УДК 534.23

10.25808/24094609.2019.29.3.005

МОДУЛЯЦИЯ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ПОГРАНИЧНЫХ ВОЛН ВНУТРЕННИМИ ВОЛНАМИ В ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЕ ШЕЛЬФ – ГЛУБОКОЕ МОРЕ

Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния внутренних волн на интерференционную структуру звукового поля, сформированного пограничными волнами Рэлея-Шолте в переходной зоне шельф – глубокое море. Это влияние проявляется в периодической модуляции частоты максимума спектральной плотности мощности на сонограммах звукового поля, зарегистрированных комбинированным приемником, в инфразвуковом диапазоне частот, причем амплитуда модуляции пропорциональна частоте. Анализируется зависимость периода модуляции от взаимного расположения приемных модулей, шумящего судна, формирующего звуковое поле дискретными составляющими вально-лопастного звукоряда, и предполагаемого направления распространения внутренних волн. Отмечено, что наибольшее влияние внутренние волны оказывают на структуру вихревой составляющей вектора интенсивности.

введение

Внутренние волны, относящиеся к волнам гравитационного типа, представляют определенный интерес в прикладной гидроакустике благодаря своему влиянию на интерференционную структуру звукового поля. Проблема исследования внутренних волн в современной акустике является самостоятельным научным направлением [1], но в настоящей работе нас интересует исключительно их влияние на интерференционную структуру звукового поля, которое остается основным объектом исследования. Общепризнанным механизмом влияния называют механизм перемешивания водных масс в вертикальном направлении внутренней волной, который существенным образом изменяет профиль скорости звука и, соответственно, набор нормальных волн, формирующих звуковое поле, локализованное преимущественно в звуковых каналах. К таким каналам относятся придонный звуковой канал в мелком море, в котором, как правило, располагается приемная система, и подводный звуковой канал глубокого моря, ось которого близка к горизонту возможного позиционирования шумящего объекта (ШО) и горизонту функционирования приемной системы, установленной на шельфе в придонном звуковом канале. Можно ожидать, что наибольший эффект внутренние волны будут оказывать на звуковое поле, сформированное пограничными волнами Рэлея-Шолте в придонном звуковом канале мелкого моря. Кроме того, внутренние волны могут оказывать существенное влияние и на звуковое поле, сформированное в подводном звуковом канале глубокого моря, ось которого может быть близка к горизонту позиционирования ШО и горизонту функционирования установленной на шельфе приемной системы. В этом случае подводный звуковой канал глубокого моря и придонный звуковой канал в шельфовой зоне образуют акустически связанную систему, наиболее подверженную влиянию внутренних волн. Внутренние волны, распространяясь со стороны глубокого моря в шельфовую зону, могут существенным образом изменять набор нормальных волн, формирующих звуковое поле на трассе распространения ШО – приемная система, интерференционную структуру звукового поля и основной параметр интерференционной структуры, каким является инвариант в определении работы [2]. Принято различать два характерных случая.

В случае если звуковое поле сформировано в однородном волноводе нормальными волнами высшего порядка, то соответствующие интерференционные структуры характеризуются инвариантом,

¹ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: +7 (423) 2432578. E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

принимающим положительные значения, близкие к единице. Это означает, что на сонограмме звукового поля, построенной в координатах частота – расстояние, частота максимума спектральной плотности мощности (СПМ) на изолиниях равной интенсивности (ИРИ) увеличивается с увеличением расстояния и уменьшается с уменьшением расстояния между ШО и приемной системой.

В случае если звуковое поле сформировано нормальными волнами, локализованными в звуковом канале, придонном или подводном канале с заглубленной осью, а также в случае пограничных волн. локализованных на границе раздела вода – морское дно, соответствующие интерференционные структуры характеризуются инвариантом, принимающим отрицательные значения. В акваториях со скальным грунтом к пограничным волнам относятся волны Рэлея-Шолте, для которых инвариант принимает отрицательные значения на частотах, меньших первой критической, т.е. в инфразвуковом диапазоне частот. Это означает, что на сонограмме звукового поля, построенной в координатах частотарасстояние, частота максимума СПМ на изолиниях равной интенсивности (ИРИ) увеличивается с уменьшением расстояния и уменьшается с увеличением расстояния между ШО и приемной системой. Можно также отметить, что на сонограммах звукового поля ИРИ с положительным и отрицательным значением инварианта хорошо различаются визуально [3, 4].

Описание эксперимента

Приемные модули ПМ-2, ПМ-3, оснащенные комбинированными приемниками (КП), были установлены на шельфе на глубине 50 м и разнесены на 8 км в направлении, перпендикулярном береговой черте. Судно проходит между ними в направлении, параллельном береговой черте, причем приемный модуль ПМ-3 расположен относительно трассы движения ШО со стороны глубокого моря при глубине места 120 м, а приемный модуль ПМ-2 расположен относительно трассы движения ШО со стороны берега при глубине места 90 м. Оба приемных модуля уверенно регистрируют дискретные составляющие вально-лопастного звукоряда (ВЛЗР) ШО, формирующие на сонограммах характерные интерференционные структуры типа ИРИ, модулированные неким периодическим процессом. Сама 3D-сонограмма представляет собой звуковой портрет ШО, искаженный его движением и наблюдаемым периодическим процессом. Движение ШО вызывает изменение частоты максимума СПМ на сонограмме, соответствующее изменению расстояния и локальному значению инварианта, зависящему от типа нормальных волн, формирующих звуковое поле.

Наблюдаемый периодический процесс вызывает периодическое изменение частоты максимума СПМ на сонограммах, слабо зависящее от изменения расстояния, которое мало в зоне траверза, причем амплитуда модуляции пропорциональна частоте, а инвариант в результате такой модуляции периодически изменяет знак. С учетом этого с большой вероятностью можно предположить, что причиной модуляции являются внутренние волны, степень влияния которых на звуковое поле растет с ростом частоты [1]. Однако модуляционные эффекты, зарегистрированные приемными модулями ПМ-2, ПМ-3, оказались принципиально различными. Рис. 1, а, б поясняют сонограммы звукового поля для отношения сигнал/ помеха (S/N) на выходе канала звукового давления (параметр А₁) в инфразвуковом диапазоне частот в течение длительного (16-часового) интервала наблюдения. На сонограммах зарегистрирована периодическая структура дискретных составляющих ВЛЗР, состоящая из четырех ИРИ, модулированных периодическим процессом. Периоды модуляции и пространственные периоды соответственно для приемного модуля ПМ-2 существенно больше (примерно в 3-4 раза) соответствующих периодов модуляции для приемного модуля ПМ-3. Для обоих приемных модулей амплитуда модуляции максимальна в районе траверза, которому соответствует интервал времени регистрации 13-14 ч. Все особенности сонограмм и модуляционные эффекты имеют место и по другим информативным параметрам. Полный набор информативных параметров содержит 16 независимых величин А_n, включающих звуковое давление p(z,r), компоненты комплексного вектора интенсивности I(z,r), компоненты вещественного ротора вектора интенсивности rotI(z,r) и компоненты комплексного вектора градиента давления g(z,r), характеризующих звуковое поле в скалярно-векторном описании: $A_1 = p^2$, $A_2 = I_{1x}$, $A_3 = I_{1y}$, $A_4 = I_{1z}$, $A_5 = I_{2x}$, $A_6 = I_{2y}$, $A_{7} = I_{2z}, A_{8} = \operatorname{rot}_{x}I, A_{9} = \operatorname{rot}_{y}I, A_{10} = \operatorname{rot}_{z}I, A_{11} = g_{1x}^{2}, A_{12} = g_{1y}^{2}, A_{13} = g_{1z}^{2}, A_{14} = g_{2x}^{2}, A_{15} = g_{2y}^{2}, A_{16} = g_{2z}^{2}.$ $I = I_{1} + iI_{2}, g = g_{1} + ig_{2}, p = p_{1} + ip_{2}.$

Рис. 2 a, δ поясняют сонограммы звукового поля для отношения сигнал/помеха (S/N) на выходе компаратора, учитывающего влияние всех информативных параметров на результирующее отношение (S/N).



Рис. 1. Сонограмма звукового поля для отношения (S/N) по параметру А₄: а – ПМ-2; б – ПМ-3



Рис. 2. Сонограмма звукового поля для отношения (S/N) на выходе компаратора: а – ПМ-2; б – ПМ-3

Геометрическая трактовка взаимодействия внутренних волн и звуковых волн

Возможное объяснение этому экспериментальному факту может заключаться в следующем. При такой геометрии эксперимента волновой вектор внутренних волн, набегающих со стороны моря, и волновой вектор звуковых волн, возбуждаемых ШО, оказываются встречными для приемного модуля ПМ-3 и однонаправленными для приемного модуля ПМ-2. При мультипликативной (нелинейной) обработке сигналов в пространственном спектре квадратичных по полю величин появляются разностные и суммарные пространственные частоты. По этой причине модуляция частоты максимума СПМ для приемного модуля ПМ-3 описывается суммарными пространственными частотами, а для приемного модуля ПМ-2-разностными пространственными частотами. Это различие в расположении приемных модулей относительно трассы движения ШО проявляется в различном периоде модуляции частоты максимума (СПМ) на соответствующих сонограммах, построенных для приемных модулей ПМ-2, ПМ-3. Формирование разностных пространственных частот, которым соответствуют крупномасштабные интерференционные структуры, можно пояснить в два этапа.

На первом этапе мультипликативной обработки сигналов в пространственном спектре квадратичных по полю величин появляются разностные пространственные частоты с периодом L_{12} :

$$\frac{1}{L_{12}} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}; L_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\left|\lambda_1 - \lambda_2\right|}$$

где λ_1 , λ_2 – длины волн для пограничных волн Рэлея–Шолте на рабочей частоте f (Гц).

Как отмечалось ранее, интерференционные структуры в инфразвуковом диапазоне частот формируются парой пограничных волн Рэлея–Шолте, регулярной и обобщенной. Этим структурам соответствуют изолинии равной интенсивности (ИРИ) на плоскости частота–расстояние (время наблюдения на проходной характеристике) с отрицательным значением инварианта. В отсутствии внутренних волн сонограммы звукового поля на приемных модулях ПМ-2, ПМ-3 имели бы одинаковую структуру. На втором этапе сформированные пространственные структуры модулируются внутренней волной с образованием модуляционных структур с различными периодами модуляции L_{123} СПМ на приемных модулях ПМ-2, ПМ-3:

$$\begin{aligned} \frac{1}{L_{123}} &= \frac{1}{L_{12}} \pm \frac{1}{L_3}, L_{123} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{\left|\lambda_1 - \lambda_2\right| \pm \lambda_1 \lambda_2\right|} = \frac{\lambda_3}{\left|1 \pm \frac{\lambda_3}{\lambda} \frac{\Delta c}{c}\right|}\\ \lambda &= \sqrt{\lambda_1 \lambda_2}, \frac{\Delta c}{c} = \frac{\left|\lambda_1 - \lambda_2\right|}{\lambda}, c = \sqrt{c_1 c_2}, \Delta c = \left|c_1 - c_2\right|, \end{aligned}$$

где λ_3 – длина внутренней волны; c_1 , c_2 – скорости распространения интерферирующих волн, формирующих звуковое поле, знаки ± относятся к модулю ПМ-3 (+) и модулю ПМ-2 (–) соответственно. При выполнении условия:

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\lambda}{\lambda_3}.$$
 (1)

Пространственный период модуляции L_{123} может существенно возрастать, что и наблюдается на сонограммах для приемного модуля ПМ-2.

Для примера возьмем следующие достаточно типичные параметры для данного эксперимента: f = 10 Гц, c = 900м/с, $\lambda = 90$ м, $\lambda_3 = c_3 T_3$, $c_3 = (gh)^{1/2} = 30$ м/с, $T_3 = 60-300$ с, $\lambda_3 = 1800-9000$ м, где g, h – ускорение силы тяжести и глубина места для модуля ПМ-2. Подставляя эти данные в (1), получаем нужную оценку: $\Delta c/c = (5-1)10^{-2}$. Полученные оценки дисперсионной изменчивости фазовой скорости интерферирующих волн Рэлея–Шолте вполне реализуемы при межмодовой ($\Delta c/c = 5*10^{-2}$) или внутримодовой ($\Delta c/c = 10^{-2}$) интерференции, что подтверждается численными оценками дисперсии пограничных волн Рэлея–Шолте, выполненными в работах [3, 4]. Следовательно, приведенное здесь объяснение имеет право на существование. Более тонкие особенности модуляции, связанные, например, с асимметрией модуляционных структур и самих ИРИ относительно точки траверза, связаны, возможно, с асимметрией взаимного расположения интерферирующих волн и особенностей движения самого ШО.

Наличие внутренних волн в шельфовой зоне, переходящей в открытое море, оказывает деструктивное влияние на интерференционные структуры, формируемые в звуковом поле ШО. Это влияние проявляется в том, что интерференционные структуры становятся нестационарными, их инвариантная структура становится знакопеременной, а с повышением частоты сами ИРИ теряют свою структурированность. Усложнение сонограммы и потеря ее структурированности затрудняют проблему обнаружения ШО, снижают эффективность алгоритмов обработки сигналов и помехоустойчивость самой приемной системы. Здесь под помехоустойчивостью КП понимается традиционное ее определение, данное, например, в работе [5]. Рис. 3, а, б поясняют сонограммы для оценки помехоустойчивости приемных модулей ПМ-2, ПМ-3 в инфразвуковом диапазоне частот, оказавшихся в зоне влияния внутренних волн.

Можно отметить, что помехоустойчивость КП заметно снижается до отметки 8–10 дБ в зоне траверза, где влияние внутренних волн на звуковое поле про-



является в наибольшей мере, и увеличивается до отметки 15–20 дБ, но только для отдельных фрагментов времени наблюдения и для отдельных составляющих ВЛЗР, которые и представляют наибольший интерес. Этот интерес связан с тем, что сам экспериментальный факт влияния внутренних волн на звуковое поле и возможность визуализации этого влияния при анализе интерференционной структуры звукового поля и ее инвариантов можно трактовать как новый способ изучения самих внутренних волн, визуализация которых другими способами затруднена или невозможна.

Внутренние волны и вихревые структуры в звуковом поле

Можно ожидать, что внутренние волны, влияющие существенным образом на профиль скорости звука, а через него и на интерференционную структуру звукового поля, оказывают заметное влияние и на энергетическую структуру звукового поля. Характерная особенность энергетической структуры звукового поля в волноводе заключается в том, что вектор интенсивности содержит не только потенциальную составляющую, но и соизмеримую с ней на низких частотах вихревую составляющую. Для оценки влияния внутренних волн на структуру поля вектора интенсивности желательно выбрать такие участки на сонограммах звукового поля, на которых сам КП, как векторный приемник, в наибольшей степени отличается от гидрофона, как скалярного приемника. Сравнительный анализ сонограмм на выходе канала звукового давления и на выходе компаратора показывает, что наибольшие изменения отношения (S/N) имели место в интервале частот 10-15 Гц в интервале времени 13-16 ч для приемного модуля ПМ-2 и в интервале частот 2-10 Гц в интервале времени 22-24 ч для приемного модуля ПМ-3. Проходные характеристики для отношения (S/N) по параметрам А1-А в эти интервалы времени с выборкой максимального отношения (S/N) в заданной полосе частот для приемных модулей ПМ-2, ПМ-3 поясняются рис. 4, 5.

Анализируя проходные характеристики можно отметить, что в выбранном интервале времени доминирующими в поле вектора интенсивности являются горизонтальные компоненты вектора интенсивности. Для приемного модуля ПМ-2 уровень компонент I_x , I_y на 7–11 дБ выше в среднем по трассе уровня вертикальной компоненты I_z . Для приемного модуля ПМ-3, уровень компоненты I_y на 9–12 дБ выше, в среднем по трассе, уровня компонент I_z . Также можно отметить характерную коррелированность



крупномасштабных интерференционных структур в среднем во всех каналах комбинированного приемника и вероятностный характер мелкомасштабной интерференционной структуры, которая сохраняет статистическую независимость в отдельных каналах комбинированного приемника. Как отмечено в работе [6], существенный рост отношения (S/N) в мелкомасштабных интерференционных структурах связан с процессами компенсации векторных потоков мощности в поле помехи, что и отмечено впервые в работе [7]. Однако комбинированный приемник позволяет анализировать не только пространственную структуру вектора интенсивности, но и его вихревую структуру, которая оценивается ротором вектора интенсивности. Как отмечалось в работах [3, 4], роль вихревой составляющей вектора интенсивности в звуковом поле ШО повышается в условиях нерегулярного 3D-волновода в инфразвуковом диапазоне частот. Однако вихревая составляющая вектора интенсивности окажется, возможно, более чувствительной к внутренним волнам.

Пространственная структура ротора вектора интенсивности поясняется рис. 6-8 для выделенных

фрагментов общей сонограммы звукового поля. Анализ сонограмм на рис. 6—8 показывает, что в звуковом поле приемного модуля ПМ-2 вертикальная компонента ротора вектора интенсивности является доминирующей, превышая другие компоненты на 3–5 дБ. Это означает, что вихревые (замкнутые) структуры вектора интенсивности формируются в основном в горизонтальной плоскости.

В звуковом поле приемного модуля ПМ-3 доминирует (х) компонента ротора вектора интенсивности, превышая другие компоненты на 3–5 дБ. Это означает, что вихревые (замкнутые) структуры вектора интенсивности формируются в основном в вертикальной плоскости (у, z). Все названные различия в пространственной структуре вектора интенсивности и его вихревой составляющей для приемных модулей ПМ-2, ПМ-3, могут быть связаны с модуляционными эффектами, крупномасштабными для приемного модуля ПМ-2 и мелкомасштабными для приемного модуля ПМ-3. Например, вполне вероятно, что крупномасштабные интерференционные структуры более чувствительны к горизонтальной нерегулярности волновода, что и приводит к



Рис. 6. Сонограммы звукового поля для отношения (S/N) по параметру А,: а – ПМ-2; б – ПМ-3





Рис. 8. Сонограммы звукового поля для отношения (S/N) по параметру А₁₀: а – ПМ-2; б – ПМ-3

образованию горизонтально ориентированной вихревой составляющей вектора интенсивности. В мелкомасштабных интерференционных структурах более вероятно образование вертикально ориентированной вихревой составляющей вектора интенсивности, связанной с вертикальной неоднородностью волновода и наличием отражающих границ. Отметим для сравнения, что в регулярном волноводе постоянной глубины вихревая составляющая вектора интенсивности в звуковом поле точечного источника ориентирована в вертикальной плоскости (г, z), ротор вектора интенсивности имеет только одну отличную от нуля угловую компоненту, которая лежит в горизонтальной плоскости (х, у), а его вертикальная компонента тождественно равна нулю.

Иначе говоря, внутренние волны существенным образом повлияли на вихревую составляющую вектора интенсивности для приемного модуля ПМ-2 для ИРИ, регистрируемой в зоне траверза, где влияние внутренних волн проявляется в наибольшей степени.

В то же время, влияние внутренних волн на вихревую составляющую вектора интенсивности нивелируется для приемного модуля ПМ-3, но только для ИРИ, регистрируемой вдали от траверза.

Как отмечалось выше, модуляционные эффекты, связанные с внутренними волнами, оказываются разрушительными для всей интерференционной структуры звукового поля, а их деструктивное влияние растет с ростом частоты. Однако для выделенных ранее фрагментов сонограмм сохраняется довольно высокая эффективность предложенных алгоритмов обработки по расширенному набору информативных параметров, оценкой которых и является помехоустойчивость самой приемной системы. На рис. 9, а, б представлены сонограммы для оценки помехоустойчивости приемных модулей ПМ-2, ПМ-3 для выделенных фрагментов времени наблюдения и выделенных фрагментов дискретных составляющих ВЛЗР. Помехоустойчивость КП остается довольно высокой (10-20 дБ) для приемного модуля ПМ-2 и (25-30 дБ)



Рис. 9. Сонограммы для оценки помехоустойчивости КП: а – ПМ-2; б – ПМ-3

для приемного модуля ПМ-3 даже в наихудших условиях наблюдения ШО. Для ее реализации необходимо достаточно большое время регистрации возможно большего набора дискретных составляющих ВЛЗР движущегося ШО, изменение которых за время регистрации должно оставаться коррелированным даже при наличии деструктивных внешних факторов, таких как внутренние волны, что и подтверждается сонограммами на рис. 1, 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ скалярно-векторной структуры звукового поля движущегося источника в нерегулярном 3D-волноводе при наличии внутренних волн. Отмечена модуляция частоты максимума спектральной плотности мощности на сонограммах звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот, а также линейный рост амплитуды модуляции с частотой. В качестве характерной особенности эксперимента отмечен различный характер модуляции на приемных модулях, отличающихся взаимным расположением относительно направления движения источника звуковых волн и предполагаемого направления распространения внутренних волн. Предложена геометрическая трактовка особенностей модуляции, основанная на учете взаимного расположения интерферирующих волновых процессов и направления движения ШО. Выполнен анализ вихревой структуры вектора интенсивности и влияния на нее внутренних волн. Отмечено, что сам комбинированный приемник является эффективным средством изучения и визуализации внутренних волн и их взаимодействия со звуковым полем в наиболее информативном инфразвуковом диапазоне частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сабинин К.Д. Внутренние волны в океане // Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука, 1982. С. 209–226.

2. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане // Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука, 1982. С. 71–91.

3. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Особенности распространения и интерференции нормальных волн в волноводной системе водный слой – морское дно с низкой сдвиговой упругостью // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 25 (1). С. 46–58.

4. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Дисперсионные характеристики нормальных волн в мелком море с учетом сдвиговой упругости морского дна // Гидроакустика. 2018. № 35 (3). С. 57–67.

5. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.

6. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Экспериментальная оценка помехоустойчивости комбинированного приемника в инфразвуковом диапазоне частот // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 38–47.

7. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 308 с.

