
КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 681.883.41

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ПРОСВЕТНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ПОЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

М. В. Мироненко, А. Е. Малащенко, Л. Э. Карачун, А. М. Василенко

Рассмотрены научно-технические основы и измерительные характеристики низкочастотной просветной гидролокации гидрофизических полей источников морской среды. Обоснованы практические пути формирования протяженных просветных систем мониторинга как параметрических с низкочастотной накачкой контролируемой среды, сформированных на основе средств морского приборостроения. Приведены результаты морских испытаний просветных систем мониторинга на трассах протяженностью десятки-сотни километров.

Ключевые слова: просветная гидролокация, гидрофизические поля различной физической природы, нелинейное взаимодействие волн в морской среде, дальний параметрический прием волн.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ становления отечественной и зарубежной гидроакустики позволяет конкретизировать целенаправленную тенденцию ее развития, которая проявилась в следующем. Техническое совершенствование кораблей и подводных аппаратов различного назначения обеспечило снижение уровня их шумоизлучения и количества содержащихся в нем дискретных составляющих как устойчивых классификационных признаков. Также уменьшилась акустическая заметность кораблей за счет использования новых материалов для изготовления покрытий их корпуса.

Стремление разработчиков станций перейти в низкочастотный и инфранизкочастотный диапазоны как наиболее информативную область шумоизлучения морских объектов создало сложную практическую задачу производства и применения про-

тяженных акустических антенн, что, в свою очередь, привело к увеличению массогабаритов станций и другим, неоправданным с точки зрения достигнутого эффекта, последствиям.

Попытки решить сложившуюся проблему путем снижения частоты зондирующих сигналов при обнаружении объектов методами активной (включая и биостатическую) гидролокации также столкнулись с этими трудностями. Решение задачи дальнего обнаружения реальных объектов в этом случае ограничивается снижением их “волнового параметра” и неэффективностью применения активной гидролокации.

Научно-технические разработки, связанные с параметрическими методами излучения и приема низкочастотных акустических сигналов антеннами “малых волновых размеров”, наметили определенный сдвиг в решении этой проблемы. Но реа-

лизация достижений и разработок параметрических методов решения задачи дальнего обнаружения малозумных морских объектов ограничивается определяющими факторами — низкой нелинейностью водной среды и условиями применения этих методов: районом, глубиной погружения приемных и излучающих антенн, суточной и сезонной изменчивостью, а также общей зависимостью параметрических эффектов от характеристик морской среды.

На основании анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований этого направления определена идея разработки принципиально нового гидроакустического метода гидролокации морских объектов, объединяющего преимущества и максимально снижающего принципиальные недостатки существующих классических методов, таких как активная гидролокация, пассивное

шумопеленгование и нелинейная гидроакустика. Таким методом стал успешно разрабатываемый в настоящее время на Дальнем Востоке обобщенный низкочастотный (активно-пассивный и параметрический) метод дальней гидролокации, названный впоследствии “методом просветной гидролокации” (МПГЛ) [3–5].

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В МОРСКОЙ СРЕДЕ

В нелинейном приближении уравнения гидродинамики допускают существование трех независимых друг от друга типов колебаний и возбуждаемых ими гармоник: звуковых, температурных (энтропийных) и волн завихренности. Известно, что эти поля при определенных условиях могут взаимодействовать друг с другом. Рассмотрим эту закономерность для условий нелинейной морской среды. Проанализируем систему уравнений Навье—Стокса вязкой теплопроводящей среды, с помощью которых можно рассматривать указанные взаимодействия с учетом скорости частиц $\bar{v}(\bar{r}, t)$, плотности $\rho(\bar{r}, t)$, давления $p(\bar{r}, t)$, а также тепловых параметров среды, энтропии $S(\bar{r}, t)$ и температуры $T(\bar{r}, t)$ [5–7]:

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \nabla) \bar{v} \right] = -\nabla p + \eta \Delta \bar{v} + \left(\xi + \frac{\eta}{3} \right) \text{grad div } \bar{v}; \quad (1)$$

$$\partial \rho / \partial t + \text{div } \rho \bar{v}; \quad (2)$$

$$p = p(\rho, S); \quad (3)$$

$$\rho T \left[\frac{\partial S}{\partial t} + (\bar{v} \nabla) S \right] = \alpha T + \xi (\text{div})^2 + \frac{\eta}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right)^2, \quad (4)$$

где η, ξ — сдвиговая и объемная вязкости, α — коэффициент теплопроводности.

В этом случае в правой части уравнения (1) можно заменить влияние механических свойств среды на электромагнитные. Тогда оно запишется как

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \nabla) \bar{v} \right) &= \\ &= -\nabla p + \rho_e \left[\bar{E} + \frac{1}{C} (\bar{v} \times \bar{H}) \right] + \\ &+ \frac{1}{C} (\bar{j}^* \times \bar{H}) + \rho \bar{F}_{\text{доб}}, \quad (5) \end{aligned}$$

где \bar{E}, \bar{H} — электрическая и магнитная напряженность поля; ρ_e — плотность электрических зарядов; \bar{j}^* — плотность электрического поля; C — фазовая скорость электромагнитных волн; $\bar{F}_{\text{доб}}$ — плотность обычных массовых сил, не связанных с взаимодействием жидкости с электромагнитным полем.

Кроме этого, систему уравнений (2–5) можно сделать замкнутой, если добавить зависимости, учитывающие приток тепла извне $dq_{\text{доб}}^{(e)}$, силы $\bar{F}_{\text{доб}}$ и удельную электропроводность σ .

Скалярное уравнение притока тепла имеет вид:

$$\begin{aligned} dv + pd(1/\rho) &= \\ &= 1/\rho (\bar{j} \bar{E}) dt + dq_{\text{доб}}^{(e)}. \quad (6) \end{aligned}$$

Скалярное уравнение, вытекающее из второго закона термодинамики, выражается в виде:

$$TdS = 1/\rho (\bar{j} \bar{E}) dt + dq_{\text{доб}}^{(e)}. \quad (7)$$

При этом внутренняя энергия U может быть представлена функцией ρ и $SdU = TdS - pd(1/\rho)$. Отсюда можно получить два скалярных уравнения состояния термодинамики:

$$T = (\partial U / \partial S) \rho$$

и

$$-p = \left(\partial U / \partial \frac{1}{\rho} \right). \quad (8)$$

Добавим электродинамические уравнения Максвелла и закон Ома:

$$\text{rot } \bar{E} = -\frac{1}{C} \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}, \quad \text{div } \bar{H} = 0; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{rot } \bar{H} &= \frac{4\pi}{C} \bar{j} + \frac{1}{C} \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}, \\ \text{div } \bar{E} &= 4\pi \rho_e; \quad (10) \end{aligned}$$

$$\bar{j} = \sigma \left(\bar{E} + \frac{1}{C} \bar{v} \times \bar{H} \right) + \rho_e \bar{v}. \quad (11)$$

Строгое решение системы этих уравнений до настоящего времени не найдено. В данной работе выводятся упрощенные уравнения, позволяющие проводить не только качественные, но и численные оценки, а также некоторые частные практически важные элементы взаимодействия электромагнитных и упругих акустических волн в проводящих средах. Электрическую компоненту поля из этой системы уравнений “свернем”, упростим до уравнения диффузии волнового уравнения и представим в виде

$$\Delta \Psi = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad (12)$$

где Ψ — потенциал электрического поля; α — коэффициент диффузии.

Для магнитного поля, распределенного неоднородно в проводящей жидкости, коэффициент α представим в виде $\alpha = (\mu\sigma)^{-1}$, μ — магнитная проницаемость, σ — удельная электропроводность. Решение уравнения (12) для распределения потенциала поля вдоль оси X в воде можно найти в виде

$$\Psi = \Psi_0 e^{-i[\omega t + \gamma x]}, \quad (13)$$

$$\text{где } \gamma^2 = \frac{\Omega_{\text{эл}}^2}{C^2} - i\omega/\alpha,$$

$$(\Omega_{\text{эл}}/C)^2 = k^2 - \text{волновое число.}$$

Решение уравнения (13) описывает затухающую электромагнитную волну. Ее затухание в проводящей среде зависит от коэффициента диффузии α и может происходить как на нескольких длинах волн, так и на части волны. В зоне, где волна еще существует, формируется область активного изменения термодинамических параметров среды с частотой $\Omega_{эл}$. Для звуковой части системы уравнений в приближении малых отклонений плотности и давления от стационарных значений получим приближенные нелинейные уравнения

$$\Delta p - \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{b}{C_0^2 \rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \Delta p = Q_{эл} - Q_{ак}, \quad (14)$$

где $Q_{эл}$ — группа членов, характеризующих генерацию упругих колебаний за счет электромагнитных волн, сосредоточенных в зоне $(-x_{оп}, x_{оп})$; $Q_{ак}$ — нелинейные члены, определенные в нелинейной акустике [5–7]:

$$Q_{ак} = \frac{1}{C_0^4 \rho} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)^2 + \frac{\varepsilon - 1}{C_0^4 \rho} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\rho_0}{2} \Delta v^2 + \rho_0 \bar{v} \Delta \bar{v}. \quad (15)$$

Пример дальнего параметрического приема поля шумоизлучения морского судна просветным методом гидролокации приведен на рис. 1. Результаты проведенных морских исследований просветной гидролокации как параметрической с низкочастотной подсветкой (накачкой) контролируемой среды показали высокую эффективность метода. Так, параметрический прием информационных волн “малых амплитуд” осуществляется на дистанциях десятки-сотни километров, при этом эффективно принимаются гидро-

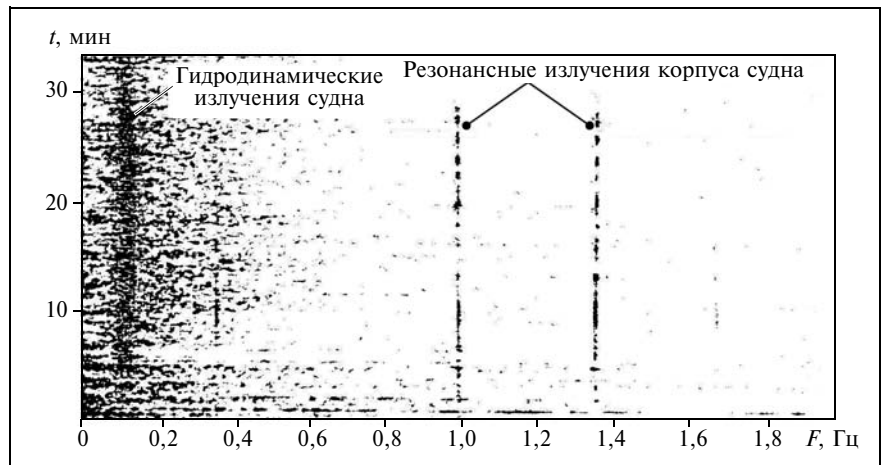


Рис. 1. Спектрограмма шумоизлучения морского судна. Параметрические измерения спектра сигналов разности фаз с одиночных приемников горизонтальной донной антенны. Протяженность трассы — 50 км, частота подсветки среды — 400 Гц

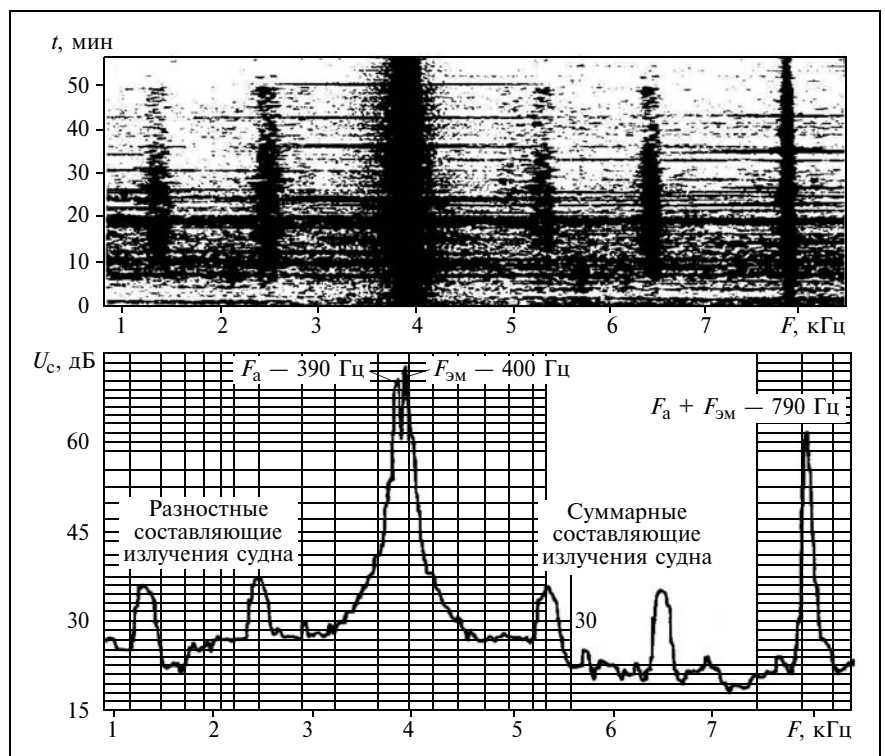


Рис. 2. Спектрограмма и спектр акустических сигналов подсветки среды с частотой 390 Гц, промодулированных электромагнитными излучениями с частотой 400 Гц. Параметрические измерения на трассе протяженностью 40 км

физические и акустические поля объектов и среды в диапазоне частот от сотен до долей герца [7–9].

Пример дальнего параметрического приема электромагнитных излучений морского судна

просветным методом гидролокации приведен на рис. 2. Спектр и спектрограмма шумоизлучения вальнолопастного ряда морского судна, наложенного на просветный акустический 390 Гц и электромагнитный 400 Гц сиг-

налы морского судна, подтверждают возможность “тройного” нелинейного взаимодействия в морской среде волн различной физической природы.

ВЫВОДЫ

Морскими экспериментальными исследованиями просветной гидролокации показано, что операция активной низкочастотной подсветки контролируемой среды (на частотах от десятков до сотен герц) обеспечивает возможность дальнего обнаружения акустически слабозаметных объектов. Использование низкочастотных просветных сигналов делает метод практически нечувствительным к мелкомасштабным изменениям гидроакустических характеристик морской среды.

При совместном распространении в проводящей (морской) среде упругих (акустических) и электромагнитных информационных волн возникает их нелинейное взаимодействие и параметрическое преобразование, что сопровождается образованием в исходной акустической волне параметрических составляющих суммарной и разностной частоты и их гармоник.

Характеристики полей шумоизлучения, а также электромагнитные и другие поля, наведенные объектами, в этом случае выделяются и измеряются при спектральном анализе принимаемых просветных сигналов.

Таким образом, разработаны научно-технические основы низкочастотной просветной гидролокации гидрофизических по-

лей среды и объектов. Обоснованы практические пути формирования и эксплуатации просветных систем мониторинга и контроля полей различной физической природы протяженных морских акваторий, которые могут быть сформированы на основе средств морского приборостроения, разрабатываемых и серийно изготавливаемых СКБ САМИ ДВО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мироненко М. В.* Физико-математические основы нетрадиционного метода “гидролокации на просвет” // Сб. статей Всероссийской межвузовской НТК. Вып. 3. — Владивосток: ТОВВМУ, 1996. — С. 88—91.
2. *Мироненко М. В., Малашенко А. Е., Табояков А. А. и др.* Низкочастотный просветный метод дальней гидролокации гидрофизических полей морской среды / Монография. — Владивосток: СКБ САМИ ДВО РАН, 2006. — 173 с.
3. *Стародубцев П. А., Мироненко М. В., Тахтеев В. А. и др.* Теоретические основы формирования просветных систем и перспективы развития морского приборостроения на Дальнем востоке / Монография. — Владивосток: МГУ им. Г. И. Невельского, 2006. — 180 с.
4. *Василенко А. М., Мироненко М. В., Карачун Л. Э., Табояков А. А.* Широкомасштабный томографический мониторинг морских акваторий системами многопозиционных гидроакустических просветных линий // VIII Международная НТК “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”, Санкт-Петербург, май 2006. — С. 332—335.
5. *Зверев В. А., Калачев А. И.* Модуляция звука звуком при пересечении акустических волн // Акустический журнал. — 1970. — Т. 16, № 2. — С. 245—251.
6. *Мироненко М. В., Короченцев В. И.* Взаимодействие упругих и электромагнитных волн // Сб. трудов 11 сессии РАО, Т. 1. — М.: ГЕОС, 2001. — С. 303—306.
7. *Пат. № 2158029 РФ.* Способ параметрического приема упругих волн в морской среде (4 варианта). / Короченцев В. И., Мироненко М. В. — 2000.
8. *Мироненко М. В., Короченцев В. И. и др.* Закономерности взаимодействия упругих и электромагнитных волн в морской воде. Международный симпозиум “Подводные технологии — 2000”. — Япония, Токио, май 2000. — С. 105—109.
9. *Пат. RU № 2452040.* Способ параметрического приема волн различной физической природы в морской среде. / Мироненко М. В., Малашенко А. Е., Карачун Л. Э., Василенко А. М. — 2010.

Михаил Владимирович Мироненко — д-р техн. наук, гл. научн. сотрудник лаборатории гидрофизики Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (СКБ САМИ ДВО РАН);

☎ (4232) 27-67-10

E-mail: professor@mail.primorye.ru

Анатолий Емельянович Малашенко — канд. техн. наук, директор СКБ САМИ ДВО РАН;

☎ (4242) 55-49-66

E-mail: skb@skbsami.ru

Леонард Эвальдович Карачун — зав. лабораторией гидрофизики СКБ САМИ ДВО РАН;

☎ (4242) 55-49-66

E-mail: skb@skbsami.ru

Анна Михайловна Василенко — канд. техн. наук, научн. сотрудник научно-исследовательской лаборатории Военного учебно-научного центра ВМФ “Военно-морская академия им. адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова” (филиал, г. Владивосток).

☎ (4232) 45-87-86

E-mail: kahunya@gmail.com

□