

ФАЗОВЫЙ МЕТОД АКУСТИЧЕСКОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОКЕАНА

Кузнецов В. П.¹

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, г. Москва,
Нахимовский пр., 36, 8(499)124-75-92 vladkuz@ocean.ru*

Explores the fundamental possibility of using the phenomenon of the interaction of acoustic waves with a thermo-hydrodynamic fields in the ocean for the practical measurement of several characteristics of low-frequency fields and waves, not only sound of nature that is of interest for some problems of hydroacoustics and Oceanology.

Очевидно, что акустические методы являются основным инструментом дистанционного исследования океана. При помощи акустических методов можно дистанционно измерять характеристики динамических процессов в океане на больших акваториях и в течении длительных промежутков времени. Методы акустического зондирования важны не только для океанологических исследований, но и широко используются для решения прикладных задач. Законы распространения акустических волн в океане весьма сложны и многообразны, и поэтому расшифровка данных акустического зондирования сопряжена со значительными трудностями. По характеру распространения, рассеяния и модуляции акустической волны в результате нелинейных взаимодействий с локальными динамическими процессами в неоднородной среде океана можно получать информацию о свойствах среды, решая так называемые обратные задачи. В 1979 г. американский ученый В.Манк ввел новый термин «Акустическая томография океана», основной задачей которой является диагностика крупномасштабных неоднородностей океана, имеющих размеры в десятки и сотни километров. Но можно расширить эту задачу, если принять во внимание нелинейные процессы взаимодействия низкочастотных и высокочастотных волн и процессов различных пространственно-временных масштабов термогидродинамических движений в океане.

Здесь надо заметить, что благодаря нелинейности основных законов сохранения механики сплошной среды высокочастотная звуковая волна накачки при распространении взаимодействует со всеми полями, существующими в среде. В результате такого взаимодействия звуковая

волна оказывается промодулированной и, таким образом, становится источником информации о динамическом состоянии среды. Следовательно, такая акустическая волна может регистрировать динамические процессы в океане любой природы, что открывает принципиальные возможности практического использования высокочастотных акустических волн для диагностики и изучения динамического состояния среды и, в частности, для измерения некоторых характеристик динамических процессов и гидрофизических полей в океане. Получение на практике такой информации представляет несомненный интерес для некоторых задач гидроакустики и океанологии. Ниже получены аналитические соотношения, позволяющие решать указанные задачи.

В адиабатическом приближении рассматривается взаимодействие высокочастотной звуковой волны и низкочастотных волн и полей существенно разных пространственно-временных масштабов. Предлагается описание распространения и рассеяния акустической волны, основанное на введении комплексной фазы волны, что позволяет использовать в данной задаче метод плавных возмущений [1].

Для решения поставленной задачи будем искать форму зондирующей волны в следующем виде:

$$\phi(t, \vec{r}) = \phi_0 \exp \left\{ -i \left[\omega \left(t - \frac{x}{c_0} \right) + \Psi(t, \vec{r}) \right] \right\}, \quad (1)$$

где $\phi(t, \vec{r})$ – скалярный потенциал скорости; ϕ_0 – амплитуда плоской высокочастотной $\Psi(t, \vec{r})$ волны, распространяющейся вдоль оси x .

Комплексная фаза содержит собственно фазу (вещественная часть) и логарифм $\Psi(t, \vec{r})$ амплитуды или уровень (мнимая часть). «Медленная» фаза обусловлена взаимодействием зондирующей волны с заданными низкочастотными полями сигнала. Подставляя выражение (1) в нелинейное волновое уравнение для неоднородных сред, в котором учтены взаимодействия типа «звук – звук» и «вихрь – звук» [2], линеаризуя его и усредняя по высокочастотным колебаниям, можно получить в первом приближении уравнение для фазы [2]:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{1}{c_0} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \frac{i}{2k} \Delta_{\perp} \Psi = kQ(t, \vec{r}), \quad (2)$$

где $k = \omega/c_0$, Δ_{\perp} – поперечный лапласиан по переменным y, z ;

функция $O(t, \vec{r})$ определяется искомым полем низкочастотных процессов в среде:

$$Q(t, \vec{r}) = \mu(t, \vec{r}) + a \frac{\partial \phi_{\Omega}}{\partial t} + \frac{1}{c_0} \left(V_x - \frac{\partial \phi_{\Omega}}{\partial x} \right),$$

где $\mu(t, \vec{r})$ – флуктуация скорости звука, $V_x(t, \vec{r})$ – составляющая скорости вихревого течения по направлению распространения зондирующей волны, $\phi_{\Omega}(t, \vec{r})$ – потенциальное поле, под которым надо понимать не только низкочастотные звуковые поля, но и любые низкочастотные потенциальные поля и волны не только звуковой природы.

Решение уравнения (2) с граничным условием $\Psi(t, 0, y, z) = 0$ в спектральной форме имеет вид:

$$\Psi(t, \vec{r}) = kx \int \int_{-\infty}^{\infty} Q_{\Omega \vec{q}} \frac{\sin \delta x}{\delta x} \exp[i(\vec{q}\vec{r} - \Omega t) - i\delta x] d\Omega d^3 q, \quad (3)$$

где: $Q_{\Omega \vec{q}}$ – пространственно-временная спектральная амплитуда.

Анализ выражения (3) показывает, что «искажение», вносимое зондирующей акустической волной в действительный спектр сигнала, заключается в амплитудном множителе $kx \sin \delta x / \delta x$ и фазовом сдвиге $\exp(-i\delta x)$, что эквивалентно действию некоторого фильтра с известной частотной характеристикой. Таким образом, оказывается принципиально разрешимая обратная задача определения поля низкочастотного сигнала посредством измерения спектра трехмерной фазовой функции $\Psi_i(t, r)$ с помощью трех ортогональных зондирующих приемников и решением интегрального уравнения [3].

Нужно заметить, что при ограничении в общей теории нелинейных термогидродинамических процессов только нелинейным взаимодействием типа “звук-звук” получается известный [2,3] параметрический приемник низкочастотного звука. Также прослеживается связь предлагаемого метода с акустическим доплеровским методом измерения скорости течений, где измеряемой величиной является только доплеровский сдвиг частоты. Однако можно предположить, что предлагаемый фазовый метод является более чувствительным и применимым к широкому классу динамических процессов в среде океана.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1966. 404 с.
- 2 Кузнецов В. П. Нелинейная акустика в океанологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 264 с.
- 3 Зверев В. А., Калачев А. И. Измерение взаимодействия звуковых волн в жидкости // Акуст. журн. 1958. Т. 4, №4. С. 321-324.