УДК 534.23:681.89

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИИ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН В ВОЛНОВОДНОЙ СИСТЕМЕ ВОДНЫЙ СЛОЙ – МОРСКОЕ ДНО С НИЗКОЙ СДВИГОВОЙ УПРУГОСТЬЮ

Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Выполнен расчёт комплексных корней дисперсионного уравнения для нормальных волн в волноводе типа водный слой – твёрдое полупространство осадочного типа для случая, когда скорость сдвиговой волны в полупространстве меньше скорости звука в водном слое. Выполнены расчёты дисперсионных зависимостей для фазовых и групповых скоростей и коэффициентов затухания нормальных волн различного порядка. Особое внимание уделено сопряжённой паре нормальных волн нулевого порядка, которые в предельных случаях низких или высоких частот вырождаются в пограничную волну Рэлея или в пограничные волны Рэлея-Шолте, регулярную и обобщённую соответственно. Рассмотрены варианты практической реализации пограничных волн Рэлея-Шолте в интерференционных структурах, регистрируемых комбинированным приёмником в регулярном и нерегулярном волноводах.

введение

При рассмотрении звуковых полей инфразвукового диапазона в мелком море приходится учитывать сдвиговую упругость донного полупространства и, как следствие, появление пограничных волн Рэлея-Шолте, которые вносят существенный вклад в суммарное звуковое поле. В реальном случае, характерном для большинства прибрежных акваторий шельфовой зоны, скорость сдвиговой волны в твёрдом полупространстве меньше скорости звука в воде, поэтому все нормальные волны высшего порядка (водные моды) оказываются затухающими, а теоретическая оценка коэффициентов затухания становится необходимой для оценки общих потерь на распространение. Сказанное не относится к пограничным волнам Рэлея-Шолте, роль которых существенно повышается, так как для них потери на распространение оказываются минимальными и соответствуют цилиндрической расходимости волнового фронта.

1. Основные соотношения

Для рассмотрения звуковых полей, формируемых нормальными волнами различного типа, как регу-

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

лярными, так и обобщёнными, целесообразно использование несамосопряжённой модельной постановки соответствующей граничной задачи. Впервые обобщённые волны (leakage waves) были введены в решение классической граничной задачи С. Пекерисом, причём термин «обобщённые волны» обозначает решения, продолжение которых в полупространство не удовлетворяет условиям погашаемости на бесконечности. Более подробно решения широкого класса граничных задач с участием обобщённых волн рассмотрены в работе [1]. Для устранения некорректности обобщённых решений в работах [2-4] была сформулирована несамосопряжённая модельная постановка граничных задач в акустике слоистых сред, которая является естественным обобщением самосопряжённой модельной постановки. Более подробно особенности несамосопряжённой модельной постановки будут рассмотрены ниже.

В настоящей работе нас будут интересовать особенности описания пограничных волн и звуковых полей, формируемых с их участием. Для вывода необходимых соотношений воспользуемся импедансным методом, согласно которому условием существования пограничной волны как резонансного явления является условие равенства нулю суммарного входного импеданса сопряжённых сред, приведённого к границе раздела [1]. Для волны Рэлея, возникающей на свободной поверхности твёрдого полупространства, соответствующее характеристическое уравнение имеет вид [1]:

$$Z_{_{BX}} = Z_{_{L}} + Z_{_{t}} = 0,$$

$$Z_{_{L}} = \omega \rho (2x - 1)^{2} / k_{_{3L}},$$

$$Z_{_{t}} = -4\omega \rho x (x - 1) / k_{_{3t}},$$
 (1)

$$k_{_{3L}}^{2} = k_{_{L}}^{2} - \xi^{2}, k_{_{3t}}^{2} = k_{_{t}}^{2} - \xi^{2},$$

$$k_{_{L}} = \frac{\omega}{c_{_{L}}}, k_{_{t}} = \frac{\omega}{c_{_{t}}} x = (\xi / k_{_{t}})^{2},$$

где Z_{ву} – входной импеданс твёрдого полупространства; ω , ρ – круговая частота и плотность; $c_1, c_2 - c_3$ рости продольных и поперечных волн в твёрдом полупространстве соответственно; ξ – постоянная распространения; с_в – скорость волны Рэлея. Уравнение (1) имеет решение в классе неоднородных расходящихся волн, амплитуда которых экспоненциально убывает при удалении от свободной поверхности (x > 1). Будем называть такое решение регулярной волной R-типа. Для волны Шолте, возникающей на границе раздела жидкого и твёрдого полупространств, соответствующее характеристическое уравнение имеет вид [1]:

$$Z_{\text{BX},2} + Z_{\text{BX},1} = 0.$$

$$Z_{\text{BX},1} = \omega \rho_1 / k_{31}, k_{31}^2 = k_1^2 - \xi^2, \quad (2)$$

$$k_1 = \omega / c_1, c_{11} = c_1 / c_1, \quad \rho_{12} = \frac{\rho_1}{\rho_2},$$

где $Z_{\text{вх,1}}$, $Z_{\text{вх,2}}$ – входной импеданс жидкого и твёрдого полупространств, ρ_1 , ρ_2 – плотность жидкого и твёрдого полупространств, с₁ – скорость звука в жидком полупространстве.

Среди корней характеристического уравнения (2) при всех параметрах сопряжённых сред существует один корень, соответствующий условию x > 1 и определяющий скорость регулярной волны Шолте сШ1 R-типа. Кроме решения, определяющего скорость регулярной волны Шолте, уравнение (2) имеет обобщённые решения, которым соответствуют обобщённые волны Шолте Lt-типа или L-типа. Обобщённая волна Шолте Lt-типа состоит из трёх неоднородных волн, расходящейся волны в жидкой среде, амплитуда которой экспоненциально убывает при удалении от границы раздела, расходящихся волн в твёрдой среде, продольной и поперечной, амплитуда которых экспоненциально растёт при удалении от гра-

ницы раздела. Обобщённая волна Шолте L-типа состоит из трёх неоднородных волн, расходящейся волны в жидкой среде, расходящейся поперечной волны в твёрдой среде, амплитуда которых экспоненциально убывает при удалении от границы раздела, расходящейся продольной волны в твёрдой среде, амплитуда которой экспоненциально растёт при удалении от границы раздела. Для волны Рэлея-Шолте, возникающей на границе раздела жидкого слоя со свободной поверхностью и твёрдого полупространства, соответствующее характеристическое (дисперсионное) уравнение имеет вид [1]:

$$\begin{split} & Z_{_{BX,2}} + Z_{_{BX,1}} = 0. \\ & Z_{_{BX,1}} = i\omega\rho_1 tg(k_{_{31}}h)/k_{_{31}}, \end{split} \tag{3}$$

где h – толщина жидкого слоя, x = $(\xi/k_t)^2 = (c_t/c_{Rm})^2 = x(c_{tL}, c_{t1}, \rho_{12}, k_1h), c_{Rm}$ – скорость волны c_{tL} Рэлея–Шолте.

Среди корней характеристического (дисперсионного) уравнения (3) при всех параметрах сопряжённых сред существуют два корня, которым соответствуют две нормальные волны, не имеющие критической частоты. В предельном случае низких частот $k_1h << 1$ эти волны вырождаются в волну Рэлея, а в предельном случае $k_1h >> 1$ эти волны вырождаются в пограничные волны Шолте, регулярную волну R-типа и обобщённую Lt-типа [1].

Дисперсионные зависимости для фазовых (1, 3) и групповых (2, 4) скоростей регулярной волны Рэлея– Шолте R-типа и обобщённой волны Рэлея–Шолте Lt-типа соответственно поясняются рис. 1. В расчётах приняты следующие значения параметров сопряжённых сред [5]: $\rho_{12} = \rho_1 / \rho_2 = 1/2, 2, c_L = 2300 \text{ м/c},$ $c_1 = 1500 \text{ м/c}, c_t = 885 \text{ м/c}.$ Характер дисперсионных зависимостей для волн Рэлея–Шолте таков, что в области частот, меньших первой



Рис. 1. Дисперсионные зависимости для фазовых и групповых скоростей регулярной волны Рэлея–Шолте R-типа (1, 2) и обобщённой волны Рэлея–Шолте Lt-типа (3, 4) – а; частотная зависимость инварианта – б

критической, с увеличением частоты фазовая и групповая скорости одновременно уменьшаются или одновременно увеличиваются. Это означает, что в низкочастотном звуковом поле, сформированном преимущественно волнами Рэлея-Шолте, инвариант пространственно-частотной интерференционной структуры $\beta = -dc_{\phi,n}^{-1} / dc_{r,n}^{-1}$ будет отрицательным [6], что подтверждается рис. 1, б, на котором представлены практически совпадающие частотные зависимости инварианта для регулярной волны Рэлея-Шолте R-типа (красный цвет) и обобщённой волны Рэлея-Шолте Lt-типа (синий цвет).

2. Физическая трактовка обобщённых решений

Понятно, что в предложенной трактовке обобщённых решений сами обобщённые волны Рэлея-Шолте не удовлетворяют условиям погашаемости на бесконечности как содержащие одну или две составляющие, амплитуда которых экспоненциально растёт на бесконечности. Несамосопряжённая модельная постановка соответствующих граничных задач позволяет обойти эту некорректность обобщённых решений. Физической основой несамосопряжённой модельной постановки является гипотеза о возможной трансформации расходящихся

неоднородных волн в сходящиеся волны отдачи при отражении от импедансной границы раздела с одновременным изменением знака вертикального волнового числа. Поскольку для неоднородной волны вертикальное волновое число является чисто мнимым, то такая операция означает переход к комплексно-сопряжённому решению как в описании вертикальной структуры обобщённой волны, так и в описании волновой функции. Присутствие в суммарном решении собственных функций двух сопряжённых операторов как раз и означает переход к несамосопряжённой модельной постановке. В классическом решении, построенном в самосопряжённой модельной постановке, суммарное решение содержит собственные функции только одного, самосопряжённого оператора, описывающего соответствующую граничную задачу. Однако простота самосопряжённого решения не всегда соответствует физической природе исследуемого явления.

Построенное обобщённое решение не является локально непрерывным по давлению (нормальному напряжению) и нормальной компоненте вектора колебательной скорости, но непрерывно по нормальному импедансу, определённому через отношение интегральных величин, таких как сила и объём-

ная колебательная скорость. Сами интегральные величины определяются через локальные величины, такие как давление (нормальное напряжение) и нормальная компонента вектора колебательной скорости, операцией интегрирования по поверхности, размер которой должен быть достаточно большим по сравнению с длиной волны. Поясним непрерывность обобщённого решения по импедансу на примере его определения на границе раздела жидкого и твёрдого полупространств. При непрерывном продолжении регулярного решения по давлению p(h, r) (нормальному напряжению) и нормальной компоненте вектора колебательной скорости $\vartheta_{(h, r)}$ входной импеданс определяется отношением соответствующих локальных (точечных) величин:

При разрывном продолжении обобщённого решения по давлению (нормальному напряжению) и нормальной компоненте

$$Z_{BX} = \frac{p(h,r)}{\vartheta_{Z}(h,k_{3L},k_{3t},r)} =$$

= $\frac{p(h)H_{0}^{(2)}(\xi r)}{\vartheta_{Z}(h,k_{3L},k_{3t})H_{0}^{(2)}(\xi r)} =$
= $\frac{p(h)}{\vartheta_{Z}(h,k_{3L},k_{3t})} = Z_{L} + Z_{t}$

вектора колебательной скорости входной импеданс следует определить отношением соответствующих интегральных величин, определяющих силу и объёмную колебательную скорость, которые, в отличие от локальных (точечных) величин, имеют реальный физический смысл:

$$\left\langle Z_{BX} \right\rangle_{Lt} = \frac{\int_{0}^{R} p(h,r)rdr}{\int_{0}^{R} \vartheta_{Z}(h,k_{3L}^{*},k_{3t}^{*},r)rdr} = \frac{p(h)\int_{0}^{R} H_{0}^{(2)}(\xi r)rdr}{-\vartheta_{Z}(h,k_{3L},k_{3t})\int_{0}^{R} H_{0}^{(1)}(\xi^{*}r)rdr} = \frac{p(h)}{\vartheta_{Z}(h,k_{3L},k_{3t})} = Z_{L} + Z_{t}$$

$$\frac{\int_{0}^{R} H_{0}^{(2)}(\xi r)rdr}{\int_{0}^{R} H_{0}^{(1)}(\xi^{*}r)rdr} = -1; \quad \xi R >> 1,$$

$$Im \xi < 0; Im k_{3L} < 0; Rek_{3L} = 0;$$

$$Im k_{3t} < 0; Rek_{3t} = 0.$$

Иначе говоря, входной импеданс полупространства, который является нечётной функцией вертикальных волновых чисел k_{3L} и k₃, остаётся неизменным при изменении вертикальных волновых чисел на сопряжённые значения и одновременном изменении расходящейся волны на сходящуюся волну отдачи в описании неоднородной волны в твёрдом полупространстве.

Другая особенность обобщённых решений заключается в появлении на горизонте трансформации (на границе раздела или на горизонте источника) вертикальной компоненты вектора интенсивности, которая является знакопеременной величиной с периодом $\lambda/2$ (λ – длина волны). Такой источник, названный в работе [4] вихревым осциллятором, является, по существу, виртуальным, мощность которого равна нулю. Его описание соответствует известному в математике понятию поверхностной δ(x)-функции. По этой причине разрывность обобщённого решения следует считать допустимой как не нарушающей закон сохранения энергии.

Однако в слоистой среде он может возбуждать новые формы волнового движения, содержащие пространственно разделённые встречные потоки мощности, для которых суммарная мощность будет отлична от нуля. Математическое описание таких обобшённых форм волнового движения в волноводе Пекериса дано в работах [2-4] на примере решения соответствующей граничной задачи для волновода Пекериса в несамосопряжённой модельной постановке. В этом решении обобщённая волна возбуждается на горизонте источника комплексным угловым спектром точечного источника. Обобщённые формы волнового движения могут возбуждаться в слоистой среде либо точечным модельным источником (монополем) - его комплексным угловым спектром, либо вертикальным диполем. Поскольку реальный источник всегда содержит составляющие - мультиполи, то математическое описание решений соответствующих граничных задач должно предусматривать появление обобщённых решений, построенных в более общей несамосопряжённой модельной постановке. На рис. 2, а, в представлены схематически функции поперечного сечения для регулярной волны Рэлея–Шолте ($\xi = \omega/c_{\text{RIIII}}$) при различных способах возбуждения. Источник расположен на торизонте z_0 в волноводе типа жидкий слой – твёрдое полупространство. Рис. 2, *а* поясняет структуру регулярной волны Рэлея–Шолте, для которой выполняются локальные условия непрерывности на границе раздела.

На рис. 2, б, в поясняется структура регулярных волн Рэлея-Шолте, для которых на границе раздела и на горизонте источника выполняются только условия непрерывности по импедансу, а на самих горизонтах трансформации генерируется вихревая составляющая вектора интенсивности с периодом $\lambda/2$. Из этих двух форм волнового движения, которые отличаются только направлением распространения отдельных составляющих суммарного волнового движения, реализуется та, для которой суммарный горизонтальный поток мощности оказывается положительно определённым.

На рис. 3, *а*, *в* представлены схематически функции поперечного сечения для обобщённой волны Рэлея-Шолте Lt-типа ($\xi = \omega/c_{RII2}$) при различных способах возбуждения. Вариант 3, *а* реализуется при расположении источника на границе раздела, которая является горизонтом трансформации. Варианты 3, *б*, *в* отличаются только направлением распространения отдельных составляющих суммарного волнового движения, а реализуется та форма, для которой суммарный горизонтальный



Рис. 2. Структура функций поперечного сечения для регулярной волны Рэлея–Шолте при различных способах её возбуждения



Рис. 3. Структура функций поперечного сечения для обобщённой волны Рэлея–Шолте Lt-типа при различных способах её возбуждения

поток мощности оказывается положительно определённым. Для этих вариантов горизонт источника является горизонтом трансформации. На всех горизонтах трансформации генерируется мелкомасштабная (с периодом λ/2) вихревая составляющая вектора интенсивности.

Локальная разрывность обобщённого решения либо на границе раздела, либо на горизонте источника приводит к образованию особой структуры звукового поля на самом горизонте скачка давления и нормальной компоненты вектора колебательной скорости в силу трансформации расходящейся волны в сходящуюся волну отдачи. Структура такой гибридной волны в окрестности горизонта трансформации (горизонта источника) поясняется рис. 4. Интерференционное взаимодействие двух встречных волн в окрестности горизонта источника приводит к формированию вихревой составляющей вектора интенсивности. В свою очередь, вихревая составляющая формирует периодическую структуру узловых точек, в окрестности которых давление равно нулю, и седловых точек, в окрестности которых вектор интенсивности равен нулю [7-8]. Такие локальные (точечные) особенности названы в этих работах дислокациями фазового фронта, нарушающими фазовую структуру звукового поля. В окрестности дислокаций фаза звуковой волны может изменяться на 360°, становясь, фактически, неопределённой.

Сама вихревая составляющая в окрестности седловых точек реализует проникновение сходящейся волны отдачи в область определения расходящейся волны (z < h) и расходящейся волны в область определения сходящейся волны отдачи (z > h), формируя тем самым гибридную волну во всей области определения. В отличие от модельной стоячей волны, формируемой в свободном пространстве, с нулевым горизонтальным потоком мощности, обобщённая гибридная волна представляет собой слоистую (по вертикальной координате) структуру чередующихся расходящихся волн и сходящихся волн отдачи, в которой в соответствии с граничными условиями формируется отличный от нуля горизонтальный поток мощности.

Расчёт корней дисперсионного уравнения (3) в общем случае представляет определённые труд-

ности, так как все корни, соответствующие нормальным волнам высшего порядка, являются комплексными, а сами нормальные волны являются вытекающими. Кроме того, дисперсионное уравнение содержит два радикала, которым соответствуют четыре комбинации знаков и соответственно четыре типа нормальных волн. В методическом плане полезно выполнить расчёт корней в два этапа. Первый из них является аналогом известного в акустике скалярного приближения (приближения волновода Пекериса с жидким полупространством), но учитывает реальные потери на распространение, связанные с излучением в полупространство поперечных волн. Дисперсионные характеристики для нормальных волн высшего порядка, вычисленные на первом этапе, поясняются рис. 5, 6 для четырёх пар нормальных волн. Дисперсионные характеристики нормальных волн, вычисленные на первом этапе, подобны соответствующим характеристикам нормальных волн волновода Пекериса. Как и в случае волновода Пекериса, все нормальные волны высшего порядка зарождаются на критических частотах, которые являются частотами кратного резонанса:

$$(k_{_{31}}h)_{_n} = \pi(2n-1)/2,$$

 $(k_{_1}h)_{_{KP, n}} = \pi(2n+1)/2(1-c_{_{1L}}^2)^{1/2},$
 $c_{_{1L}} = c_{_1}/c_{_L}, n = 1,2,3$ и т.д.



Рис. 4. Лучевая трактовка обобщённой (гибридной) волны и вихревых структур в окрестности горизонта трансформации



Рис. 5. Дисперсионные зависимости для фазовых скоростей первых четырёх пар нормальных волн (R + Lt)-типа

Однако в отличие от нормальных волн волновода Пекериса на критических частотах зарождается не одна пара волн, а две пары, которые формально отличаются способом продолжения функции поперечного сечения в донное полупространство. В каждой паре волн одна из них зарождается слабо затухающей, а другая – сильно затухающей нормальной волной, но с ростом частоты дисперсионные характеристики сближаются.

В одном случае в каждой паре волн одна из волн продолжается в полупространство как регулярная волна R-типа, а другая волна продолжается как обобщённая волна Lt-типа, образуя совместно комбинационную волну (R+Lt)-типа.

В другом случае в каждой паре волн одна из волн продолжается в полупространство как обобщённая волна L-типа, а другая – как обобщённая волна t-типа, образуя совместно комбинационную волну (L+t)-типа. Анализ дисперсионных характеристик комбинационных волн (R+Lt)-типа и (L+t)-типа показывает их полное сходство несмотря на различный способ продолжения функций поперечного сечения в полупространство. Иначе говоря, комбинационные волны этих двух типов являются вырожденными в рассматриваемом случае, когда скорость поперечной волны меньше скорости звука в волноводе, однако этот вывод не является тривиальным. Вырождение снимается в случае, когда скорость поперечной волны больше скорости звука в волноводе. В этом случае, который подробно исследован в работе [1], четыре типа нормальных волн существуют как независимые типы волнового движения, а каждому типу нормальных волн соответствуют различные дисперсионные характеристики.

Отметим основные особенности звукового поля, формируемого в волноводе нормальными волнами высшего порядка.

1. Звуковое поле в волноводе описывается затухающими однородными волнами (быстрыми волнами), скорость распространения которых больше или равна скорости звука в водном слое. Морское дно в этом случае играет роль поглощающего полупространства, звуковое поле в котором вырождается в систему затухающих стоячих волн, образованных комбинационными волнами (R+Lt)-типа и (L+t)-типа, которые оказываются вырожденными в рассматриваемом случае морского дна с низкой сдвиговой упругостью. В модельном плане морское дно в этом случае заменяют обычно на эквивалентное жидкое полупростран-



Рис. 6. Частотная зависимость коэффициентов затухания для первых четырёх пар нормальных волн (R + Lt)-типа

ство, как это сделано в модельном волноводе Пекериса.

2. На критических частотах фазовая скорость всех нормальных волн высшего порядка равна скорости продольной волны в твёрдом полупространстве. В предельном случае высоких частот (больших значений частотного параметра) фазовые скорости всех нормальных волн высшего порядка стремятся к скорости звука в водном слое. Это означает, что само звуковое поле вблизи морского дна должно вырождаться вследствие эффекта мягкого экрана, который имеет место при малых углах скольжения в волноводе Пекериса.

3. Коэффициенты затухания для нормальных волн различного порядка в скалярном приближении могут быть рассчитаны исходя из реальной сдвиговой упругости осадочных слоёв, заданной в модельном описании скоростью поперечной волны, ответственной за отбор энергии из волновода. Очевидно также, что с ростом сдвиговой упругости осадочных пород коэффициенты затухания и потери на распространение нормальных волн высшего порядка будут увеличиваться, что приведёт к ослаблению звукового поля в волноводе и усилению роли незатухающих пограничных волн Рэлея-Шолте, локализованных на границе раздела вода – морское дно. Можно также отметить, что при любом значении сдвиговой упругости в осадочных породах, слагающих морское дно, в окрестности критических частот существуют окна прозрачности, в пределах которых коэффициенты затухания для нормальных волн высшего порядка оказываются минимальными.

4. Поскольку реальные осадочные породы, слагающие морское дно, всегда обладают сдвиговой упругостью, скалярное приближение может оказаться полезным как уточняющее модель Пекериса учётом реальных потерь на распространение, связанных с возбуждением поперечных волн в осадочных породах морского дна.

На втором этапе, который поясняется рис. 1-3, учёт сдвиговой упругости донного полупространства приводит к появлению медленных (неоднородных) незатухающих пограничных волн, локализованных вблизи границы раздела вода – донное полупространство. В предельном случае низких частот в волноводе возбуждается дважды вырожденная пограничная волна Рэлея, которая с ростом частоты расщепляется на пару волн, одна из которых является регулярной волной Рэлея-Шолте R-типа, а другая является обобщённой волной Рэлея-Шолте Lt-типа. Учёт медленных нормальных волн усиливает ту часть звукового поля, которая локализована вблизи границы раздела вода – морское дно и снимает эффект вырождения звукового поля на границе раздела, отмеченный выше. Как следствие, повышает роль гидроакустических приёмных систем, расположенных вблизи морского дна. Этот важный фактор должен учитываться при планировании и проведении экспериментальных работ в морских акваториях со скальным грунтом.

3. Экспериментальные результаты

Теоретическому и экспериментальному исследованию пограничных волн Рэлея-Шолте посвяшено достаточно большое количество работ, краткий обзор которых приведён в работе [1]. Наиболее интересна, на наш взгляд, работа [9], в которой экспериментально подтверждён факт существования обобщённых волн Шолте Ltтипа и L-типа. В этой работе для возбуждения волн Шолте различного типа использовался источник силы дипольного типа, а тип волны определялся параметрами сопряжённых сред. В работах [10-11] описаны эксперименты, в которых для возбуждения волн Шолте также использован импульсный источник силы дипольного типа, расположенный на границе раздела вода – морское дно осадочного типа в глубоком море. В каждой из этих работ приведён импульсный отклик среды, содержащий пару волновых пакетов, распространяющихся с близкими, но разными скоростями, которые соответствуют двум волнам Шолте, регулярной и обобщённой. Эти эксперименты наглядно подтверждают парное возбуждение волн Шолте, регулярной и обобщённой, скорости которых близки, причём наименьшая скорость соответствует регулярной волне Шолте. Более подробно зависимость скорости распространения волн Шолте от параметров сопряжённых сред исследована в работе [1].

При возбуждении звукового поля в мелком море (волноводе) широкополосным источником на низких частотах, меньших первой критической, звуковое поле формируется пограничными волнами Рэлея-Шолте, регулярной и обобщённой, а на высоких частотах – нормальными волнами высшего порядка (водными модами). Эти звуковые поля, условно говоря, низкочастотное и высокочастотное, отличаются значением инварианта пространственно-частной интерференционной структуры [6]. Для низкочастотного звукового поля инвариант принимает отрицательные значения в соответствии с характером изменения фазовой и групповой скорости на дисперсионных зависимостях. Численные оценки инварианта могут сильно варьироваться при изменении параметров среды и условий распространения [6]. Для высокочастотного звукового поля инвариант принимает положительные значения, близкие к единице.

На рис. 7 приведена 3D-сонограмма для суммарного звукового поля (сигнал плюс помеха) в координатах: частота – время наблюдения – уровень (дБ). Звуковое поле сформировано движущимся судном в мелком море глубиной 80-100 м со скальным грунтом, а приёмный модуль, оснащённый комбинированным приёмником (КП), располагался на срединной глубине. Две структуры изолиний равной интенсивности (ИРИ), которым соответствуют различные инварианты пространственночастотной интерференционной структуры звукового поля, хорошо видны на сонограмме. В диапазоне частот, больших 50 Гц, звуковое поле сформировано в основном нормальными волнами высшего порядка (водными модами). Инвариант пространственно-частотной интерференционной структуры принимает значение, близкое к единице, которое характерно для звукового поля однородного волновода. В этом случае изолинии имеют вид гипербол положительной кривизны, ветви которых направлены вверх в точке траверза. Такой вид изолиний означает, что частота, соответствующая максимуму интенсивности на изолиниях,



Рис. 7. Сонограмма суммарного звукового поля (S + N), создаваемого движущимся судном, в окрестности траверзной точки t = 4 ч 50 мин

уменьшается при уменьшении расстояния между источником и приёмной системой и увеличивается при увеличении этого расстояния. Низкочастотная часть звукового поля сформирована пограничными волнами Рэлея-Шолте, регулярной и обобщённой, которые не имеют критической частоты. Для этой части звукового поля инвариант пространственно-частотной интерференционной структуры является отрицательным, а его численные оценки изменяются в пределах от -0,5 до -3. Структура звукового поля такова, что ИРИ имеют вид гипербол отрицательной кривизны с вершиной вверху в точке траверза. Это означает, что частота, соответствующая максимуму интенсивности на изолиниях, увеличивается при уменьшении расстояния между источником и приёмной системой и уменьшается при увеличении расстояния. Как правило, подобные структуры характерны для звукового поля, локализованного в подводных звуковых каналах, в которых фазовая и групповая скорости принимают минимальное значение на оси канала, а при увеличении угла скольжения одновременно увеличиваются [6]. На сонограмме эти два семейства изолиний хорошо разделены и соответствуют условному делению звукового поля на низкочастотное

звуковое поле, сформированное инфразвуковыми частотами вально-лопастного звукоряда (ВЛЗР), и высокочастотное звуковое поле, сформированное звуковыми частотами шумов обтекания.

На рис. 8 поясняется 3D-сонограмма для отношения сигнал/ помеха (S/N) в том же звуковом поле. Такая нормировка значительно сокращает динамический диапазон регистрируемых сигналов и соответственно повышает различимость слабых сигналов на фоне помехи. На рис. 9 приведены сонограммы для оценки помехоустойчивости комбинированного приёмника в инфразвуковом диапазоне частот по дискретным составляющим ВЛЗР и по сплошному спектру шумов обтекания по алгоритмам обработки 5-I, 5-D, которые подробно поясняются в работах [13-14].

При использовании алгоритма 5-І под помехой понимается средний поток мощности в поле помехи. При использовании алгоритма 5-D под помехой понимается дисперсия этого потока. Как отмечалось ранее, алгоритм 5-I даёт заниженную оценку помехоустойчивости, а алгоритм 5-D даёт завышенную оценку помехоустойчивости, но усреднённые оценки, вычисленные по этим алгоритмам, достаточно близки.



Рис. 8. Сонограмма для отношения сигнал/помеха (S/N) в звуковом поле движущегося судна в окрестности траверзной точки t = 4 ч 50 мин

На рис. 10, а, б приведены проходные характеристики с различным временем усреднением для квадрата звукового давления и компонент вектора интенсивности на частоте 9 Гц, соответствующей одной из дискретных составляющих ВЛЗР движущегося судна. Красный цвет соответствует суммарному процессу сигнал плюс помеха, синий цвет соответствует помехе. Векторные величины отображены с учётом знака, т.е. для положительных потоков мощности соответствующие логарифмические уровни, будучи всегда положительно определёнными, откладывались на графике в сторону положительных значений, а для отрицательных потоков мощности соответствующие уровни откладывались на графике в сторону отрицательных значений. На рисунках указаны также средние по трассе значения отношения сигнал/помеха (S/N).

На проходных характеристиках в горизонтальных векторных каналах хорошо видна мелкомасштабная вихревая (знакопеременная) составляющая (MBC) вектора интенсивности, которая генерируется на горизонтах трансформации и является характерным признаком обобщённых решений. Как правило, вихревая составляющая вектора интенсивности становится



Рис. 9. Сонограммы для оценки помехоустойчивости комбинированного приёмника: а – алгоритм обработки 5-1; б – алгоритм обработки 5-D

доминирующей в зонах интерференционных минимумов звукового давления, в которых минимизируется потенциальная составляющая вектора интенсивности. Её пространственный период соответствует половине длины волны (как в стоячей волне), а сама вихревая структура сохраняется и при достаточно большом времени усреднения. Сам факт локальной инверсии горизонтальных потоков мощности, связанный с наличием вихревой составляющей, впервые зафиксирован экспериментально в работе [12]. В вертикальном канале доминирует составляющая вектора интенсивности, направленная от морского дна в сторону приёмника, что косвенно подтверждает преимущественную генерацию регулярной волны Рэлея–Шолте на границе раздела вода – морское дно, как это показано на рис. 2, *а*.



a – 50 c, 0



Рис. 11. Сонограмма для отношения (S/N) в звуковом поле, сформированном в нерегулярном волноводе движущимся судном, в диапазоне частот ВЛЗР

Наличие мелкомасштабной (с периодом $\lambda/2$) вихревой составляющей вектора интенсивности во всех векторных каналах косвенно подтверждает генерацию обобщённой волны Рэлея–Шолте Lt-типа на горизонте источника, как это показано на рис. 3, б, в.

На рис. 11 поясняется 3D-сонограмма для отношения (S/N) в звуковом поле, которое сформировано движущимся судном в нерегулярном волноводе дискретными составляющими ВЛЗР. В этом эксперименте судно неоднократно переходило из мелкого моря глубиной 100–150 м в глубокое море глубиной 1500–2200 м и обратно на протяжении 17-часового интервала наблюдения, а приёмный модуль, оснащённый комбинированным приёмником, располагался в мелком море в 10 м от дна. Можно отметить сложную картину ИРИ, в формировании которых принимают участие как пограничные волны Рэлея-Шолте, так и водные моды высших номеров, набор которых существенно изменяется при изменении глубины моря. Подобные по сложности картины ИРИ, в формировании которых одновременно участвуют группы нормальных волн с отрицательным, положительным и нулевым значением инварианта, отмечены, например, в работе [1], в которой рассмотрены типы ИРИ в звуковых полях, сформированных мультипольными источниками различного порядка

в однородном регулярном волноводе. Можно также отметить существенное усложнение картины ИРИ в сравнении, например, с рис. 7, обусловленное сильной пространственно-частотной изменчивостью звукового поля, сформированного дискретными составляющими ВЛЗР, в нерегулярном волноводе. На рис. 12 поясняется сонограмма для оценки помехоустойчивости комбинированного приёмника в диапазоне инфразвуковых частот ВЛЗР по двум алгоритмам обработки, которые подробно рассматриваются в работах [13-14].

4. К оценке потенциальной помехоустойчивости комбинированного приёмника в инфразвуковом диапазоне частот

Экспериментальные оценки помехоустойчивости комбинированного приёмника в реальных условиях его эксплуатации отличаются большим разбросом численных значений, а потому всегда находятся в сфере повышенного внимания профессионалов, как это отмечалось в обзорном плане в работах [13–14].

При оценке помехоустойчивости приёмной системы, состоящей из приёмников звукового давления (гидрофонов), предполагается



Рис. 12. Сонограммы для оценки помехоустойчивости КП: а – по алгоритму 5-I, б – по алгоритму 5-D

использование алгоритмов когерентной обработки и алгоритмов некогерентного накопления (усреднения квадрата звукового давления). Алгоритмы когерентной обработки сводятся к формированию характеристики направленности приёмной системы, содержащей М приёмных элементов, а их вклад в помехоустойчивость оценивается коэффициентом концентрации приёмной системы. Понятно, что когерентная обработка уменьшает уровень помехи на выходе приёмной системы за счёт её пространственной избирательности в предположении, что помеха является изотропной. Однако коэффициент концентрации приёмной системы невозможно корректно определить в условиях мелкого моря, а дисперсионные свойства звукового поля в мелком море заведомо уменьшают его оценку.

Алгоритмы некогерентной обработки сводятся к уменьшению дисперсии помехи, а не её уровня, а их вклад в повышение помехоустойчивости пропорционален корню квадратному из коэффициента сложности обрабатываемого сигнала K = T Δ f, (T – время усреднения, Δf – полоса частот отдельного частотного канала) в предположении, что полезный сигнал является стационарным, близким к детерминированному. Нормировка сигнала на дисперсию помехи в определении помехоустойчивости приёмной системы (и в алгоритмах обработки) позволяет регистрировать сигналы, уровень которых меньше уровня помехи, но больше дисперсии помехи.

Комбинированный приёмник, являясь точечным приёмником, обладает направленностью дипольного приёмника в каждом векторном канале. Кроме того, он позволяет анализировать не один информативный параметр (квадрат звукового давления), а целое множество, которое входит в скалярное, векторное и тензорное описание звукового поля. Для оценки потенциальной помехоустойчивости комбинированного приёмника с учётом увеличения числа информативных параметров на выходе приёмной системы можно использовать приближённую, но физически прозрачную формулу, которая не противоречит традиционным определениям, приведённым в сравнительном плане в работах [13–14]:

$$\Pi = 10\log(M) + 10\log(Q) + + 5\log(T\Delta f) + \Delta \Pi_1 - \Delta \Pi_2,$$

где М – число независимых информативных параметров, Q - коэффициент концентрации приёмной системы в каждом пространственном канале, $\Delta \Pi_1$ – дополнительный выигрыш в помехоустойчивости за счёт усреднения изотропной (знакопеременной) составляющей помехи в векторных каналах, ΔΠ₂ – проигрыш в помехоустойчивости за счёт усреднения вихревой (знакопеременной) составляющей полезного сигнала в векторных каналах. По данным работы [15], дополнительный выигрыш $\Delta \Pi_1$ в поле частично изотропной помехи может составлять 5-7 дБ, но уменьшается с ростом анизотропии поля помехи, например, за счёт помех ближнего судоходства. Возможный проигрыш $\Delta \Pi_2$ связан с усреднением не только помехи, но и вихревой составляющей сигнала, роль которой повышается в инфразвуковом диапазоне частот. Он фактически компенсирует и делает невозможным рост помехоустойчивости с увеличением времени усреднения Т свыше 40-60 с, как это показано экспериментально в работе [16].

При оценке максимального числа информативных параметров, которые могут быть сформированы на выходе устройства первичной спектральной обработки всей скалярно-векторной информации, необходимо учесть следующие факторы:

 вектор интенсивности в мелком море содержит потенциальную и вихревую векторные составляющие, которые являются независимыми;

 потенциальная составляющая вектора интенсивности, являясь комплексной величиной, характеризуется шестью независимыми скалярными величинами;

 вихревая составляющая вектора интенсивности однозначно определяет ротор вектора интенсивности, который, являясь вещественной антисимметричной частью тензора второго ранга (тензора пространственной деформации поля вектора интенсивности), характеризуется тремя независимыми скалярными величинами;

 скалярная интенсивность, или квадрат звукового давления, характеризуется одной независимой от остальных скалярной величиной;

- общее число информативных параметров, которые можно сформировать по результатам первичной спектральной обработки на выходе компаратора, равно 10, а соответствующая им помехоустойчивость комбинированного приёмника может быть увеличена до 10 дБ (в сравнении с одиночным гидрофоном). К этой оценке нужно добавить 3-5 дБ за счёт пространственной избирательности векторных каналов с дипольной характеристикой направленности. Приведённые выше оценки помехоустойчивости при М = 7 неплохо соответствуют формуле (4).

Дальнейшее увеличение числа независимых информативных параметров возможно либо за счёт увеличения числа пространственных каналов с повышенной, в сравнении с дипольной, направленностью, либо за счёт вторичной спектральной обработки сформированных потоков мощности в каналах комбинированного приёмника. В работе [17] приведены алгоритмы формирования восьми пространственных каналов в горизонтальной плоскости и двух пространственных каналов в вертикальной плоскости, каждый из которых обладает односторонней направленностью. Увеличение числа пространственных каналов в три раза по сравнению с исходными тремя векторными каналами позволит увеличить в три раза число независимых информативных параметров и, в соответствии с формулой (4), увеличить помехоустойчивость комбинированного приёмника ещё на 5дБ. Аналогичным образом можно прогнозировать увеличение помехоустойчивости комбинированного приёмника за счёт применения алгоритмов вторичной обработки.

Физической основой алгоритмов вторичной спектральной обработки является факт наличия периодических составляющих в пространственной структуре потоков мощности, которые формируются за счёт межмодовой интерференции в виде ИРИ. Такие периодические структуры оказываются хорошо сформированными в сплошном спектре шумов обтекания движущегося судна в звуковом диапазоне частот, как это поясняется рис. 7-8. Двумерный спектральный анализ периодических структур на плоскости частота-расстояние (время наблюдения) был разработан в пионерных работах [18–19], а оценка соответствующего выигрыша в помехоустойчивости по результатам модельного эксперимента, данная в работе [20], может составлять 20-25 дБ.

Другим примером периодических структур является мелкомасштабная вихревая составляющая вектора интенсивности, которая формируется на горизонтах трансформации расходящейся волны в сходящуюся волну отдачи. Мелкомасштабные вихревые структуры являются обязательным элементом суммарного звукового поля мелкого моря, сформированного пограничными волнами Рэлея-Шолте, регулярной и обобщённой, в инфразвуковом диапазоне частот, и обобщёнными волнами высшего порядка в звуковом диапазоне частот. Они формируются либо на горизонте источника, либо на границе раздела вода – морское дно, а их уровень растёт по мере приближения горизонта источника к границе раздела.

Примеры вторичной обработки и их экспериментальная проверка с оценкой выигрыша в помехоустойчивости приведены в работе [14] для отдельных спектральных составляющих рабочего диапазона частот. Оценка лополнительного увеличения помехоустойчивости комбинированного приёмника за счёт алгоритмов вторичной обработки, по данным работы [14], может составлять от 10 до 15 дБ. Эти оценки ниже оценок, полученных ранее в работе [20] с использованием двумерного спектрального анализа. Однако вторичная обработка с использованием двумерного спектрального анализа резко увеличивает нагрузку на компьютер, если проводить её в широкой полосе рабочих частот приёмной системы. В этом смысле одномерный вторичный спектральный анализ гораздо проще в практической реализации и в меньшей степени увеличивает нагрузку на компьютер, что особенно важно при обработке всей информации в широкой полосе частот в режиме реального времени. Кроме того, геометрия интерференционных структур в инфразвуковом диапазоне частот, формируемых в условиях нерегулярного волновода в звуковом

поле реального источника, сильно усложняется, как это хорошо видно на рис. 11 в сравнении с рис. 7. Реальные интерференционные структуры принципиально отличаются от модельных структур, сформированных модельным широкополосным источником в модельном волноводе, для которых инвариант принимает постоянное значение, близкое к единице. Можно ожидать, что это неизбежно приведёт к уменьшению выигрыша в помехоустойчивости от применения алгоритмов вторичного спектрального анализа, и в первую очередь от применения алгоритмов двумерного спектрального анализа как более сложного в практической реализации и более критичного к нерегулярной интерференционной структуре звукового поля.

выводы

При возбуждении низкочастотных звуковых полей в мелководных акваториях со скальным грунтом пограничные волны Рэлея-Шолте играют важную роль, так как для них потери на распространение являются минимальными. В зависимости от способа возбуждения эти волны могут быть локализованы либо на границе раздела вода – морское дно, либо на горизонте источника. В исследованном случае, когда скорость звука в морской среде занимает промежуточное значение между скоростью поперечной и продольной волн в скальном грунте, регулярная волна Рэлея-Шолте всегла лополняется обобщённой волной Рэлея-Шолте. Интерференционное взаимодействие волн Рэлея-Шолте проявляется в инвариантной структуре звукового поля и соответственно в характерной структуре ИРИ.

В звуковом поле широкополосного движущегося источника инвариантная структура проявляется различным образом. Для низкочастотной части звукового поля инфразвукового диапазона, которая формируется пограничными волнами Рэлея-Шолте, регулярной и обобщённой, инвариант принимает отрицательные значения. Для высокочастотной части звукового поля звукового диапазона, которая формируется в основном нормальными волнами высшего порядка (водными модами), инвариант принимает положительные значения, близкие к единице, которые характерны для звукового поля в однородном волноводе. В нерегулярном волноводе картина ИРИ существенно усложняется совместным участием групп нормальных волн, которым соответствуют положительные, отрицательные и нулевые значения инварианта, что в совокупности нивелирует инвариантные свойства самого звукового поля.

В несамосопряжённой модельной постановке соответствующих граничных задач обобщённые волны трактуются как гибридные

волны, содержащие в своём составе как расходящиеся волны, так и сходящиеся волны отдачи, условно разделённые горизонтом трансформации. На самом горизонте трансформации генерируется MBC с периодом $\lambda/2$, которая является характерным признаком обобщённых волн [4] и показателем «завихрённости» поля вектора интенсивности. Роль МВС существенно усиливается в нерегулярном волноводе, в котором звуковое поле, сформированное дискретными составляющими ВЛЗР, обладает значительной пространственно-частотной изменчивостью.

Получены оценки помехоустойчивости комбинированного приёмника в инфразвуковом диапазоне частот в условиях нерегулярного волновода, которые составляют 10-14 дБ. Эти оценки несколько ниже ранее полученных экспериментальных оценок в [13, 14] из-за сильной пространственно-частотной изменчивости звукового поля в нерегулярном волноводе. Тем не менее они также свидетельствуют о перспективности использования КП в проблеме обнаружения малошумных источников по дискретным составляющим ВЛЗР в сложнейших условиях формирования звукового поля в нерегулярном волноводе с доминирующим участием пограничных волн Рэлея-Шолте.

Обоснована технология увеличения потенциальной помехоустойчивости комбинированного приёмника с использованием методов первичной спектральной обработки экспериментальных данных с расширенным набором информативных параметров и расширенным набором пространственных каналов, а также с использованием методов вторичной спектральной обработки потоков мощности во всех сформированных пространственных каналах.

Авторы выражают признательность сотрудникам ИПМТ ДВО РАН, которые участвовали в морских работах, упомянутых выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. М.: Наука, 2009. 406 с.

- 2. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Модельные задачи в акустике слоистых сред. Владивосток: Дальнаука, 2012. 256 с.
- 3. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Медленные обобщённые волны и генерация вихревых структур в акустике слоистых сред // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 2 (16). С. 37-51.

4. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Косарев Г.В. Вихревой осциллятор в волноводе Пекериса // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 1 (21). С. 46-55.

5. Свининников А.И. Петрофизика западной части Тихого океана и окраинных морей востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2004. 278 с. 6. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане: Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука, 1982. С. 71–91.

7. Жуков А.Н., Иванников А.Н., Кравченко Д.И., Павлов В.И. Особенности тонкой энергетической структуры звукового поля // Акуст. журнал. 1989. Т. 35, вып. 4. С. 634-638.

8. Журавлёв В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Потоки энергии в окрестности дислокаций фазового фронта // ЖЭТФ. 1993. Т. 104, вып. 5 (11). С. 3769-3783.

9. Padilla F., de Billy M., Quentin G. Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the fluid - sound velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. Vol. 106 (2). P. 666-673.

10. Ali H.B., Bibee L.D. The influence of sediment layering and geoacoustics on the propagation of Sholte interface waves // Proc. OCEANS-93. Vol. 1. P. 105-113.

11. Broadhead M.R., Ali H.B., Bibee L.D. Sholte waves attenuation estimates from two diverse test sites // Proc. OCEANS-93. Vol. 1. Р. 114–118. 12. Щуров В.А., Ляшков А.С., Щеглов С.Г., Ткаченко Е.С., Иванова Г.Ф., Черкасов А.В. Локальная структура интерференционного поля мелкого моря // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1 (17). С. 58-67

13. Злобин Д.В., Злобина Н.В., Касаткин Б.А., Касаткин С.Б., Косарев Г.В. Некоторые результаты исследований скалярно-векторной структуры звуковых полей в инфразвуковом диапазоне частот // Гидроакустика. 2017. Вып. 31 (3). С. 65–78. 14. Касаткин Б.А., Злобина Н В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Косарев Г.В. Оценка помехоустойчивости комбинированного приёмника в зву-

ковом поле мелкого моря // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 2 (24). С. 41–51.

15. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., и др. Экспериментальные и теоретические исследования скалярно-векторной структуры звуковых полей в заливе Посьета // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1 (19). С. 40–51.

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

17. Касаткин Б.А., Злобина Н В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Моделирование направленных свойств комбинированного приёмника при смешанных алгоритмах обработки сигналов // Тр. 6-й Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток, 2015. С. 171–175. 18. Интерференция широкополосного звука в океане: сб. науч. тр. / ИПФ АН СССР. М., 1984. 133 с.

19. Орлов Е.Ф., Шаронов Г.А. Интерференция звуковых волн в океане. Владивосток: Дальнаука, 1998. 195 с.

Срядов Е.Ф., Наронов Г.Н. Интерференция звуковых воли в океане. Бладносток, далынаука, 1996. 195 с.
 Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.П. Помехоустойчивое обнаружение, одновременная оценка расстояния и радиальной скорости цели в пассивном режиме // Гидроакустика. 2017. Вып. 31 (3). С. 23–37.