
ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО. АКУСТИКА

УДК 551.465

М.В. Мироненко¹, П.А. Стародубцев², Е.Н. Бакланов³

¹Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований
Дальневосточного отделения Российской академии,
693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25

²Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова,
690006, г. Владивосток, Днепровский переулок, 6

³Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

НЕЛИНЕЙНАЯ ПРОСВЕТНАЯ ГИДРОАКУСТИКА В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ПОЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

Рассматриваются физико-математические основы и измерительные технологии нелинейной просветной гидроакустики в решении проблемы дальнего параметрического приема информационных волн «малых амплитуд», формируемых искусственными и естественными источниками морской среды. Обосновываются практические пути формирования протяженных просветных систем мониторинга как параметрических с низкочастотной накачкой контролируемой среды, формируемых на основе средств морского приборостроения. Приводятся примеры дальнего параметрического приема и измерения пространственно-временных характеристик акустических, электромагнитных и гидродинамических полей, формируемых искусственными и естественными источниками морской среды в диапазоне частот сотни – десятки – единицы – доли Герца на трассах протяженностью десятки-сотни километров.

Ключевые слова: морская среда, нелинейная просветная гидроакустика, гидрофизические поля различной физической природы, нелинейное взаимодействие волн, дальний параметрический прием волн «малых амплитуд», радиогидроакустические средства морского приборостроения.

M.V. Mironenko, P.A. Starodubtcev, E.N. Baklanov

NONLINEAR LUMINAL HYDROACOUSTIC IN SYSTEMS OF MONITORING OF DIFFERENT PHYSICAL NATURE FIELDS IN THE MARINE ENVIRONMENT

The article discusses physical and mathematical foundations and measurement technology of nonlinear luminal hydroacoustics in addressing the long-wave parametric receiving of "small amplitude" information waves, formed by artificial and natural sources of the marine environment. Settle practical ways of formation of extensive luminal monitoring systems as a low-frequency parametric pumping of controlled environment, formed by means of marine engineering. Examples of long-distance parametric receiving and measuring of spatial-temporal characteristics of the acoustic, electromagnetic and hydrodynamic fields generated by artificial and natural sources of the marine environment in the frequency range of hundreds – tens – units – shares of Hertz on the tracks for tens to hundreds of kilometers.

Key words: marine environment, nonlinear luminal hydroacoustics, hydrophysical fields of various physical nature, nonlinear wave interaction, long-distance parametric reception of "small amplitude" waves, radiohydroacoustics marine instruments.

Введение

Анализ становления отечественной и зарубежной гидроакустики позволяет конкретизировать целенаправленную тенденцию ее развития, которая проявилась в следующем. Техни-

ческое совершенствование кораблей и подводных аппаратов различного назначения и технической сложности обеспечило снижение уровня их шумового излучения и количества содержащихся в нем дискретных составляющих как устойчивых классификационных признаков. Также уменьшилась акустическая заметность кораблей за счет использования новых материалов для покрытия их корпуса.

Стремление разработчиков станций перейти в низкочастотный и инфранизкочастотный диапазоны частот как наиболее информативную область шумового излучения морских объектов создало сложную практическую задачу производства и применения протяженных акустических антенн, что, в свою очередь, привело к увеличению массы и габаритов станций и другим, неоправданным с точки зрения достигнутого эффекта, последствиям. Попытки решить сложившуюся проблему путем снижения частоты зондирующих сигналов при обнаружении объектов методами активной гидролокации также столкнулись с подобными трудностями. Решение задачи дальнего обнаружения реальных объектов в этом случае ограничивается снижением их «волнового параметра», а также «акустической заметности» и неэффективностью применения классических средств 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 реализация достижений и разработок параметрических методов дальнего обнаружения малошумных морских объектов ограничилась определяющим фактором – низкой нелинейностью водной среды и условиями их применения: 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 определилась идея разработки принципиально нового метода гидролокации морских объектов, объединяющего преимущества и максимально снижающего принципиальные недостатки существующих классических методов: активной гидролокации, пассивного пеленгования сигналов шумового поля, а также метода высокочастотной нелинейной акустики. В совокупности это породило проблему разработки нового научно-технического направления, обеспечивающего дальнейшее обнаружение «акустически слабозаметных» морских объектов по признакам излучаемых ими полей различной физической природы (акустических, электромагнитных и гидродинамических). Таким методом стал разрабатываемый и успешно реализуемый в настоящее время на Дальнем Востоке низкочастотный (активно-пассивный и параметрический) метод дальней гидролокации полей объектов и неоднородностей морской среды, названный впоследствии методом «нелинейной просветной гидроакустики» (НПГА). Измерительные технологии НПГА как нового многофункционального научно-технического направления, объединяющего гидрофизику, геофизику и радиофизику, основаны на закономерностях нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования акустических просветных волн с измеряемыми информационными волнами различной физической природы в морской среде [1–3]. Итак, проведем анализ указанных закономерностей.

Физико-математическая модель нелинейного взаимодействия акустических 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 и вихревых волн. 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 $T(\bar{r}, t)$ [3–6].

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \bar{v} = 0, \quad (2)$$

$$P = P(\rho, S), \quad (3)$$

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

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

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

где \bar{E}, \bar{H} – электрическая 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, 3, 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

$$dv + Pd \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} (\tilde{j} \cdot \tilde{E}) dt + dq_{\text{доб}}^{(e)}. \quad (6)$$

Скалярное уравнение, вытекающее из второго закона термодинамики,

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

При этом внутренняя энергия U может быть представлена функцией ρ и $SdU = TdS - Pd \left(\frac{1}{\rho} \right)$. Отсюда можно получить два скалярных уравнения состояния термодинамики:

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right) \rho, \quad -P = \left(\frac{\partial U}{\partial \frac{1}{\rho}} \right). \quad (8)$$

Добавим электродинамические уравнения Максвелла и закон Ома:

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

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \frac{4\pi}{C} \bar{j} + \frac{1}{C} \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \bar{E} = 4\pi \rho_e. \quad (10)$$

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

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

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

где $\gamma^2 = \frac{\Omega_{\omega}^2}{C^2} - i \frac{\omega}{\alpha}$, $\left(\frac{\Omega_{\omega}}{C} \right)^2 = k^2$ – волновое число.

Решение (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 Ω_{ω} . Для звуковой части системы уравнений в приближении малых отклонений плотности и давления от стационарных значений получим приближенное нелинейное уравнение для звукового давления

$$\Delta P - \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{b}{C_0^2 \rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \Delta P = Q_{эл.} - Q_{ак}, \tag{14}$$

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

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

Таким образом, полученные в выражении (15) нелинейные члены генерируются за счет электромагнитных и упругих информационных волн. Они формируют в исходной просветной волне звукоряд дополнительных составляющих суммарной и разностных частот и их гармоник, которые проявляются и выделяются в спектрах принимаемых просветных сигналов как устойчивые дискретные составляющие измеряемых информационных волн морской среды [2, 3].

Пример дальнего параметрического приема поля шумового излучения морского судна методом нелинейной просветной гидроакустики приведен на рис. 1. Морскими исследованиями просветной гидролокации как параметрической с низкочастотной подсветкой (накачкой) контролируемой среды показана его высокая эффективность. Параметрический прием информационных волн «малых амплитуд» осуществляется на дистанциях десятков–сотен километров, при этом эффективно принимаются гидрофизические и геофизические (преимущественно сейсмические) поля объектов и среды в диапазоне частот сотен – десятков – единиц – долей Герца [1, 2].

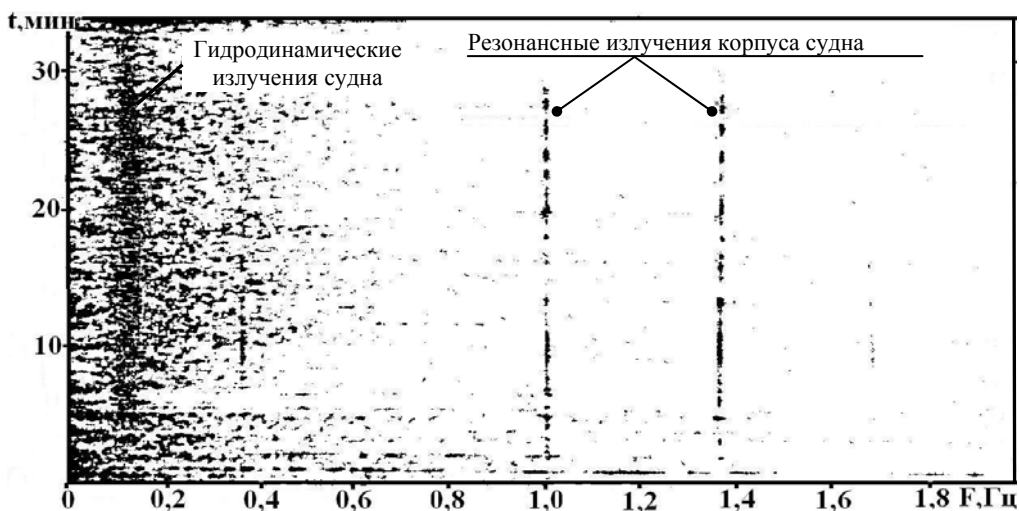


Рис. 1. Спектрограмма шумового излучения морского судна. Сигналы с одиночных приемников горизонтальной донной антенны. Протяженность трассы 50 км, частота подсветки среды 400 Гц
 Fig. 1. Spectrogram of noise emission of a marine vessel. The signals from the single receivers of the horizontal bottom antenna. The length of the route 50 km, frequency of environment lighting 400 Hz

Морские экспериментальные исследования проводились на акваториях Японского моря (на трассе Приморье – о. Сахалин, на трассе протяженностью более 300 км). А также на трассах Охотского и Берингова морей протяженностью 20, 40, 50, 60 и 100 км. В качестве низкочастотных излучающих систем использовались как стационарные, так и буксируемые забортные блоки, сформированные на основе преобразователей подводных маяков наведения «ИНЗА-300», «ИНЗА-400».

Прием просветных сигналов выполнялся в лабораториях судна-носителя, а также в береговых лабораториях стационарных гидроакустических станций. Обработка и анализ принимаемой информации выполнялись на специально разработанных линиях, сформированных из штатных радиотехнических приборов, а также специально разработанных цифровых блоков. При обработке использовалось преобразование частотно-временного масштаба принимаемых сигналов в высокочастотную область, что обеспечивало измерение частотного спектра просветных волн в диапазоне единиц – долей Герца, включая волны, формируемые СНЧ колебаниями объектов в установившемся режиме движения как целого [1–3].

Пример дальнего параметрического приема электромагнитных излучений морского судна просветным методом гидролокации приведен на рис. 2. Спектр и спектрограмма шумового излучения лопастного ряда морского судна, совмещенного с просветной акустической волной 390 Гц, а также электромагнитной волной 400 Гц морского судна, что подтверждает возможность «тройного» нелинейного взаимодействия в морской среде волн различной физической природы.

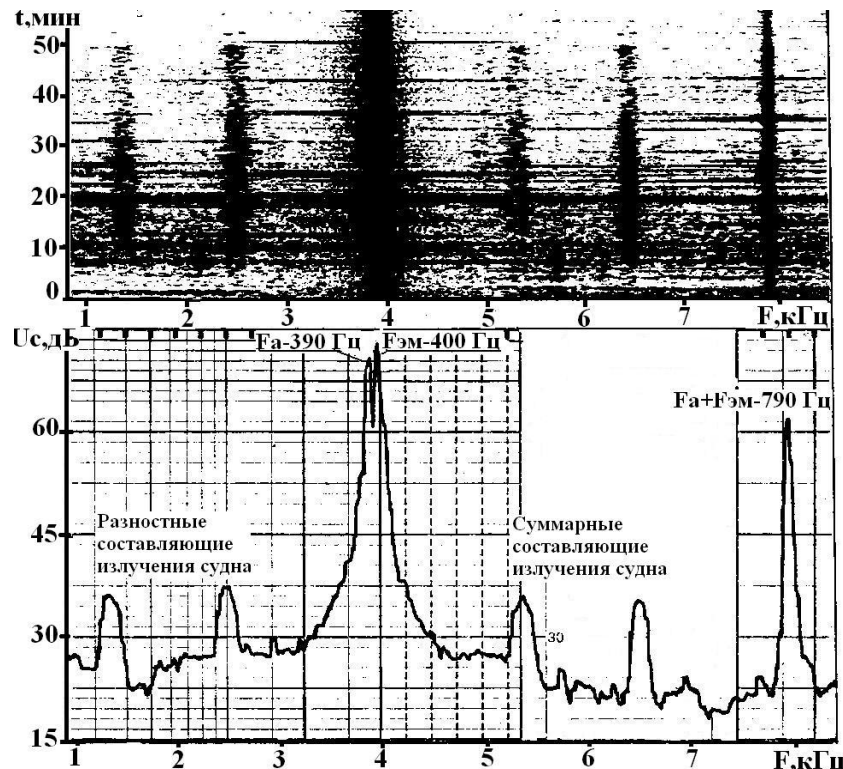


Рис. 2. Спектрограмма и спектр акустических сигналов подсветки среды с частотой 390 Гц, модулированных электромагнитными излучениями морского судна частотой 400 Гц.

Просветная трасса 50 км

Fig. 2. Spectrogram and spectrum of acoustic signals of environment lighting with frequency 390 Hz, modulated with electromagnetic radiation of a sea ship 400 Hz. Luminal track 50 km

Следует отметить, что экспериментальные исследования по нелинейной просветной гидроакустике проводились также в рамках программ Всесоюзных морских экспедиций «Восток», а также в рамках совместного широкомасштабного акустического эксперимента в переходной зоне Охотского и Японского морей (морской полигон СКБ САМИ, на трассе 350 км). Во всех указанных экспериментах был получен положительный результат.

Выводы

При совместном распространении в проводящей (морской) среде просветных и электромагнитных информационных волн возникает их нелинейное взаимодействие и параметрическое преобразование. Это сопровождается образованием в исходной акустической просветной волне параметрических составляющих суммарной и разностной частот и их гармоник, которые являются амплитудно-фазовыми модуляционными признаками просветных волн и выделяются в приемных трактах систем мониторинга.

Морскими экспериментальными исследованиями нелинейной просветной гидроакустики показано, что использование операции активной низкочастотной подсветки контролируемой среды (на частотах десятки герц – сотни герц) обеспечивает дальнейшее (десятки-сотни километров) обнаружение «акустически слабозаметных» морских объектов по признакам их полей различной физической природы. Использование низкочастотных просветных сигналов делает его практически нечувствительным к помехам и мелкомасштабным изменениям характеристик морской среды.

Характеристики полей шумового излучения, а также электромагнитные и другие поля, наведенные объектами, в этом случае выделяются и регистрируются в приемном тракте измерительных систем методом узкополосного спектрального анализа принимаемых просветных сигналов, что выполняется существующими методами и реализующими их трактами цифровой обработки сигнальной информации.

На основе результатов многолетних морских исследований и технических разработок по созданию систем освещения и мониторинга полей морских акваторий разработаны научно-технические основы нелинейной просветной гидроакустики, обеспечивающей дальний параметрический прием гидрофизических полей среды и объектов различной физической природы. Обоснованы практические пути формирования и эксплуатации просветных систем мониторинга и контроля протяженных морских акваторий, которые могут быть сформированы на основе радиогидроакустических средств морского приборостроения, разрабатываемых и серийно изготавливаемых ФГБУН «СКБ САМИ» ДВО РАН.

Список литературы

1. Мироненко, М.В. Нелинейная просветная гидроакустика и средства морского приборостроения в создании дальневосточной радиогидроакустической системы освещения атмосферы, океана и земной коры, мониторинга их полей различной физической природы / М.В. Мироненко, А.Е. Малашенко, А.М. Василенко и др. – Владивосток: ФГБУН СКБ САМИ ДАО РАН, 2014. – 402 с.
2. Мироненко, М.В. Закономерности взаимодействия упругих и электромагнитных волн в морской воде // Подводные технологии – 2000: Междунар. симпоз. / М.В. Мироненко, В.И. Короченцев и др. – Япония, Токио, 2000. – С. 105–109.
3. Мироненко, М.В. Физико-математические основы метода «гидролокации на просвет»: сб. ст. Всерос. межвуз. нуч.-техн. конф. / М.В. Мироненко. – Владивосток: ТОВВМУ, 1996. – Вып. 3. – С. 88–91.

4. Стародубцев, П.А. Теоретические основы формирования просветных систем и перспективы развития морского приборостроения на Дальнем Востоке: монография / П.А. Стародубцев, М.В. Мироненко, В.А. Тахтеев, Е.П. Стародубцев, Е.В. Шевченко. – Владивосток: МГУ им. Г.И. Невельского, 2006. – 180 с.

5. Стародубцев, П.А. Научно-технические пути построения и эксплуатации широкомасштабных систем томографического наблюдения пространственно-временных характеристик гидрофизических полей морской среды: монография / П.А. Стародубцев, М.В. Мироненко, В.В. Карасев. – Владивосток: МГУ им. Г.И. Невельского, 2010. – 273 с.

6. Стародубцев, П.А. Метод низкочастотной гидроакустической томографии и измерительная система контроля морских акваторий: сб. тр. 11-й сессии РАО / П.А. Стародубцев, М.В. Мироненко, А.М. Мироненко (Василенко). – М.: ГЕОС, 2001. – С. 7–10.

7. Пат. Российская Федерация. Способ параметрического приема волн различной физической природы в морской среде / Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М. / СКБ САМИ ДВО РАН. – № 2453930 С1, от 11.10.2010.

8. Пат. Российская Федерация. Способ параметрического приема гидрофизических и геофизических волн в морской среде / Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М. – № 2550588 С1, от 18.02.2014.

Сведения об авторах: Мироненко Михаил Владимирович, доктор технических наук, профессор, e-mail: professor@mail.primorye.ru;

Стародубцев Павел Анатольевич, доктор технических наук, профессор, e-mail: spa1958@mail.ru;

Бакланов Евгений Николаевич, доцент, e-mail: baklanoven@mail.ru.