

УДК 551.465

**П.А. Стародубцев<sup>1</sup>, М.В. Мироненко<sup>1</sup>, Е.Н. Бакланов<sup>2</sup>, С.В. Шостак<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова,  
690006, г. Владивосток, Камский переулок, 6

<sup>2</sup>Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

<sup>3</sup>Дальневосточный федеральный университет,  
690600, г. Владивосток, о. Русский, кампус ДВФУ, корпус А

## **РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРЯЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В МОРСКОЙ СРЕДЕ**

*Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований для формирования просветных систем контроля обстановки и мониторинга пространственно-временных характеристик гидрофизических полей протяженных морских акваторий. Рассмотрены закономерности нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования просветных акустических волн с измеряемыми информационными волнами различной физической природы. Обоснованы практические пути дальнейшей передачи измеряемых информационных волн и сигналов связи в гидроакустических системах мониторинга и контроля морских акваторий, формируемых на основе технологий нелинейной просветной гидроакустики и средств морского приборостроения.*

**Ключевые слова:** нелинейная просветная гидроакустика, система мониторинга, нелинейное взаимодействие волн, пространственно-временные характеристики измеряемых волн, параметрическое преобразование волн различной физической природы, дальний параметрический прием, передача информации в морской среде.

## **P.A. Starodubtcev, M.V. Mironenko, E.N. Baklanov, S.V. Shostak RADIOHYDROACOUSTIC SYSTEM FOR CONTROL HYDROPHYSICAL FIELDS AND TRANSFER DATA MEASURED IN THE MARINE ENVIRONMENT**

*The article presents the results of theoretical and experimental studies for formation of luminal environment control systems and monitoring of spatial and temporal characteristics of the hydrophysical fields of extended sea areas. Regularities of nonlinear interaction of luminal and parametric conversion of acoustic waves with measurable information waves of different physical nature are shown. Grounded practical ways of measuring long-distance transmission of information waves and communication signals in sonar systems for monitoring and control of marine areas formed on the basis of non-linear luminal hydroacoustic technologies and means of maritime engineering.*

**Key words:** luminal nonlinear hydroacoustic, monitoring system, nonlinear interaction of the waves, spatial-temporal characteristics of the measured wave, parametric conversion waves of different physical nature, further parametric reception, transmission of information in the marine environment.

### **Введение**

В отличие от классических высокочастотных параметрических устройств излучения и приема сигналов, просветная система контроля морских акваторий, основанная на реализации закономерностей нелинейной акустики, представляет собой многоканальную широкомасштабную параметрическую антенну с низкочастотной подсветкой (накачкой) среды. Параметрическое взаимодействие просветных и информационных сигналов, а также преобразование их полями (или специальными излучениями) объектов происходит на всем пути их распространения в водной среде. Наиболее эффективное параметрическое взаимодействие осуществляется в сопутствующей движущимся объектам нелинейной области, которая имеет достаточно большие величины, например, в случае возмущения среды кильватерным следом она может составлять единицы кубических километров [1–3].

### Цель исследования

Данная работа решает задачу представления просветной гидроакустической системы мониторинга и контроля морских акваторий как протяженной параметрической, обеспечивающей дальний и сверхдальний параметрический прием и передачу информационных волн в морской среде.

Совместное распространение в нелинейной морской среде просветной звуковой волны с информационными волнами «малых амплитуд» сопровождается их взаимодействием и параметрическим преобразованием. Следует отметить также, что преобразование просветных акустических волн может осуществляться излучениями (волнами) различной физической природы (акустическими, электромагнитными, гидродинамическими). Результатом параметрического преобразования взаимодействующих волн является их взаимная амплитудно-фазовая модуляция. Сформированные в результате преобразования просветных волн параметрические составляющие суммарной и разностной частоты при обработке эффективно выделяются как признаки фазовой модуляции, что обосновано математическими зависимостями и подтверждено результатами морских экспериментов [4, 5].

**«Тройное» взаимодействие волн различной физической природы в нелинейной морской среде.** Известно, что характеристики гидрофизических полей морской среды различной физической природы, в которой распространяется гидроакустическая волна, влияют на ее параметры. Это связано с тем, что влияние гидрофизических полей осуществляется через изменение плотности и коэффициента упругости среды. По своей физической сущности изменение плотности водной среды в рабочей зоне параметрического приема является следствием воздействия на неё информационными полями. Изменения плотности среды при постоянной температуре приводит к изменению фазовой скорости звуковой волны в зоне взаимодействия электромагнитной волны с упругой морской. В отличие от классических уравнений гидродинамики для идеальной жидкости, которые используются в теории нелинейных параметрических излучателей, в уравнениях для нелинейной модулированной среды фазовая скорость упругой волны изменяется во времени и пространстве по закону изменения электромагнитной волны. Таким образом, если в рабочей зоне просветной параметрической системы распространяется электромагнитная волна гармонической частоты  $\Omega_{ЭМ}$ , то фазовая скорость упругой (просветной акустической) волны  $C_{(t)}$  также будет меняться с той же частотой  $\Omega_{ЗВ} = \Omega_{ЭМ}$ . Количественные характеристики глубины модуляции можно получить, используя инженерные модели реализации способа.

В работах [1–3] показано и экспериментально подтверждено, что любые низкочастотные волны, сформированные морскими источниками или стихийными явлениями, например, землетрясениями или цунами будут надежно зарегистрированы.

Морскими экспериментальными исследованиями обоснованы закономерность и эффективность «тройного» взаимодействия акустических просветных волн с акустическими и электромагнитными полями источников морской среды. Аналитический вид такого преобразования представляется следующим образом:

$$P^*(t) = 0,5P^2 \left\{ \begin{array}{l} J_0(m_p) \cos 2\omega_1 t + J_1(m_p) [\cos(2\omega_1 - \Omega)t - \cos(2\omega_1 + \Omega)t] + \\ + J_2\left(\frac{2A}{P}\right) [\cos(2\omega_1 - 2\Omega)t + \cos(2\omega_1 + 2\Omega)t] + \\ + J_3\left(\frac{2A}{P}\right) [\cos(2\omega_1 - 3\Omega)t - \cos(2\omega_1 + 3\Omega)t] + \dots \end{array} \right\},$$

где  $P^*(t)$ ,  $P(t)$  – результирующее модулированное и мгновенные значения просветной акустической волны;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – круговая частота акустической просветной и электромагнитной объектных волн;  $\Omega$  – низкочастотная акустическая волна от объекта;  $\varphi$  – начальная фаза просветной волны;  $t$  – текущее время;  $J_n$  – функции Бесселя  $n$ -го порядка;  $A_0$ ,  $A_m$  – амплитуды исходной и модулированных волн;  $m$  – коэффициент модуляции. Анализ этого выражения показывает, что спектр колебаний взаимодействующих волн состоит из бесконечного числа составляющих, расположенных симметрично относительно удвоенной центральной частоты  $2\omega$  (равной  $\omega_1 + \omega_2$ ), значения частот которых отличаются от  $2\omega$  на  $n\Omega$ , где  $n$  – любое целое число. Амплитуды  $n$ -х боковых составляющих будут определяться выражением  $J_n(2A_m/P) \cdot 0,5P^2$ .

Из него следует, что вклад различных боковых составляющих в суммарную мощность модулированного колебания определяется величиной  $2A_m/P$ . Причем при малых значениях коэффициента модуляции  $m_p$  спектр колебания состоит приблизительно из гармоник центральной частоты  $2\omega$  (суммарной) и двух боковых частот: верхней ( $2\omega + \Omega$ ) и нижней ( $2\omega - \Omega$ ).

Создаваемая просветная система мониторинга и передачи информации в морской среде формируется на основе технологий нелинейной гидроакустики и радиогидроакустических средств морского приборостроения, в этой связи она представлена как радиогидроакустическая [1]. Общий вид и состав контрольно-измерительного радиогидроакустического комплекса, используемого в системах контроля морских акваторий, показаны на рис. 1.

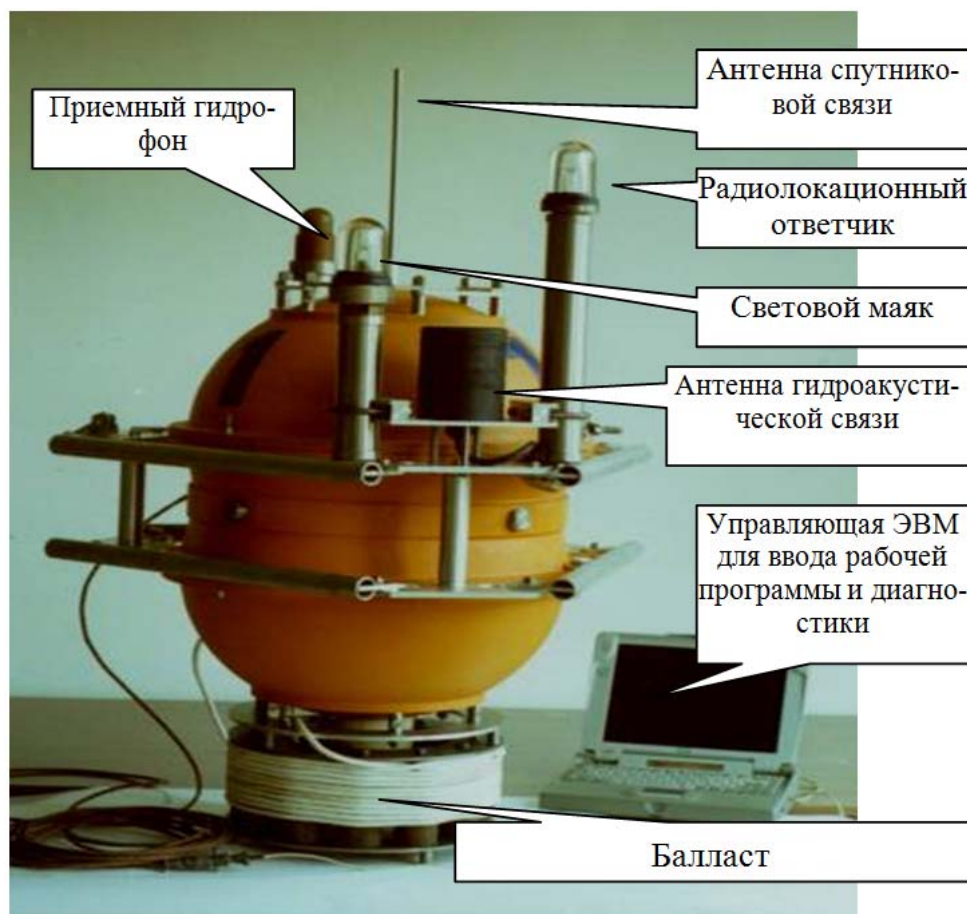


Рис. 1. Общий вид контрольно-измерительного радиогидроакустического комплекса  
Fig. 1. General view of monitoring-measuring radio-sonar system

Экспериментальные исследования были проведены в Татарском проливе Японского моря. В качестве приемной базы использовались радиогидроакустические буи (РГБ), связанные по радиоканалу с лабораторией судна. В качестве излучающей базы использовался излучатель, буксируемый другим судном, который озвучивал среду сигналами стабильной частоты 400 Гц. В этом эксперименте выполнены измерения спектральных характеристик шумов на шельфовой зоне, формируемых техническими объектами, расположенными в береговой зоне о. Сахалин. Протяженность просветной линии составляла около 350 км. Спектрограмма шумов и их усредненная амплитудная характеристика по трассе измерения приведены на рис. 2 и 3.

Экспериментальными исследованиями просветных параметрических систем подтверждена их эффективность. Информационные волны различной физической природы в диапазоне частот сотни – десятки – единицы – доли герца надежно принимаются и передаются на большие дистанции. На рис. 3 представлены акустические сигналы, формируемые возмущениями среды, создаваемыми корпусом движущегося судна, выделенные из принимаемого спектра частот на фоне гидродинамических излучений. Это доказывает, что морские источники могут быть обнаружены по признакам преобразования просветных акустических волн излучаемыми ими электромагнитными и упругими (акустическими и гидродинамическими) полями.

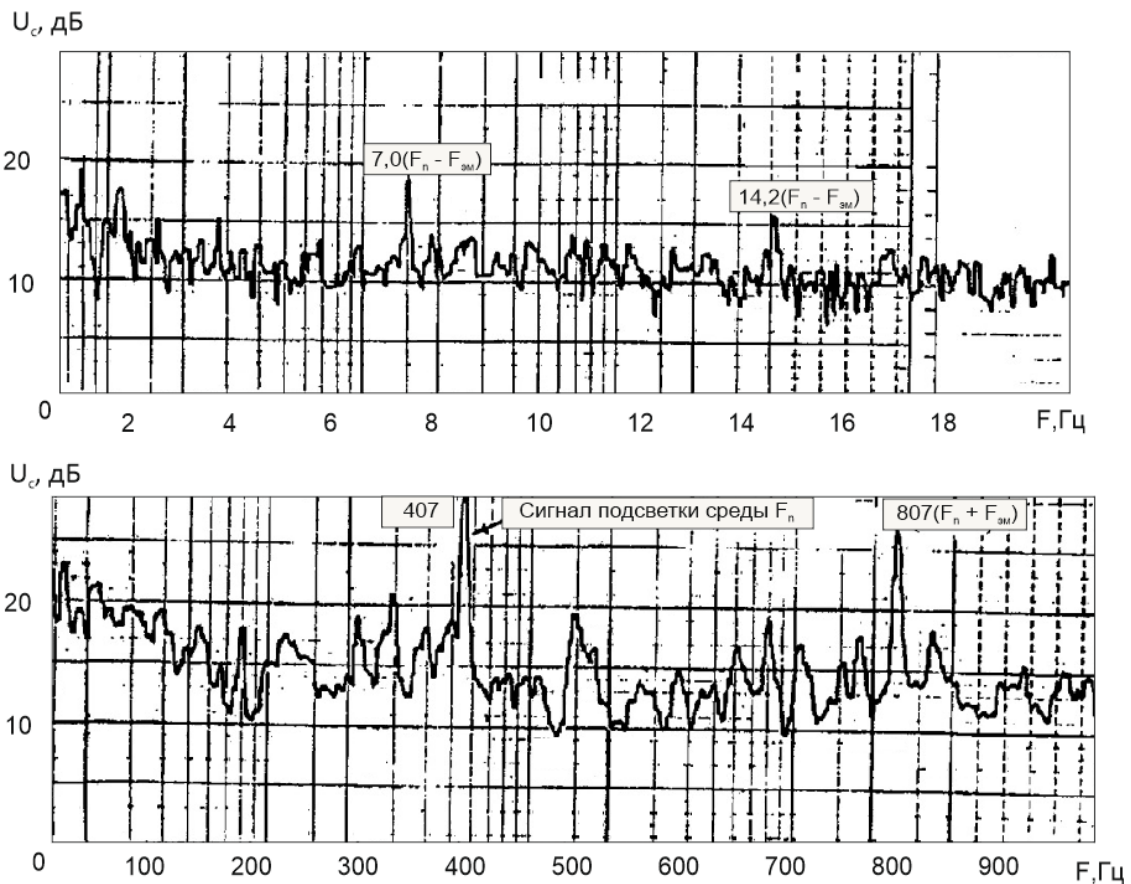


Рис. 2. Спектр электромагнитных излучений морского судна.  
 Параметрические измерения на трассе протяженностью около 350 км  
 Fig. 2. The spectrum of electromagnetic radiation of a marine vessel.  
 Parametric measurements on the 350 km track

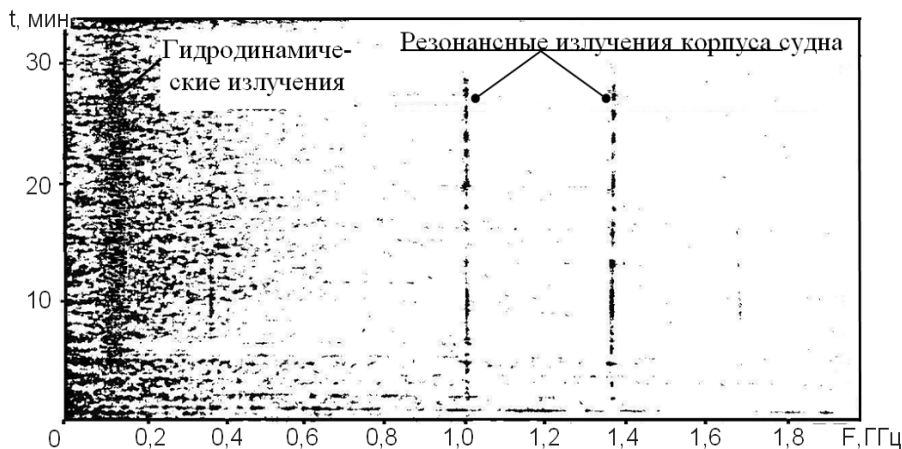


Рис. 3. Спектр шумового излучения морского судна. Параметрические измерения гидродинамических и акустических волн  
 Fig. 3. Spectrum of the noise emission of a marine vessel. Parametric measurements of hydrodynamic and acoustic waves

Морские эксперименты подтверждают эффективность просветного метода, построенного на использовании многолучевой параметрической антенны, соизмеримой с протяженностью контролируемой акватории. Параметрический приём акустических и электромагнитных полей судна (рис. 4) позволяет выделить информационные сигналы обнаруживаемых объектов на дистанциях в десятки и сотни километров.

Пример дальней передачи информационных сообщений (например, сигналов бедствия) в морской среде посредством акустических и электромагнитных излучений показан на рис. 5.

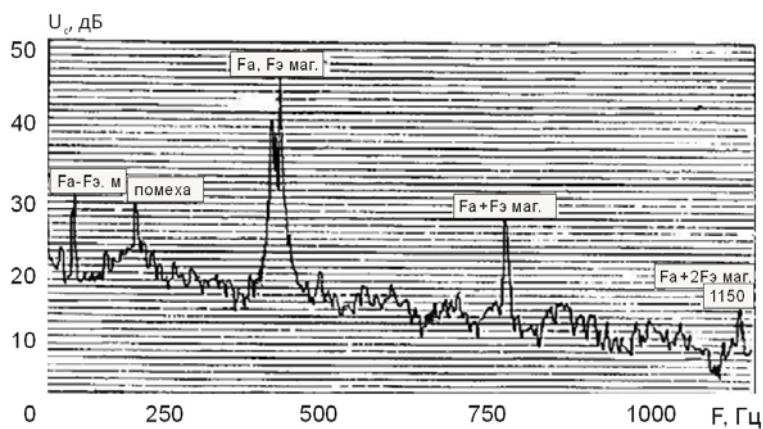


Рис. 4. Спектр просветных волн, модулированных электромагнитными излучениями морского судна  
 Fig. 4. Spectrum luminal waves modulated electromagnetic radiation of a sea ship

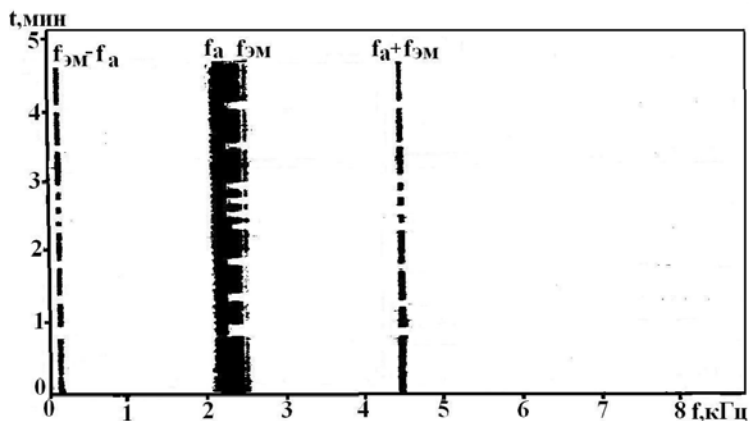


Рис. 5. Пример дальней передачи информационных электромагнитных волн в морской среде методом просветной гидроакустики (передача сигналов «SOS»)  
 Fig. 5. Example of long-distance transmission of information of electromagnetic waves in the marine environment by luminal hydroacoustics (signaling «SOS»)

## Выводы

Таким образом, можно заключить, что применение просветных приемопередающих параметрических систем, сформированных с использованием закономерностей и измерительных технологий нелинейной просветной гидроакустики, является обоснованным и эффективным при мониторинге морской среды и передаче информации. Макеты просветных параметрических систем приема и передачи информационных сообщений прошли испытания и подтверждают эффективность дальнего параметрического приема-передачи информационных волн различной физической природы на дистанциях до сотен километров в диапазоне сотни – десятки – единицы – доли герца.

## Список литературы

1. Стародубцев, П.А. Теоретические основы формирования просветных систем и перспективы развития морского приборостроения на Дальнем Востоке: монография / П.А. Стародубцев, М.В. Мироненко и др. – Владивосток: МГУ им. Г.И. Невельского, 2006. – 180 с.
2. Мироненко, М.В. Закономерности взаимодействия упругих и электромагнитных волн в морской воде / М.В. Мироненко, В.И. Короченцев // Международный симпозиум «Подводные технологии – 2000». Япония, Токио, май 2000. – С. 105–109.
3. 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.
4. Пат. РФ RU 2453930 С1 от 11.10.2010. Способ параметрического приема волн различной физической природы в морской среде / Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М..
5. Пат. РФ RU 2472236 С1 от 15.06.2011. Способ передачи информационных волн в морской среде / Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Корытко А.С.

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

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

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

Шостак Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, e-mail: servash@mail.ru.