстояниях и кроме того, определить граничные значения на поверхности и дне, то они выполнят все нужные функции настоящих мод независимо от степени их схожести с "математическими" модами.

ЭКСПЕРИМЕНТ В АРКТИКЕ

Ранее [5–7] авторами была проведена серия экспериментов на подмосковном озере Сима. в ходе которых была апробирована разработанная гидроакустическая аппаратура, отработаны элементы ее развертывания и записи данных, проведено выделение мод описанным алгоритмом. По результатам этих экспериментов было принято решение о проведении натурного эксперимента в арктических условиях. Эксперимент проводился в апреле 2019 г. на Белом море. Излучатель располагался на трети глубины водоема, которая в точке излучения составляла 6 м. Сигнал излучался в сторону открытого моря на береговом клине с постепенным увеличением глубины до 10 м. Толщина льда во время проведения эксперимента составляла 42 сантиметра.

Получено распределение по глубине максимума корреляционной функции, построенной по описанному выше алгоритму, и его аппроксимация первыми двумя модами (см. рис. 1). Обратим внимание на границы волновода. Видно, что на верхней границы наблюдается ненулевое значение амплитуды, что соответствует импедансной границе. Этот результат аналогичен получнному авторами ранее в эксперименте на подмосковном озере Сима. На нижней границе наблюдается максимум амплитуды, что соответствует акустически жесткому дну и кажется правдоподобным по причине выхода коренных пород в месте проведения эксперимента. Этот результат отличается от результата эксперимента в Подмосковье, где дно было акустически мягким из-за наличия газонасыщенного слоя осадков. Данный результат говорит о возможности использования модового



Рис. 1. Распределение по глубине максимума корреляционной функции K_{yx} , пропорционального значению функции отклика водоема, в арктическом эксперименте. Расстояние до источника 10 м. Частотная полоса 150–200 Гц. Экспериментальные значения обозначены звездочками, линией – аппроксимация.

разложения в мелководном волноводе с априорно неизвестными граничными условиями и, более того, о возможности оценки этих граничных условий, что может быть использовано в задачах геоинверсии параметров дна.

В частотной полосе 150–200 Гц было проведено разложение полученного профиля по модам. Хорошей степени соответствия удалось добиться, используя только две моды. Отношение их волновых чисел позволяет предположить, что это первая и вторая моды. Принимая, что дно является акустически жестким, и, зная глубину водоема, равную 6 м при расстоянии 10 м от излучателя, можно рассчитать критическую частоту первой моды (она составляет 62.5 Гц) и критическую частоту второй моды (она составляет 187.5 Гц). В указанном частотном диапазоне распространяться могут только эти две моды, поэтому представленный профиль с хорошей точностью аппроксимируется именно этими двумя модами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом выполненной работы стало экспериментальное подтверждение возможности выделения модовой структуры в условиях арктического шельфа даже при условии наличия ледовой поверхности. Мелководный арктический волновод с большой долей точности может рассматриваться как изоскоростной, что позволяет выделять моды описанным корреляционным способом. Важный результат состоит в том, что характер граничных условий, как правило, неизвестный (и непостоянный), не влияет на процедуру выделения мод, более того, восстанавливается по описанному алгоритму, что может быть использовано для оценки параметров границ, в первую очередь, дна.

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам Беломорской биологической станции МГУ им. М.В. Ломоносова, лично А.Б. Цетлину, А.Г. Семенову, В.П. Сивонен, Е.Д. Красновой. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-05-00737).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г. // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 1. С. 90; Grigor'ev V.A., Lun'kov A.A., Petnikov V.G. // Acoust. Phys. 2015. V. 61. № 1. P. 85.
- Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г. // Учен. зап. физ. фак-та. Моск. ун-та. 2014. № 6. С. 146335.
- Луньков А.А., Петников В.Г. // Акуст. журн. 2015.
 Т. 61. № 6. С. 745; Lunkov А.А., Petnikov V.G., Chernousov A.D. // Acoust. Phys. 2015. V. 61. № 6. Р. 707.
- 4. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
- Дмитриев К.В., Липавский А.С., Панков И.А., Сергеев С.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. С. 1550; Dmitriev K.V., Lipavskiy A.S., Pankov I.A., Sergeev S.N. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 11. Р. 1411.
- Дмитриев К.В., Липавский А.С., Панков И.А., Сергеев С.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 1. С. 81; Dmitriev K.V., Lipavskiy A.S., Pankov I.A., Sergeev S.N., Fadeev E.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 1. Р. 72.
- Дмитриев К.В., Дорофеева А.А., Панков И.А., Сергеев С.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 12. С. 1704; Dmitriev K.V., Dorofeeva А.А., Pankov I.A., Sergeev S.N. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. № 12. Р. 1492.