ностью в определении параметров. Сопоставление трехканальной системы определения угловых координат на основе многоканального приемника скорости с системой на основе использования как каналов скорости, так и звукового давления демонстрирует преимущество последней, работающей по алгоритму метода максимального правдоподобия.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Лебединцев С. Н., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.//Вопросы судостроения, сер. акуст. 1977. № 8. С. [143. [2] Виноградов Н. С., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1976. 17, № 5. С. 573. [3] Виноградов Н. С., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.//Там же. 1977. 18, № 6. С. 57. [4] Виноградов Н. С., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.//Там же. 1978. 19, № 5. С. 73. [5] Виноградов Н. С., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.//Там же. 1978. 19, № 5. С. 73. [5] Виноградов Н. С., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.// Ивопросы судостроения, сер. общетехн. 1979. 46. С. 3. [6] Кравчун П. Н., Пестов К. А., Тонаканов О. С.//Акуст. журн. 1992. 38, № 5. С. 886. [7] Урик Дж.: Основы гидроакустики. М., 1978. [8] Буров В. А., Дмитриев О. В.//Раднотехн. и электроника. 1973. 18, № 6. С. 1276. [9] Фалькович С. Е. Оценка параметров сигнала. М., 1970. [10] Акустика океана/Под ред. Л. М. Бреховских. М., 1974. [11] Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы: М., 1983.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 6

УДК-534.322:551.463.228

ВЕКТОРНО-ФАЗОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ Полеи

В. А. Гордиенко, Б. И. Гончаренко

Обсуждается подход к решению акустических задач, основанный на получении дополнительной информации о поле при заданных пространственно-временных объемах выборок посредством помещения в ограниченном числе точек среды наряду с приемниками звукового давления также приемников первого и более высоких порядков, позволяющих определять градменты и биградненты звукового давления, колебательную скорость частиц среды в акустической волне и т. д. Показано, что в случае одиночной комбинированной приемной системы имеет место качественный скачок — возможность определения направления на источник звука. Рассматривается подход к описанию векторно-фазовой структуры акустических полей сигналов и шумов в океане, а также некоторые возможности его использования для решения прикладных задач.

1. Введение

Известно, что повышение эффективности акустических систем различного назначения связано с улучшением отношения сигнал/помеха. Один из путей (прямой) развития акустических средств связан с

дальнейшим усовершенствованием алгоритмов обработки сигналов. – Другой путь заключается в разработке и реализации технических

решений, основанных на регистрации новых физических явлений. Есть и третий путь получения дополнительной информации о поле при заданных пространственно-временных объемах выборок (не ис-

ключающий, перечисленные выше), о котором в основном и пойдет речь в данной работе. Он может быть реализован посредством помещения в ограниченном числе точек среды наряду с приемниками звукового давления-также приемников первого и более высоких порядков, позволяющих определять градиенты и биградиенты звукового давления, колебательную скорость частиц среды в акустической волне и т. д.

Начало этим исследованиям в нашей стране было положено работами С. Н. Ржевкина [1].

Основная особенность такого подхода заключается в возможности восстановления пространственной структуры сигнала по измерениям поля в точке (вместо построения пространственных решеток) посредством разложения звукового давления P(r) в ряд Тейлора с центром в точке r_0 [2]:

$P(r) = P(r_0) + (\Delta r \cdot \nabla P)|_{r_0} + (1/2) (\Delta r \cdot \nabla)^2 P|_{r_0} + \dots$

Комбинация фурье-преобразования в пространственной области и разложения в ряд Тейлора существейно сокращает число точек, в которых располагаются приемники звука при достижении заданной точности восстановления пространственного спектра. Последнее наиболее актуально при создании низкочастотных дискретных антенных решеток.

Такой подход обсуждался подробно, например, в работе [3].

Реализация описанных подходов привела к введению в практику гидроакустических измерений и акустические приборы приемников градиента давления в одно-, двух- и трехкомпонентном вариантах (векторный приемник).

Преимущества комбинированных приемных систем, включающих векторные приемники, по сравнению с традиционными, построенными на базе приемников давления, растут по мере уменьшения количества приемных модулей и размеров области пространства для размещения их в среде.

В случае одиночной комбинированной приемной системы имеет место качественный скачок — возможность определения направления на источник звука (в ряде случаев — его глубины и местоположения). Пример пространственной фильтрации акустического поля в океане с помощью такой приемной системы приведен на рис. 1.

Другая ее особенность — возможность прямого измерения потока акустической мощности, т. е. выделения той части энергии, которая обусловлена анизотропией поля или наличием в среде сосредоточенных источников. За счет этого в ряде случаев обеспечивается увеличение отношения сигнал/помеха на 10—40 дБ.

- Кроме того, одновременная регистрация нескольких компонент поля без амплитудно-фазовых искажений позволяет анализировать характер движения частиц среды в волне (так называемый «поляризационный» анализ волн) с целью их дальнейшей классификации (использование векторных приемников в качестве геофонов).

2. Основы концепции векторно-фазовых методов

Как известно, в основе исходного описания волнового движения в жидкой и газообразной среде (как частного случая гидродинамики) лежит пространственно-временное распределение вектора колебательной скорости V и скалярного звукового давления P.

Классический метод теоретической трактовки свойств акустического поля базируется на введении потенциала скоростей $\Phi(r, t)$. [4]:

(1)

Далее полагается, что поле давления записывается в виде $P(r, t) = -\rho \partial \Phi / \partial t$, а траектория движения частиц среды в волне, по крайней мере в дальнем поле излучателя, соответствует локально плоской волне. Отсюда следует, что пространственно-временные распределения ве-

94

 $V = -\operatorname{grad} \Phi$.



Рис. 1. Пример пространственного фаспределения вектора потока акустической мощности в одном из районов Тихого океана: спектральный уровень поля давления в зависимости от частоты (a) и нормированная на максимальное значение интенсивность плотности потока акустической мощности W в зависимости от азимутального угла φ при угловом разрешении $\Delta \varphi = 1^{\circ}$ в полосе частот 100—1000 Гц (6), 580—620 Гц (в и г. в разных масштабах по осн ординат): 1 — «изотропная» составляющая акустического поля, 2 — тональвый сосредоточенный источник частотой 600 Гц на расстоянии около 100 миль (отношение сигнал/помеха на выходе приемника звукового давления —15 дВ), 3 — широкополосный сигнал от судна-постановщика приемной системы, находящегося в режиме тишины (отношение сигнал/помеха на выходе приемника звукового давления —15...—20 дВ), 4 — неотождествленные анизотропные составляющие шумов океана. -личин $\Phi(r, t)$ и P(r, t) однозначно связаны друг с другом с точностью до комплексного множителя. Поэтому, измеряя P(r, t), легко восстановить потенциал $\Phi(r, t)$ и далее рассчитать любые параметры сигнала.

Однако если воспользоваться для сведения исходного волнового уравнения для Ф к уравнению Гельмгольца подстановкой

$\Phi = A(r) \cdot \cos(\omega t) + B(r) \cdot \sin(\omega t),$

то оказывается, что траектории частиц среды в звуковом поле в общем случае должны иметь эллиптическую форму, так что вопрос об адекватности восстановления Φ по измерениям P(r, t) остается открытым (см. также [5]).

Есть и другой аспект проблемы.

Введение потенциала скоростей $\Phi(r, t)$ в виде (1) позволяет из бесконечного множества решений волнового уравнения рассматривать только те, которые соответствуют безвихревым движениям жидкости (т. е. для которых rot V=rot (grad Φ)=0). Последнее не всегда справедливо для низких звуковых частот, инфразвука, а также при проведении акустических измерений звукоприемниками конечных размеров в движущихся средах (ветер, приливно-отливные течения, буксируемые акустические системы).

Общее решение для вектора V, в соответствии с теоремой Гельмгольца, можно выразить через скалярный Ф и векторный Ψ потенциалы:

 $(2)^{\cdot}$

(3)

$V = - \operatorname{grad} \Phi + \operatorname{rot} \Psi$.

Таким образом, для восстановления поля необходимо ориентироваться на одновременное независимое измерение мянимум двух (по числу восстанавливаемых параметров) характеристик акустического поля. Для этих целей, исходя из общих гидродинамических соображений [6], удобно выбрать звуковое давление и колебательную скорость.

Подход к решению акустических задач, не накладывающий обязательных условий потенциальности на поле и основанный на одновременной, регистрации в фиксированных точках пространства поля давления и его градиента (или колебательной скорости), мы назвали концепцией векторно-фазовых методов.

3. Тензор плотности энергии акустического поля

Введем четырехмерный вектор-столбец $\mathbf{P} = \{\rho c V_x, \rho c V_y, \rho c V_z, P\}$. Очевидно, что для любой частоты $f = \omega/2\pi$ отличным от нуля за время т, кратное или существенно большее периода T = 1/f, является второй момент компонент P_i , или среднее значение измеряемой величины на выходе квадратичного детектора.

Запишем выражение для вторых моментов вектора Р стандартным образом в матричном представлении вида [7]:

$$R = (\mathbf{P} \cdot (\mathbf{P}^t)^*)/20c^2,$$

где символ «*t*» означает транспонирование, а «***» — комплексно сопряженную величину. Тогда имеем для элементов матрицы «мгновенных» отсчетов

$$R_{nm} = (\mathbf{P}_n \cdot \mathbf{P}_m^*)/(2\rho c^2) = \text{Re}(R_{nm}) + i \text{Im}(R_{nm}).$$

Нетрудно показать, что матрица R_{nm} является эрмитовым тензором, элементы которого представляют собой математическое ожидание (ковариацию) произведения двух центрированных величин. Элементы R_{nm} имеют размерность плотности энергии, а cR_{nm} — плотности потока акустической мощности. Разумно назвать R_{nm} тензором плотности энергии акустического поля. Переопределим его так, чтобы среднеквадратичные значения были вещественны. Для этого введем два действительных тензора:

$$S^{(c)} = (R+R^*)/2$$
 и $S^{(n)} = -i(R-R^*)/2$,

так что
$$R = (S^{(c)} + jS^{(n)})$$

Симметричные члены $S_{nm}^{(c)}$ определяют когерентную (активную), а антисимметричные $S_{nm}^{(n)}$ — некогерентную (реактивную) составляющие функции плотности энергии соответствующих пар. компонент акустического поля. Разложение ковариации по частотам называют функцией плотности взаимного спектра $S_{nm}(\omega)$. Элементы матрицы $cS_{4m}^{(c)} \equiv W_{Rm}$ ($m \neq 4$) носят название проекций плотности интенсивности потока акустической мощности на направление *m*. Элементы $cS_{4m}^{(n)} \equiv W_{Im}$ соответствуют компонентам *x*, *y* и *z* реактивной плотности акустической энергии.

При анализе различных помеховых ситуаций более удобно бывает пользоваться коэффициентом взаимной корреляции и функцией когерентности (модуль безразмерного взаимного спектра), которые мы определим через введенные выше элементы матрицы следующим образом:

$$\rho_{nm} = S_{nm}^{(c)} / (\sqrt{R_{nm}R_{mn}}); \quad \rho_{nm}^{*} = S_{nm}^{(n)} / (\sqrt{R_{nm}R_{mn}}).$$
$$\gamma_{nm}(\omega) = \left[\frac{S_{nm}^{(c)}(\omega)^{2} + S_{mn}^{(n)}(\omega)^{2}}{S_{nn}^{c}(\omega) S_{mm}^{c}(\omega)}\right]^{1/4}.$$

Для описания шумового поля в настоящее время предложены и используются три акустические модели. Обычно это совокупность точечных взаимно некоррелированных источников, расположенных с равномерной плотностью в горизонтальной плоскости (модель поверхностного шума [8, 9]), в объеме или на поверхности сферы радиуса a, в центре которой находится приемная система (модель объемного шума [8]), или вдоль горизонтальной линии (модель береговой линии [9]). В последних двух случаях каждый источник обладает характеристикой направленности вида $g_i(\alpha) = \cos^n \alpha$ в вертикальной (поверхностный щум) или горизонтальной (береговой прибой) плоскости.

Проводя энергетическое суммирование вкладов отдельных источников для поверхностного шума и однородной безграничной среды и усредняя за время T, существенно большее периода колебаний, имеем-(здесь и далее для удобства сравнения будем считать, что проекции колебательной скорости выражены в эквивалентных единицах звукового давления путем формального домножения их на волновое сопротивление среды, т. е. $V_i \Rightarrow \rho c V_i$)

$$P^2/V_z^2 = P^2/V_y^2 = 2(n+1); P^2/V_z^2 = (n+1)/n.$$

(5)

97

(4)

Аналогично для модели изотропного шума $P^2/V_r^2=3$. Для модели шума берегового прибоя при $g(\varphi, \vartheta)=1$

$$P^2/V_x^2 \approx P^2/V_y^2 = 2 - O(h/r),$$

где O(h/r) — небольшая поправка, определяемая величиной отношения глубины h погружения приемной системы к расстоянию r до шумящей линии.

Для удаленных источников, энергия которых преимущественно приходит с горизонтальных направлений (например, шумы дальнего судоходства), характерны соотношения [2]

$$P^2/(V_x^2 + V_y^2) \approx 1; P^2/V_z^2 \gg 15 - 30$$
 дБ.

 При наличии на акватории удаленных в направлении r сосредоточенных источников

(6)

$$P^2/V_r^2 = 1,0 - 1,05$$
, или 0-0,5 дБ,

 $\Delta \varphi_n \leqslant 4 - 5^\circ$

(здесь $\Delta \phi_{pr}$ — разность фаз между компонентами поля *P* и *V_r*). Во всех перечисленных случаях выполняется условие

$$P^{2}/(V_{x}^{2}+V_{y}^{2}+V_{z}^{2})=1.$$
 (7)

Невыполнение условия (7) свидетельствует либо о наличии полей неволнового происхождения (шумы обтекания, турбулентные пульсации и пр.), либо о работе в ближнем поле источников.

Соотношения (6) были неоднократно проверены в условиях закрытых водоемов и открытого океана вдали от судоходных трасс, причем наблюдаемые значения отношений P^2/V_i^2 соответствовали значениям $n \approx 0.9 - 1.1$.

Всякое отличие отношений *P/V* от приводимых значений свидетельствует о наличии посторонних источников на акватории.

Существенно, что около 90% энергии поля, генерируемой взволнованной поверхностью, определяется ограниченным участком близлежащей поверхности. Шумы дальнего судоходства приходят преимущественно с горизонтальных направлений [2]. В соответствии с (7) вертикальный канал векторного приемника защищен от шумов дальнего судоходства, так что в случае отсутствия судов и других источников в непосредственной близости от приемной системы канал V_z дает информацию об истинном значении уровня поверхностных шумов. Если обозначить уровни звукового давления, генерируемого взволнованной поверхностью, P_s^2 , а P_g^2 — аналогичные уровни шумов, приходящие из дальней зоны, тогда их относительный вклад можно оценить, исходя из измеренных значений P^2/V_z^2 :

$$P_g^2/P_s^2 \approx (P^2/V_z^2) n/(n+1) - 1.$$
 (8)

Из других, полученных нами наиболее важных результатов расчетов шумового поля, генерируемого взволнованной поверхностью, в описанных выше модельных представлениях отметим, что при наличии импедансного дна на глубине H с коэффициентом отражения $V(f, \vartheta)$ в широких пределах их изменения, при выполнении условия $kd_z > 3$ (k — волновое число, d_z — глубина погружения приемной системы) зависимости отношений P^2/V_i^2 от частоты не наблюдается.

Результат также слабо зависит от фактора фокусировки и отра-



Рис. 2. Характерные отношения P^2/V^2 для трех районов Тихого океана с различным типом гидрологии: $1 - P^2/V^2_x$, $2 - P^2/V^2_y$, $3 - P^2/V^2_x$. На рисунке в сплошная линия 3 соответствует волнению 0-1 балл, штриховая - 4-5 баллов

жающих свойств грунта, поэтому сохраняет свои численные значения и в вертикально стратифицированном океане.

Кроме того, при времени задержки $\tau=0$ для измерений, выполненных в одной точке акустического поля, коэффициент корреляции ρ_{xy} взаимно ортогональных каналов V_x и V_y так же как и ρ_{px} , и ρ_{py} в среднем равен нулю.

Коэффициент взаимной корреляции оре в общем случае отличен от нуля, а величина его зависит от глубины погружения приемной системы и акустических параметров дна, изменяясь примерно от 0,96 для глубокой воды без выраженной вертикальной стратификации до 0,1-0,3.

На рис. 2 приведены экспериментально определенные отношения $P^2/V_{x_2}^2 P^2/V_g^2$ и P^2/V_z^2 для трех глубоководных, удаленных от судоходных трасс районов океана. Первый район (рис. 2, *a*) характеризуется

 $\mathbf{g}\mathbf{g}$

гидрологией с выраженным звуковым каналом на глубине 100—300 м (рис. 2, z). Во втором районе (рис. 2, δ) звуковой канал располагался не выше 1100—1200 м (рис. 2, ∂). Третий район (рис. 2, s) вблизи фронтальной зоны представлял двумерно стратифицированный океан с устойчивым в пространстве и времени каналом, фрагмент вертикального сечения которого изображен на рис. 2, e.

Для первых двух районов в области частот выше 200—300 Гц наблюдаемые на глубине порядка 100 м значения отношений $P^2/V_x^2 \approx \approx P^2/V_y^2 = 5 - 7$ дБ и $P^2/V_z^2 = 2 - 4$ дБ свидетельствуют о том, что основная энергия звукового поля формируется близлежащими участками поверхности.

Наиболее существенные отличия наблюдались для третьего района. Вплоть до частот порядка 1 кГц основная часть энергии приходит с горизонтальных направлений. В соответствии с (8) доля этой энергии по отношению к уровню звукового давления, генерируемого собственно взволнованной поверхностью, составляет $P_g^2/P_f^2=3-5$. Похожая картина наблюдается и вблизи судоходных трасс.

5. Некоторые аспекты классификации акустических источников по измерениям векторно-фазовых жарактеристик поля в точке

Описанный подход позволяет классифицировать акустическое поле по крайней мере по трем типам:

диффузное поле, у которого $R_{n_4} = 0; \langle \rho_{ij} \rangle = \langle \rho_{ij}^* \rangle = \gamma_{ij} = 0;$

поле стоячих волн:
$$\rho_{n4} = 0$$
; $\rho_{n4}^* = \mp 1$; $\gamma_{n4} = 1$;

анизотропное (когерентное) поле: $\rho_{n4} = \mp 1$; $\rho_{n4}^* = 0$; $\gamma_{n4} = 1$.

В ближнем поле излучателя всегда существует реактивная плотность акустической энергии, так что отношение $P^2/(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)$ всегда меньше единицы, а разность фаз $\Delta \varphi_{pv}$ между P и V отличается от нуля.

В общем случае для источника мультипольности L на основании линеаризованных уравнений гидродинамики, следуя [10], можно записать

$$W_{Rt}/W_{Lt} = \operatorname{tg} \Delta \varphi_{nv} = -(k^{2})^{2L+1}/\{(L+1)[(2L+1)!!]\}.$$
(9)

Соотношение (9) может быть использовано для простейшей классификации источников по типу: монополь, диполь, квадруполь и т. п. С наибольшей достоверностью о типе источника можно судить по измерениям в интервале значений $0,2 \ll kr \ll 2,5$.

6. Определение характеристик направленности излучателей • по измерениям в ближней зоне

Если имеется система источников звука, локализованных внутри некоторой области V, ограниченной замкнутой поверхностью S, то давление в точке M, расположенной вне этой поверхности, выражается интегральной теоремой Гельмгольца:

$$\dot{P}(M) = \oint_{S} \left\{ P(N) \frac{\partial G(N)}{\partial n} - \frac{\partial P(N)}{\partial n} G(N) \right\} dS.$$
(10)

Здесь N — точки, принадлежащие замкнутой поверхности S, P(N) и $\partial P/\partial n$ — комплексные значения соответственно давления и его нормальной производной в точке N, G(N) — функция Грина [2].

Использование векторного приемника позволяет определять характеристику направленности излучателя, не прибегая к приближениям, связанным с необходимостью вычисления члена, содержащего величину $\partial P/\partial n$ на контрольной поверхности, в уравнении (10). Кроме того, способ характеризуется более высокой точностью измерений и является помехозащищенным, так как при его реализации наличие посторонних источников звука и отражений от границ водоемов несущественно.

7. Некоторые замечания об определении производительности сосредоточенных источников

С переходом на низкие частоты здесь возникают практически те же проблемы, что и при определении характеристик направленности.

В этой связи заслуживают внимания методы, основанные на теореме Остроградского—Гаусса, которую применительно к акустике можно сформулировать следующим образом:

поток вектора акустической мощности через любую замкнутую поверхность S пропорционален сумме квадратов производительностей источников, заключенных внутри нее.

Вопросы определения производительности источников подробно обсуждались в работах Л. Н. Захарова и частично включены в монографию [2]. Поэтому для целостности изложения отметим лишь основные моменты.

Если работы проводятся в мелком слое с плоскопараллельными границами, в качестве поверхности интегрирования S удобно использовать цилиндрическую радиуса *a*, ось которой проходит через источник, а верхнее и нижнее основания совпадают с верхней и нижней границами слоя [2, 11].

Для монополей (каковыми часто и бывают сосредоточенные низкочастотные излучатели) для сокращения объема измерений удобно перейти к измерению потока в двух диаметрально противоположных относительно излучателя точках [12].

Подбирая при неработающем излучателе коэффициент α таким образом, чтобы $W_1 - \alpha W_2 = 0$ ($W_1 -$ проекция потока акустической мощности от помехи в первой точке и W_2 — во второй), имеем в режиме приема сигнала от калибруемого излучателя

 $W = (1 + \alpha) W_R$

Поскольку а известно, вычисление уровня потока мощности сигнала на фоне помехи не представляет труда.

8. Векторно-фазовые методы изучения отражающих свойств дна водоема

Рассмотрим основные из этих методов на примере плоского дна. 1°. Импедансный метод. Входной импеданс грунта для слоистого дна определяется из известной рекуррентной формулы [13] через плотность ρ_n слоя грунта с номером n, скорость звука в нем c_n , толщину этого слоя h_n , угол ϑ падения акустической волны на дно водоема и $Z_0 = \rho c$ — волновое сопротивление водной среды.

При использовании векторного приемника входной импеданс может быть определен путем измерений давления и вертикальной компо-

ненты колебательной скорости в одной точке на границе «вода-грунт»

(11)

$$Z_{\rm in} = \frac{P}{V_z} \Big|_{z=h}$$

Далее рассчитываются в модельных представлениях параметры слоев грунта.

Недостатком метода импеданса является необходимость знания точного положения эффективной отражающей поверхности, которое не всегда совпадает с реальным дном водоема.

2°. Измерение разности фаз между давлением и компонентой колебательной скорости. Принципиально таким методом можно определить параметры грунта в любых условиях, для которых возможно найти связь между горизонтальной или вертикальной составляющей колебательной скорости V и звуковым давлением P.

а) Гори́зонтальная составляющая. В случае акустически «мягкого» грунта ($c_1 \ll 0, 1 - 0, 4$ с) выражение для потенциала скоростей можно записать в виде

$$\Phi = -\frac{2\pi j}{H} \sum_{n=1}^{m} H_0^{(2)}(m_n r) \sin(l_n d_z) \cdot \sin(l_n z_n), \qquad (12)$$

где $H_0^{(2)}$ — функция Ханкеля нулевого порядка второго рода, H — глубина слоя, d_z — глубина погружения излучателя, z_n — глубина погружения приемника, r — расстояние от излучателя до приемника, n номер моды, m_n и L_n — соответственно комплексные горизонтальная и вертикальная составляющие волнового вектора k в слое жидкости.

Далее из (12) получают в модельных представлениях соотношения между акустическим сопротивлением грунта $\rho_1 c_1$ и разностью фаз $\Delta \phi$ между звуковым давлением и горизонтальной проекцией колебательной скорости, например, как это сделано в работе [14].

б) Вертикальная составляющая. Используя формулу (12), получаем

$$tg \Delta \varphi (P_n V_{zn}) = \frac{l'_n \sin (2l'_n z) + l''_n \sin (2nz)}{l'_n \sin (2l'_n z) - l''_n \sin (2l''_n z)}.$$
(13)

Выражение (13) инвариантно относительно отражающих свойств грунта, которые учитываются посредством коэффициента отражения V. Используя дисперсионное уравнение, можно найти связь между проекцией волнового вектора *n*-й моды L_n и V для выбранной модели грунта и определить V.

На рис. 3 представлены некоторые результаты, иллюстрирующие применимость метода. Приведенные на рис. 3, а данные соответствуют участку водоема, дно которого в реализованной области частот можно считать однослойным (сплошная линия — расчет для первой нормальной волны, точки — эксперимент).

Рис. 3, б—г соответствует двум различным случаям двухслойной модели грунта в пресном водохранилище с глубиной слоя около 8 м. Результаты приведены для разных расстояний между излучателем и приемной системой. Существенно, что результаты слабо зависят от расстояния.

3°. Использование комбинированного приемника. Суть метода заключается в формировании минимумов характеристики направленности приемной системы в направлении на сигналы, распространяющиеся



Рис. 3. Частотная зависимость экспериментально измеренных (1-4) и теоретически рассчитанных (5) значений разности фаз между звуковым давлением и вертикальной составляющей колебательной скорости для различных моделей подводного грунта в пресном водохранилище глубиной около 8 м и горизонтальных расстояний между излучателем и приемной системой 10 (1), 15 (2), 24 (3) и 37 м (4): a -участок водоема, дно которого в реализованной осната частот можно считать однослойным; b, s -двухслойная модель грунта с параметрами грунта $\rho_1 = 1, 6$ г/см³, $c'_1 = 340$ м/с, $c''_1 = 0, 2$ c'_1 , $\rho_2 = 1, 9$ г/см³, $c'_2 = 2100$ м/с, $c''_2 = 0,02$ c'_2 , h = 1,0 м (ρ_1, ρ_2, c'_1) и c'_2 – плотности и действительные части скорости звука в промежуточном слое толщиной h и нижнем полупространстве, c''_1 и c''_2 – миниые части скорости звука); z -двухслойная модель грунта с параметрами: $\rho_1 = 1, 6$ г/см³, $c'_1 = 100$ м/с, $c''_1 = 0, 05$ c'_1 , $\rho_2 = 2, 1$ г/см³, $c'_2 = 1800$ м/с, $c''_2 = 0,05$ c'_2 , h = 0,05 c'_2 , h = 0,05 c'_2 , h = 0,05 c'_1 , $\rho_2 = 2, 1$ г/см³, $c'_2 = 1800$ м/с, $c''_2 = 0,05$ c'_2 , h = 0,05 c'_2 , h = 0,05 c'_1 , $e''_2 = 0,05$ c''_2 , h = 0,05 c''_2

от поверхности к дну (числитель) и отраженные от дна (знаменатель):

(14)

(15)

$$V(\vartheta) = (P \cos \vartheta - V_z) / (P \cos \vartheta + V_z)$$

Заслуживает также внимания использование одновременно измеренных глубинных разрезов поля давления и поля вертикальной компоненты колебательной скорости V_z. Расчет модуля коэффициента отражения при этом производится по формулам

$$|V| = (P_{\max} - V_{z\min})/(P_{\max} + V_{z\min})$$

или

$$|V| = (V_{z\max} - P_{\min})/(V_{z\max} + P_{\min}),$$

где P_{max} , P_{min} , $V_{z\text{max}}$, $V_{z\text{min}}$ —значения соответствующих разрезов в макси-

мумах и минимумах интерференционной картины, взятые в непосредственной близости от дна водоема. Систематическая погрешность определения модуля коэффициента отражения по формулам (15), как показали расчеты, уменьшается примерно в два—три раза по сравнению с интерференционным методом, использующим только глубинные разрезы поля давления.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ржевкин С. Н.//Тр. 8-й Всесоюз. акуст. конф. М., 1973. С. 259. [2] Гордиенко В. А., Ильичев В. И., Захаров Л. Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М., 1989. [3] Мас Р hie R.//J. Acoust. Soc. Ат. 1980. 68. Р. 1704. [4] Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М., 1960. [5] Мальцев Н. Е.//Акустика океанской среды/Под ред. Л. М. Бреховских. М., 1989. С. 4. [6] Ландау Л. Д., Лиф тиц Е. М. Гидродинамика. М., 1988. [7] Gordienko V. A., Goncharenko B. I. Когорсhenko A. A.//Proc. Second Intern. Congr. on Recent Developments in Air and Structure Borne Sound and Vibration. Auburn Univ., USA, 1992. Vol. 3. Р. 1387. [8] Сгоп В. F., Sherman G. H.//J. Acoust. Soc. Ат. 1962. 34, N 11. Р. 1732. [9] Захаров Л. Н., Калина Л. С.//Тр. 13-й конф. по стат. гидроакустике. М., 1984. С. 99. [10] Жуков А. Н., Иванников А. Н., Павлов В. Н./Акуст. журн. 1990. 36, № 3. С. 447. [11] Захаров Л. Н.//Тр. 7-й конф. по информационной акустике. М., 1982. С. 31. [12] Иванов В. Е., Кирш ов В. А., нестеров А. С.//Гез. межотраслевого семин. МАПР-1 «Модели, алгоритыы, принятие решений». М., 1984. С. 30. [13] Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М., 1957. [14] Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н.//Акуст. журн. 1974. 20, № 4. С. 531.

ВЕСТН. МОСК, УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35. № 6

УДК 534.23

нелинейное звукопоглощение

И. В. Лебедева, С. П. Драган

Исследуется нелицейное звукопоглощение резонансных систем при высоких уровнях звукового давления. Обращено внимание на изменение не только активной и массовой, но также упругой компоненты импеданса, связанное с изменением физических свойств среды. Развитие нелинейных процессов, ответственных за возрастание активной и уменьшение массовой компоненты импеданса, прослеживается путем изучения поля скорости с помощью термоанемометра. Изучается возникновение и эволюция вихревых структур.

Резонансные звукопоглотители (РЗП) широко используются для решения задач шумоглушения. В работах, выполненных на кафедре акустики С. Н. Ржевкиным и его сотрудниками [1—3], решен широкий