

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ПРОСВЕТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

В.И. Бабий, В.В. Ролик*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

99011, Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: marbab@yandex.ru

*Академия военно-морских сил
имени П.С. Нахимова
99028 Севастополь, ул. Дыбенко, 1А
E-mail: Rolik-Sharik@yandex.ru

Рассмотрены возможности и варианты выполнения гидроакустических систем контроля подводной обстановки, основанные на просветном методе.

Введение. Решение широкого круга народно-хозяйственных задач, проблем мониторинга морских акваторий, а также интенсивного освоения их ресурсов обуславливает необходимость разработки и внедрения современных технологий гидроакустики и гидрофизики [1–4]. Одним из перспективных направлений указанных разработок является "просветный" гидроакустический метод контроля состояния морской среды [5, 6]. Сущность "просветного" метода заключается: в облучении контролируемой среды акустическими сигналами и формировании установившегося акустического поля, многоканальном приеме сигналов на противоположной (относительно точки излучения) границе акватории, последующем измерении пространственных амплитудно-фазовых характеристик установившегося поля, а также его искажений движущимися неоднородностями среды, объектами и их полями различной физической природы. Искусственные или естественные неоднородности среды и объекты обнаруживаются и классифицируются по различным признакам путем комплексирования информации, которая получается путем многоканального измерения пространственно-временных характеристик принимаемых "просветных" сигналов. Фактически все методы, использующие прием прямого

сигнала в среде (в том числе и томографические), являются просветными методами, которые регистрируют интегральные характеристики морской среды по пути распространения звука.

Основы просветного метода. Рассмотрим в совокупности физические свойства водной среды и звуковые поля в ней [1, 3]. Если в движущейся упругой морской среде, описываемой первичными гидрологическими скалярными полями температуры $T(\vec{r}, t)$, солености $S(\vec{r}, t)$, давления $P(\vec{r}, t)$, где скорость звука $C(T, S, P)$, и векторным полем скорости течений $\vec{U}(\vec{r}, t)$ распространяются звуковые колебания, характеризуемые скалярным полем звукового давления $P_a(\vec{r}, t)$ и векторным полем колебательной скорости $\vec{V}_k(\vec{r}, t)$, то полагая аддитивность как полей давления, так и полей скорости, полное кватернионное поле скорости звука можно представить в виде суммы двух кватернионных полей – гидродинамического $q_r(\vec{r}, t)$ и акустического $q_a(\vec{r}, t)$:

$$\begin{aligned} q(\vec{r}, t) &= \left[(\langle C \rangle + \langle \vec{U} \rangle) + (C'(\vec{r}, t) + \vec{U}'(\vec{r}, t)) \right] + \\ &\quad \left[(\partial C / \partial P)_{\eta, s} \cdot P_a(\vec{r}, t) + \vec{V}_k(\vec{r}, t) \right] = \\ &= q_r(\vec{r}, t) + q_a(\vec{r}, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{r} – радиус-вектор, t – время, $\langle \rangle$ – означает операцию усреднения, а «штрихи» – пульсационные составляющие: $C' = C - \langle C \rangle$, $\vec{U}' = \vec{U} - \langle \vec{U} \rangle$.

Из выражения (1) следует, что звуковое поле в морской среде можно рассматривать как акустическое возмущение равновесного кватернионного поля скорости звука и записать соответствующие волновые уравнения для $q_a(\vec{r}, t)$. Полное кватернионное поле скорости звука $q(\vec{r}, t)$ содержит информацию, как о самой среде, так и о звуковых полях в ней. При этом гидродинамическое кватернионное поле $q_r(\vec{r}, t)$ является исходным, характеризующим свойства собственно морской среды [1]. Гидродинамические и акустические кватернионные поля разделяют посредством пространственно-временной фильт-

рации. Им соответствуют разные ветви дисперсионных зависимостей. При этом гидродинамические процессы связаны с переносом массы, а акустические процессы характеризуются переносом механической энергии без существенного переноса массы.

Измерение параметров звуковых полей является важнейшим этапом при разработке акустических методов и средств контроля и непрерывного мониторинга морской среды. Специфика таких измерений, в частности, состоит в том, что для полного описания звукового поля, знания только скалярного поля звукового давления $P_a(\vec{r}, t)$ уже недостаточно, а требуется еще знание векторных полей колебательной скорости $\vec{V}_k(\vec{r}, t)$ и плотности потока звуковой энергии $\vec{I}(\vec{r}, t) = P_a(\vec{r}, t) \cdot \vec{V}_k(\vec{r}, t)$. Существующие методы одновременного измерения P_a и \vec{V}_k , именуемые скалярно-векторными или векторно-фазовыми [2], основаны на взаимодействии звукового поля с веществом чувствительных элементов первичных измерительных преобразователей, являющихся по сути генераторными датчиками. Примером могут служить пьезоэлектрические приемники звукового давления и измерители колебательной скорости, представляющие собой твердые тела (обычно сферической формы) в упругой подвеске, колебательное ускорение которых в поле звуковой волны измеряется трехкомпонентными пьезоакселерометрами. Их сигналы интегрируются для вычисления колебательной скорости. Иногда колебательная скорость измеряется электродинамическими датчиками или рассчитывается по градиенту звукового давления, измеряемого посредством размещенных в пространстве приемников звукового давления – гидрофонов. Понятно, что эти чувствительные элементы возмущают исследуемое звуковое поле и вносят существенные погрешности в результат измерений, а в сильных звуковых полях они могут быть разрушены, например, ударными волнами при взрывах в море.

Многие недостатки, присущие упомянутым контактным методам измере-

ния можно обойти, если использовать нелинейные параметрические «бестелесные» приемники звука, основанные на взаимодействии звука со звуком в морской среде [3, 4]. Принято считать, что акустические параметрические приемники являются измерителями только звукового давления. Покажем, что нелинейные параметрические приемники могут измерять одновременно не только звуковое давление, но и колебательную скорость звуковой волны, плотность потока акустической энергии, скорость течения и скалярную скорость звука. Преимущество этих приемников заключается в их широкополосности, «бестелесности», отсутствии шумов обтекания и минимальном возмущении исследуемого гидродинамического и звукового поля. Они являются измерительными системами с открытым входом, т.е. пропускают постоянную составляющую (нулевую частоту). Это позволяет воспроизводить и измерять абсолютные значения параметров $P_a, \vec{V}_k, \vec{I}, \vec{U}, C_0$ в статическом режиме, что делает их пригодными для построения установок высшей точности и использования в поверочных схемах.

Принцип работы параметрических акустических приемников состоит в том, что при взаимодействии пересекающихся гармонических бегущих звуковых волн в упругой среде происходит фазовая модуляция высокочастотного звука низкочастотной волной [1, 3, 4]. Эта фазовая модуляция вызвана добавочной скоростью $\Delta C(\vec{r}, t)$ точек профиля высокочастотной волны накачки из-за нелинейности уравнений движения и состояния среды так, что результирующее приращение является суммой этих двух эффектов:

$$\Delta C(\vec{r}, t) = \Delta C_1(\vec{r}, t) + \Delta C_2(\vec{r}, t). \quad (2)$$

Добавочная скорость точек профиля звуковой волны, обусловленная нелинейностью уравнения состояния среды, записанного, например, в форме

$$P = P_0 \cdot (\rho / \rho_0)^\gamma, \text{ есть}$$

$$\begin{aligned} \Delta C_1(\vec{r}, t) &= (\gamma - 1)(2\rho_0 C_0)^{-1} P_a(\vec{r}, t) = \\ &= (\partial C / \partial P)_\eta \cdot P_a(\vec{r}, t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $C_0 = (\gamma P_0 / \rho_0)^{1/2}$ – скорость распространения звука в невозмущенной среде,

P_0 и ρ_0 – равновесные внутреннее давление и плотность жидкости, γ – показатель адиабаты, η – энтропия. В морской воде $(\partial C/\partial P)_\eta \approx 1.7 \cdot 10^{-6}$ м/(с·Па) из выражения $C = C(T, S, P)$. Вклад $\Delta C_1(\vec{r}, t)$ в $\Delta C(\vec{r}, t)$ из (2) определяется звуковым давлением низкочастотной волны и дополнительно флуктуациями аргументов скалярной функции $C = C(T, S, P)$.

Второе слагаемое в (2) обусловлено нелинейностью уравнений движения:

$$\Delta C_2(\vec{r}, t) = \vec{V}_k(\vec{r}, t) \cos \Theta, \quad (4)$$

где Θ – угол между направлениями распространения высокочастотной и низкочастотной звуковых волн, т.е. $\Delta C_2(\vec{r}, t)$ есть проекция колебательной скорости низкочастотной волны на направление распространения высокочастотной волны накачки. Если измеритель находится в потоке, то, аналогично (4), добавим выражение для гидродинамической скорости потока $\vec{U}(\vec{r}, t)$ с другим углом Θ . Следовательно, член $\Delta C_2(\vec{r}, t)$ в (2) есть сумма проекций векторов $\vec{V}_k(\vec{r}, t)$ и $\vec{U}(\vec{r}, t)$ на направление распространения волны накачки. Из (3) и (4) следует, что максимальное отношение вкладов P_a и \vec{V}_k в ΔC для бегущей низкочастотной звуковой волны λ будет при

$\Theta = 0$ описываться выражением:

$$(\Delta C_1 / \Delta C_2) = (\gamma - 1)/2.$$

Результирующая величина ΔC может быть измерена, например, фазовым методом. Сдвиг фазы высокочастотной монохроматической волны накачки с частотой ω , прошедшей в среде путь L в поле низкочастотной волны λ приближенно представим так:

$$\phi(t) = -\frac{\omega L}{C_0} + \int_0^L \frac{\omega \Delta C(\vec{r}, t)}{C_0^2} dx = \phi_0 + \Delta \phi(t), \quad (5)$$

где первый член описывает сдвиг фазы волны накачки в однородной невозмущенной неподвижной среде, а второй – приращение фазы при наличии низкочастотной звуковой волны и скорости потока. Подставляя в (5) выражения

(2) – (4), получим приближенно

$$\Delta \phi(t) = \frac{\omega L}{C_0^2} \left[\left(\frac{\partial C}{\partial P} \right)_\eta P_a(t) + \vec{V}_k(t) \cos \Theta \right] \cdot \frac{\sin[(1 - \cos \Theta)\pi L / \lambda]}{(1 - \cos \Theta)\pi L / \lambda}, \quad (6)$$

где λ – длина низкочастотной волны. Последний сомножитель учитывает одномерное пространственное усреднение низкочастотного звукового поля, полей скорости звука $C(\vec{r}, t)$ и скорости потока $\vec{U}(\vec{r}, t)$ измерительной базой; при $L \ll \lambda$ он близок к единице. В частном случае квазиплоских бегущих низкочастотных гармонических волн сдвиг фазы между P_a и \vec{V}_k равен нулю, $P_a = \rho_0 C_0 \vec{V}_k$ и выражение (6) переходит в выражение: $\Delta \phi(t) = \omega L (2\rho_0 C_0^3)^{-1} [\gamma - 1 + 2\cos\Theta] P_a(t)$.

Отметим возможность экспериментального определения нелинейных параметров среды γ или $(\partial C/\partial P)_\eta$ путем измерения $\Delta \phi$ как функции угла Θ . Так, если $1 < \gamma < 3$, то $\gamma = 1 - 2\cos\Theta_0$, где Θ_0 – угол компенсации, при котором $\Delta C_2 = -\Delta C_1$ и $\Delta \phi = 0$. В воздухе $\gamma = 1,4$ и $\Theta_0 = 101,5^\circ$ [3]. Параметр γ характеризует отношение вкладов P_a и \vec{V}_k в результирующую величину ΔC . В воде $\gamma \approx 7$ и при $L \ll \lambda$ для $\Theta = 0$ или $\Theta = \pi$ чувствительность параметрического приемника к P_a приблизительно в три раза выше, чем к \vec{V}_k . Чувствительность к P_a изотропна, а чувствительность к \vec{V}_k косинусоидальна, как в идеальном измерителе вектора скорости. В зависимости от угла Θ члены, содержащие P_a и \vec{V}_k в (6), дают разный вклад в $\Delta \phi(t)$. Так, при $\Theta = \pi/2$ база L касательна фронту плоской бегущей низкочастотной волны и параметрический приемник реагирует только на звуковое давление P_a . Если же $\Theta \neq \pi/2$, то приемник реагирует на P_a и \vec{V}_k . Разделить слагаемые в (2) можно проводя измерения $\Delta \phi$ при излучении волн накачки во встречных направлениях, например, на двух коллинеарных базах или на одной базе L с

временным или частотным разделением. Так, сумма сигналов $\Delta\phi^\uparrow$ и $\Delta\phi^\downarrow$ соответствует слагаемому ΔC_1 , а их разность соответствует слагаемому ΔC_2 . По этому принципу работают традиционные гидроакустические измерители скорости звука и скорости потока. Разделение компонент колебательной скорости \vec{V}_k и средней скорости потока $\langle \vec{U} \rangle$ основано на отсутствии постоянной составляющей звукового поля: $\langle \vec{V}_k \rangle = 0$, т.е. на полосовой и низкочастотной фильтрации сигналов. Программным изменением отношения разделенных слагаемых из (2) возможно одновременное формирование различных диаграмм направленности (чувствительности) для приема низкочастотного излучения, например, в виде кардиоиды. Для плоских бегущих низкочастотных волн λ вклад колебательной скорости в параметрических приемниках звука с однонаправленным излучением высокочастотной волнынакачки приводит к некоторой асимметрии диаграммы направленности относительно нормали к L в зависимости от отношения L/λ , как это наблюдалось экспериментально [4]. Три взаимно ортогональных базы L со встречным излучением, пересекающихся в точке, являющейся фазовым центром такого измерительного модуля, позволяют определить четыре параметра: скорость звука C и три компоненты результирующего вектора скорости полей $\vec{V}_k(\vec{r}, t)$ и $\vec{U}(\vec{r}, t)$. Если акустические и гидродинамические поля случайны, а их пространственно-временные спектры перекрываются, то их разделение одним модулем на два кватернионных поля (1) – гидродинамическое $q_r(\vec{r}, t)$ и акустическое $q_a(\vec{r}, t)$ – невозможно, поскольку число действующих на входе и подлежащих измерению параметров (восемь) превышает число независимых сигналов (четыре) на выходе модуля. Для разделения надо образовать из этих модулей объемную антеннную решетку, обеспечивающую измерения в заданном пространственно-временном окне. Разделение сигналов разных видов полей возможно, напри-

мер, спектральным анализом или корреляционно-экстремальным методом с использованием дисперсионных зависимостей. При математической обработке выходных сигналов модулей антенной решетки можно рассчитать характеристики низкочастотных гидрофизических и звуковых полей, их взаимосвязь, исследовать пространственно-временную структуру, а также разделить турбулентные (псевдозвуковые) и звуковые пульсации давления и скорости потока, оценить плотности потоков звуковой энергии различных источников и многие другие акустические и гидрофизические характеристики среды.

В работе [5] описан новый просветный гидроакустический метод мониторинга среды, изображенный на рис. 1, где 1 – приемная антенна сигнала и шумов; 2 – усилитель сигнала и шумов с каналами связи; 3 – излучатель звука; 4 – звуковые лучи в водной среде. Метод заключается в усиении и переизлучении естественного морского шума. Спектр излучаемого сигнала имеет максимумы, соответствующие частотам обратной связи.

Два последовательных преобразования Фурье регенерированного сигнала позволяют получить времена прихода амплитуд отдельных лучей. Регенеративный метод сравнивается с методом спектрометрии временных задержек.

Обсуждаемый метод был впервые опробован на морской трассе длиной 1300 метров в акватории г. Геленджик в 2002 году. В 2003 году исследование метода было продолжено на более коротких морских трассах [6]. Суть этого метода мониторинга гидрофизической изменчивости подводной среды, заключается в том, что контролируемый участок среды входит в состав автогенератора, выполняя в нем роль петли обратной связи с задержкой, определяемой скоростью звука и длиной трассы (луча). Изменения, происходящие на контролируемом участке среды, влияют на распространяющийся по нему звук, и анализ принимаемого сигнала позволяет отслеживать изменения среды. На рис. 1 представлена схема, реализующая дан-

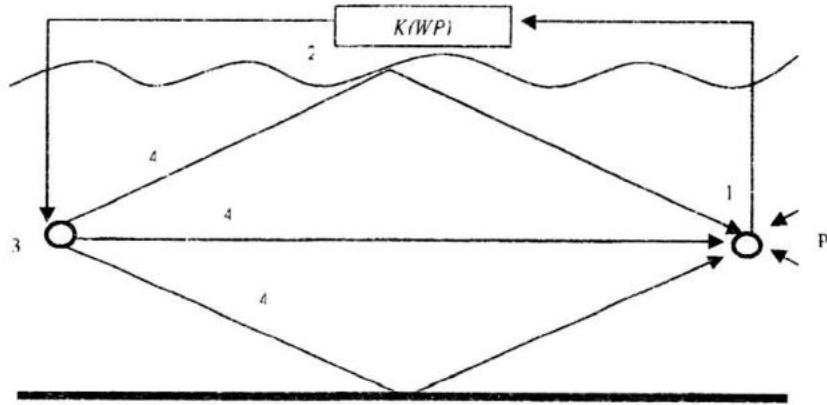


Рис. 1. Схема гидроакустического просветного метода

ный метод. Сигнал с приемника 1 через устройство обратной связи 2 (усилитель, частотный фильтр, ограничитель, линии связи и пр.) передается на излучатель 3. Излученный звук по водному пути 4 вновь попадает на приемник. Кроме того, приемник фиксирует естественный шум морской среды. Данная схема характеризуется коэффициентом кольцевого усиления M , который является произведением чувствительности приемника, коэффициента усиления K цепи обратной связи, передаточной функции излучателя и коэффициента передачи самой среды как фильтра с распределенными параметрами. Селекция звуковых лучей возможна пространственно-временным способом. Обратная задача состоит в оценке параметров фильтра, являющегося математической моделью морской среды.

Выводы. Для наиболее полного использования всей полезной информации, заключенной в звуковых и гидрологических полях морской среды, рассмотрен неконтактный параметрический акустический способ одновременного измерения «просветным» методом колебательной скорости и звукового давления, плотности потока звуковой энергии, скорости звука и гидродинамической скорости потока. Такой комплексный подход открывает новые возможности эффективного дистанционного мониторинга водной среды и звуковых полей в ней на основе обобщенного кватернионного описания гидрофизических и акустических полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабий В.И., Родионов А.А. Параметрический акустический метод измерения кватернионных гидрофизических полей // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2010. – С. 391 – 394.
2. Щуров В.А. Векторная акустика океана. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 308 с.
3. Бабий В.И. Акустический векторно-фазовый метод измерения звуковых полей // Акустические методы и средства исследования океана. Междудомственный сборник. – Владивосток: ДВПИ, 1986. – С. 63 – 66.
4. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 415 с.
5. Фурдуев А.В. Подводный акустический мониторинг изменчивости среды (экспериментальная проверка новых методов) // Акуст. журн., т. 47, № 3, 2001. – С. 422 – 430.
6. Канев Н.Г., Миронов М.А., Фурдуев А.В. Способ освещения подводной обстановки регенерацией шума // Доклады X школы-семинара акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», М.: ГЕОС, 2004. – С. 374 – 377.