



Издается с 2008 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Корчак В.Ю.</i> К 60-летию Секции прикладных проблем при Президиуме РАН	4
Статьи	
<i>Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Якушенко Е.И.</i> Компьютерные технологии корабельной гидромеханики: состояние и перспективы	8
<i>Родионов А.А., Хантулева Т.А.</i> Нелокальная гидродинамика и ее приложения	22
<i>Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р.</i> Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: современные технологии и перспективы	37
<i>Коваленко В.В., Корчак В.Ю., Чулков В.Л.</i> Концепция и ключевые технологии подводного наблюдения в условиях сетецентрических войн	49
<i>Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С., Чулков В.Л.</i> Апертурный синтез гидроакустических антенн – основа мобильных гидроакустических систем наблюдения	65
<i>Тарасов С.П., Воронин В.А.</i> Перспективы применения методов нелинейной акустики в технологиях гидроакустического поиска	78
<i>Белогубцев Е.С., Кирюхин А.В., Кузнецов Г.Н., Михайлов С.Г., Пудовкин А.А., Смагин Д.А., Федоров В.А.</i> Проблемы и предварительные результаты испытания систем активного гашения низкочастотных сигналов в водной и воздушной среде	93
<i>Иванов М.П., Степанов Б.Г.</i> Исследование акустического биосенсора дельфина и возможности построения его технического аналога	108
<i>Стародубцев Ю.Д., Надолишняя А.П.</i> История, современное состояние и перспективы служебного использования китообразных в составе биотехнических систем двойного назначения	123
Перспективные направления развития науки и техники	
<i>Арсентьев В.Г., Криволапов Г.И.</i> Некоторые результаты реализации подводных сетевых технологий в СибГУТИ	129
Конференции	135
Поздравляем!	138
Хроника	140
Правила представления материалов в редакцию.....	142

CONTENTS

<i>Korchak V.Yu.</i> To the 60-th Anniversary of Section of Applied Problems at Presidium of RAS	4
--	---

Articles

<i>Guriev U.V., Tkachenko I.V., Ykushenko E.I.</i> Computer Technologies in Marine Hydrodynamics: State-of-the-Art and Perspectives	8
---	---

The basic stages and perspective directions of marine hydrodynamics development are considered. Efficiency of computer technologies in hydrodynamic and engineering analysis is demonstrated. Necessity of their wider use in shipbuilding is substantiated.

Key words: computer-aided technologies, marine hydromechanics, mathematical and physical experiments, multidisciplinary modeling.

<i>Rodionov A.A., Khantuleva T.A.</i> Nonlocal Hydrodynamics and Its Applications	22
---	----

Modern problems of science and engineering lead outside the scope of continuum mechanics. In order to solve the problems a new nonlocal hydrodynamics of nonequilibrium processes had been developed on the base of statistical mechanics using methods of nonlinear operator sets and adaptive control. The allowance for self-organization and selfregulation provides the mathematical model to be completed and results discrete structure spectra and structure transitions in a system. Application of the new approach to problems of flow and wave propagation in condensed media allows the description of the observed effects that have no explanation in the framework of the classical hydrodynamics.

Key words: nonequilibrium process, nonlocality, memory, selforganization, structure, multi-scaling, control..

<i>Kuzmitsky M., Gizitdinova M.</i> Mobile Underwater Robots for the Navy Tasks: Modern Technologies and Prospects	37
--	----

In the article the state-of-the-art review of prospects of mobile underwater robots using for solving some naval problems is resulted: MCM, surveys, ports, harbors and sea borders protection, targeting and underwater surveillance. Possible technologies of the specified problems solving using mobile underwater robotics are considered.

Key words: mobile underwater robot, technical shape, mission, energy source, carriers, problems, technologies.

<i>Kovalenko V.V., Korchak V.J., Chulkov V.L.</i> Concepts and Key Technologies of Underwater Surveillance Systems in Networked Centric Warfare	49
---	----

This paper presents the concept of creation and main features of integrated networked underwater surveillance systems. Several key aspects of such systems variants creation and their features are discussed.

Key words: net-centric warfare; integrated networked underwater surveillance system; sensor networks; distributed network system.

<i>Dashevsky O.Yu., Nejevenko E.S., Chulkov V.L.</i> Sonar Array Aperture Synthesis as a Foundation for Mobile Surveillance Sonar Systems	65
---	----

The paper analyzes the most effective aperture synthesis methods in hydroacoustics. A synthesis method for wide-band signals is suggested. A SynApp program developed for comparative analysis of different methods is described. The results of an experimental study with test signals (generated by the program) and real signals (obtained from a real towed array) are presented. Aperture synthesis availability in hydroacoustics is concluded.

Key words: hydroacoustics, synthetic aperture, flexible underwater towed array, wide-band acoustic signals, real signals.

<i>Tarasov S.P., Voronin V.A.</i> Prospects of Application of Nonlinear Acoustics Methods in Hydroacoustic Search Technologies	78
--	----

In the report the results of theoretical and experimental researches of the nonlinear phenomena in acoustics are discussed. It is shown, that using of these phenomena allows to create sonar devices and integrated systems for underwater and buried objects search, underwater surveillance, mineral and biological resources exploration, ocean environment monitoring. Characteristics of parametrical devices are discussed and results of their applications for solving various problems of hydroacoustics are considered. Ways of sonar means perfection and

principles of their construction using methods of nonlinear acoustics are discussed.

Key words: nonlinear phenomena, nonlinear interaction, parametrical arrays, beam pattern.

Belogubtsev E.S., Kirukhin A.V., Kuznetsov G.N., Mikhailov S.G., Pudovkin A.A., Smagin D.A., Fedorov V.A. Testing of Low Frequency Water and Air Sound Active Cancellation Techniques: Problems and Preliminary Results 93

Active control of low frequency sound vibration is considered. The necessity of solving this problem by active means in consequence of low cancellation effectiveness of passive techniques and means for signals on low frequencies is concluded. The algorithms and techniques development results are discussed for active cancellation of sound signals in water and air medium. The importance of solving this problem to ensure sea objects stealth and maintenance staff environmental safety is concluded. The real opportunity to cancel low frequency discreet components on not less then 8–15 dB and to reduce wide band level on not less then 6...8 dB is demonstrated. It is denoted that discreet frequency components cancellation both increase objects latency hiding and falsify objects classification characteristics.

Key words: Object ADT (armament and defense technology), Active cancelling of inner and outer noises, perceptibility decrease, environmental safety support, discreet receiving and radiating elements, falsification of classification characteristics, designer alternative.

Ivanov M.P., Stepanov B.G. Study of the Dolphin Acoustic Biosonar and Feasibility of Constructing Its Technical Analogue 108

Presented below are the results of experimental studies of the biosensor system of dolphins using acoustic channel for search and identification of underwater objects as well as for orientation in three dimensional space and underwater communications between individuals. The dolphin's (*Tursiops truncatus*) sonar functioning in complicated conditions of acoustic noise of the dolphin sonar is analyzed. It is shown that the basic mechanisms that provide noise immunity of the dolphin sonar are: the radiation of broadband pulses with zero carrier, use of burst (accumulation), burst rate variable repetition (time selection), and burst with interval-time coding. Possible ways of constructing of broadband underwater transducers and arrays capable to radiate acoustic signals similar to echolocation impulses of cetaceans are considered. Analyzed in the paper is functioning of two electrically operated models of broadband transducers: rod with phased excitation of sections and waveguide type transducer in the form of a coaxial set of piezoactive rings. Some results of solving synthesis and analysis problems for the above models of transducers are presented. It is shown that these transducers provide bandwidth, respectively, 1.5–2 octaves and 2–3 octaves and more.

Key words: echolocation signals, the analysis and synthesis of broadband signals, noise immunity, broadband signal, signal without carrier, wideband underwater transducer.

Starodubtsev Yu.D., Nadolishnyaya A.P. History, State-of-the-Art and Perspectives of the Cetaceans Use as a Part of Biotechnical Dual-Purpose Systems 123

Here we present the history of using marine mammals (MM) as humans' assistants, the place and time of the Soviet Navy Aquarium creation, the main tasks of Lomonosov Moscow State University (MSU) involved into the research of dolphins' abilities. We describe the biotechnical system for the underwater search (UwS) creation by MSU, about the active work of the USA on using MM. It is shown that the effectiveness and the economy of UwS using MM is much higher than using divers and technical means. The forecast of biotechnical systems development perspectives is given, and the necessity of creation of the Federal base for working with MM in Russia is pointed out.

Key words: marine mammals, aquarium, oceanarium, office use, biotechnical systems, underwater search, echolocation, training animals, cognitive activities of animals.

Perspective Tendency of Development of Science and Technics

Arsentiev V.G., Krivolapov G.I. Some Results of Undersea Networks Technologies Realization in SibSUTIS 129

This article represents some results, achieved in Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences (SibSUTIS) in research of networks for underwater monitoring. Also, this article reports development and small series manufacturing of the range of unified underwater communication, control and navigation modules. These modules are needed for work in the near-field zone. Now they are used in the University experimental researches in the field of underwater networks technologies. These modules can be used as basis for solution of wide class of underwater researching and manufacturing problems.

Key words: underwater network technologies, underwater communication, control, navigation.

УДК 534.222

© С.П.Тарасов, В.А.Воронин, 2011

Технологический институт Южного федерального университета в г.Таганроге
 tarasov@fep.tti.sfedu.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОИСКА

Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований нелинейных явлений в акустике. Показано, что использование этих явлений позволяет создавать гидроакустические приборы и комплексы для поиска подводных и заиленных объектов, подводного наблюдения, разведки минеральных и биологических ресурсов, мониторинга океанской среды. Приводятся характеристики параметрических приборов и рассматриваются результаты их применений для решения различных задач гидроакустики. Обсуждаются пути совершенствования и принципы построения гидроакустических средств, использующих методы нелинейной акустики.

Ключевые слова: нелинейные явления, нелинейное взаимодействие, параметрические антенны, характеристика направленности.

Проблемы изучения морских глубин, задачи поиска различных подводных объектов, разведки полезных ископаемых на дне Мирового океана, оценки биологических ресурсов, обследования подводных инженерных сооружений и т.д. – все это требует разработки специальных методов и средств подводного наблюдения. Все более жесткие требования предъявляются к гидроакустической аппаратуре, все чаще трудоемкие и дорогостоящие методы непосредственного измерения физических характеристик заменяются более дешевыми и требующими меньших временных затрат гидроакустическими методами.

Перспективным направлением в гидроакустике для решения многих прикладных задач представляется разработка аппаратуры, действующей по принципу нелинейного взаимодействия акустических волн. Использование приборов с параметрическими излучающими антеннами, обладающими высокой направленностью при малых размерах, низким уровнем бокового излучения, широким диапазоном излучаемых частот с постоянной направленностью, позволяет более эффективно решать большое число задач подводного поиска.

В статье рассматриваются возможности решения отдельных проблем подводного поиска и исследований с использованием параметрической гидроакустической аппаратуры.

Для описания процессов нелинейного взаимодействия акустических волн используются различные математические модели, в том числе модели на основе решения уравнения Хохлова–Заболотской–Кузнецова [1]. Для амплитуды акустического давления сигнала разностной частоты оно записывается в виде [1–3]

$$P_- = \frac{P_{01}P_{02}\varepsilon\Omega^2 a^2}{8c_0^4\rho_0 \exp(z/L_3)} i \int_0^{z_3} \frac{\exp\left[-y - \frac{r_w^2(1+iBy)}{d + (y-z_3) + yz_3B}\right]}{d + i(y-z_3) + yz_3B} dy,$$

где $P_{01}P_{02}$ – амплитуды давления волн накачки у поверхности антенны; ϵ – нелинейный параметр; $\Omega = 2\pi F_-$ – разностная частота; a – апертура излучателя накачки; $L_3 = 1/\alpha$; α – коэффициент затухания волн разностной частоты; $z_3 = z/l_3$; z – координата вдоль распространения волн; $l_3 = 1/\alpha_{1,2}$; $\alpha_{1,2}$ – коэффициенты затухания волн накачки; $d = L_D/l_3$; $B = L_D l_3/l_{D1} l_{D2}$; $r_w^2 = 2r^2 L_D / a^2 l_3$; $L_D = a^2 \Omega / 4c_0$; $l_{D1}, l_{D2} = a^2 \omega_{1,2} / 2c_0$; r – поперечная координата.

Данное равенство позволяет рассчитать амплитуду звукового давления в любой точке пространства при разных параметрах антенны и сигнала. Одним из важнейших достоинств параметрической антенны является высокая направленность с низким уровнем бокового поля, одинаковая в широком диапазоне частот. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены диаграммы направленности антенны накачки, состоящей из 256 пьезоэлементов, на частоте накачки 230 кГц и диаграммы направленности параметрической антенны на разностных частотах – 40, 20 и 2.5 кГц. Ширина характеристики направленности составляет 4 град. По уровню –3 дБ на всех частотах уровень боковых лепестков ниже –30 дБ. Размер активной поверхности антенны не превышает 15 см, что позволяет установить ее на подводном аппарате.

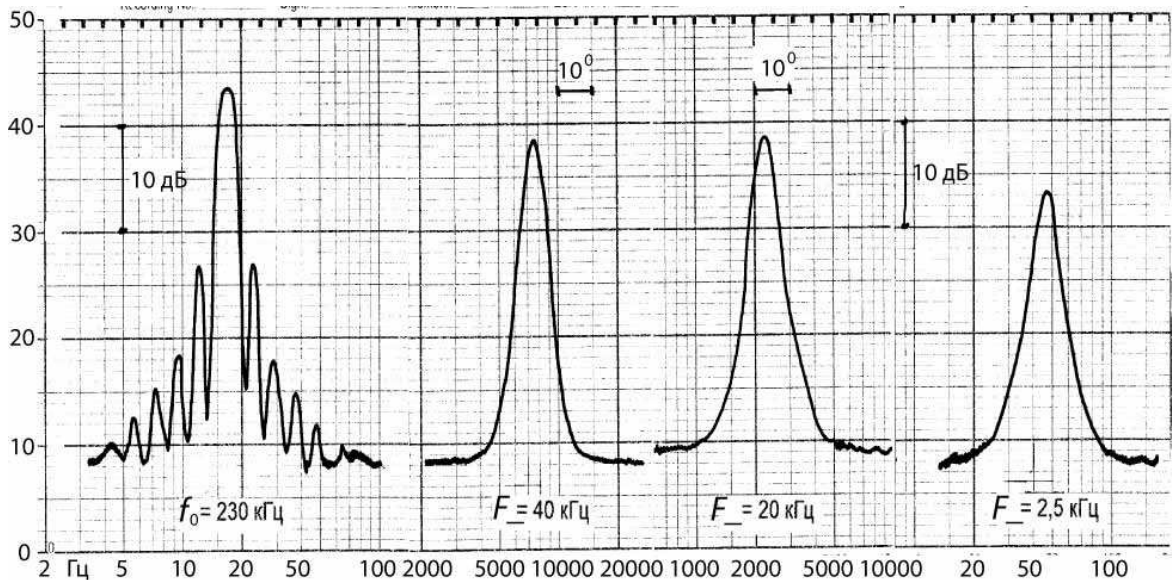


Рис. 1. Диаграммы направленности антенны накачки и параметрической антенны на разностных частотах – 40, 20 и 25 кГц.

К основным проблемам обнаружения подводных объектов на мелководье и вблизи поверхности относится наличие интенсивных реверберационных и шумовых помех. Выражение для расчета энергетических характеристик параметрического гидролокатора с учетом шумовой помехи, объемной и поверхностной реверберации получено в виде [3]

$$W_a = \frac{2\delta P_{\text{по}} 10^3 l_{D1} l_{D2} \cdot \frac{1}{F_-^2 \alpha L_D \gamma_{\text{изл}} \rho c \sqrt{\gamma_{\text{пр}} \tau}}}{\frac{I(B, y)}{10^{0.05\beta x} e^{x/L_3}} \left[\left(\frac{R_3}{2x} \right)^2 - \left(\delta \sqrt{\frac{\alpha_{\text{оп}} \eta_{\text{оп}} c \tau}{2\gamma_{\text{изл}}}} \right)^2 - \left(\frac{\delta}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{\text{пр}} h \eta_{\text{пр}} c \tau}{x \gamma_{\text{изл}}}} \right)^2 \right]^{1/2}},$$

где δ – отношение сигнал-помеха; $P_{\text{по}}$ – уровень шумовой помехи; $F_- = \Omega / 2\pi$; $\alpha = (\gamma + 1) / 4\rho_0 c_0^3$; $\gamma_{\text{изл}}$ – коэффициент концентрации в режиме излучения; $\gamma_{\text{пр}}$ – коэффициент кон-

центрации в режиме приема; τ – длительность импульса; $I(B, y)$ – интеграл, описывающий процесс нелинейной генерации; R_s – радиус эквивалентной сферы; α_{op} , α_{np} – коэффициенты объемной и поверхностной реверберации; η_{op} , η_{np} – коэффициенты взаимной направленности; β – коэффициент затухания; W_a – акустическая мощность по каждой из частот накачки; x – расстояние до цели; h – толщина приповерхностного слоя.

В соответствии с этим выражением можно рассчитать акустическую мощность по каждому каналу параметрической антенны, необходимую для того, чтобы в условиях шумовой и реверберационной помех обеспечить заданную дальность обнаружения.

В качестве примера рассмотрим параметрический гидролокатор, работающий на частоте 50 кГц при частотах накачки 250 и 300 кГц с шириной характеристики направленности по уровню -3 дБ 6° в режиме излучения и 40° в режиме приема (размеры каждой антенны не более 7 см), который используется для поиска подводных целей вблизи поверхности. Полоса пропускания приемного тракта гидролокатора взята достаточно широкой (1 кГц), с учетом возможного смещения частоты из-за эффекта Доплера при движении носителя.

На рис. 2 приведены зависимости отношения сигнал–помеха δ от излучаемой по каждой частоте накачки акустической мощности при обнаружении одиночной цели с $R_s = 0.1$ м на расстоянии 150 м, длительность зондирующего сигнала составляет 1 мс. Результаты расчетов представлены таким образом, что можно проследить влияние акустической мощности на каждую из компонент принятого сигнала. При учете влияния только объемной либо только поверхностной реверберации (кривые 1 и 2 соответственно) отношение сигнал–шум не зависит от излучаемой мощности. Величина отношения сигнал–помеха ограничена определенным значением в зависимости от коэффициента объемной и поверхностной реверберации, в данном случае $\alpha_{op} = 10^{-6}$ 1/м, $\alpha_{np}h = 10^{-3}$. Влияние на отношение сигнал–помеха только шумовой помехи величиной $P_{по} = 0.01$ Па представлено кривой 3. Естественно, чем больше интенсивность зондирующего сигнала, тем отношение сигнал–помеха больше. Воздействие одновременно шумовой помехи и объемной реверберации характеризуется кривой 4, которая в пределе стремится к уровню сигнал–помеха, определяемому интенсивностью объемной реверберации. Одновременное воздействие шумовой помехи и поверхностной реверберации описывается кривой 5, а результат одновременного воздействия шума, объемной и поверхностной реверберации – кривой 6. Воздействие всех видов помех снижает пороговое отношение сигнал–помеха. Начиная с определенного уровня, увеличение излучаемой мощности не приводит к увеличению отношения сигнал–помеха из-за роста реверберационных помех.

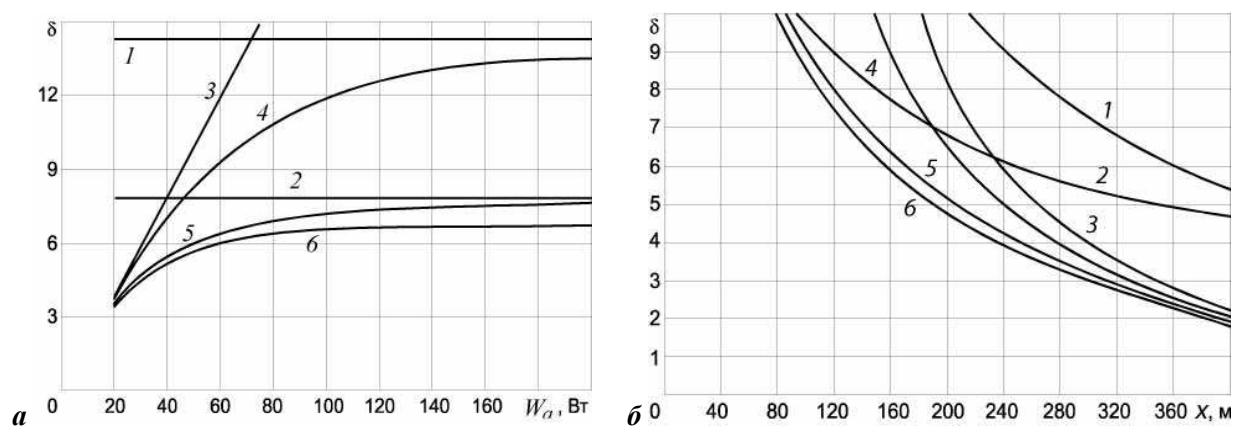


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал–помеха от мощности на частотах накачки (а) и от расстояния обнаружения (б).

Характеристики обнаружения в присутствии помех изменяются в зависимости от расстояния, на котором находится цель. На рис. 2, б представлены зависимости отношения сигнал–помеха δ от расстояния обнаружения подводного объекта с $R_3 = 0.1$ м при акустической мощности 70 Вт, излучаемой по каждой из частот накачки. Влияние отдельно объемной реверберации с $\alpha_{op} = 10^{-6}$ 1/м, поверхностной реверберации с $\alpha_{пр}h = 10^{-3}$ и шума с уровнем $P_{по} = 0,01$ Па представлено кривыми 1, 2 и 3 соответственно. Отношение сигнал–помеха падает при совместном воздействии шума и объемной реверберации (кривая 4), шума и поверхностной реверберации (кривая 5). При воздействии всех видов помех (кривая б) отношение сигнал–помеха принимает наименьшее значение на всех расстояниях и характеризует возможность обнаружения цели с заданным соотношением сигнал–помеха.

Зависимости рассчитаны с учетом влияния доплеровского смещения частоты за счет движения, что приводит к необходимости расширения полосы пропускания приемного тракта и соответственно снижает помехоустойчивость и дальность действия. Сужение полосы и увеличение длительности зондирующих сигналов существенно увеличат дальность обнаружения, но при этом необходимо либо подстраивать по частоте приемный тракт, либо менять излучаемую частоту таким образом, чтобы частота эхо-сигнала находилась в пределах полосы пропускания приемного тракта, т.е. создать некую адаптивную систему. Применение широкополосных параметрических излучающих антенн предоставляет такую возможность и позволяет регулировать параметры излучаемого сигнала в соответствии с изменением параметров движения.

Проблема обнаружения лежащих на морском дне и под слоем донного грунта объектов, таких как нефте- и газопроводы, кабели, контейнеры различного вида с опасными для окружающей среды веществами, оказывается чрезвычайно сложной. Поиск указанных целей с помощью гидроакустических средств всегда сопровождается большим количеством ложных тревог, вызванных отражениями от неровностей и неоднородностей морского дна и придонных слоев, камней и пр. Эхо-сигналы от заиленного объекта, как правило, наблюдаются на фоне сильных отражений от морского дна, которые в ряде случаев полностью маскируют полезный сигнал. Обнаружение объектов в грунте всегда связано с большими потерями акустической энергии за счет затухания звука в донных структурах и отражения от границы раздела вода–грунт. Задача усложняется еще и тем, что помимо значительного уровня помех в виде отражений от дна и донной реверберации существенный вклад в снижение вероятности правильного обнаружения вносит объемная реверберация в грунте.

Для уровня давления объемной реверберации в грунте получено выражение [3]

$$P_{op} = \frac{P_-(x)Q}{10^{0.05\beta_x + 0.1\beta_{пр} \cdot x_1}} \sqrt{\frac{2\alpha_{op}\eta_{op}\tau c}{\gamma_{изл}}},$$

где α_{op} – коэффициент объемного рассеяния в грунте; η_{op} – коэффициент взаимной направленности для объемной реверберации в грунте; Q – произведение коэффициентов отражения и прохождения волн на границах слоев.

На основе уравнения гидролокации получено выражение для определения отношения сигнал–помеха при обнаружении заиленных объектов с помощью параметрического гидролокатора:

$$\delta = \frac{P_-(x)R_3 Q}{2(x + x_1)10^{0.05\beta_x + 0.1\beta_{пр} \cdot x_1} \sqrt{\frac{P_-^2(x)Q^2}{10^{0.1\beta_x + 0.2\beta_{пр} \cdot x_1}} \cdot \frac{2\alpha_{op}\eta_{op}\tau c}{\gamma_{изл}} + \frac{P_{по}^2 10^6}{F^2 \tau \gamma_{пр}} + \frac{P_-^2(x)}{4 \cdot 10^{\beta_x}} \cdot \frac{\alpha_{др}\tau c \eta \sin\theta}{x \gamma_{изл}}}},$$

где η – коэффициент взаимной направленности для донной реверберации; x_1 – толщина слоя грунта; β_x – затухание в воде; $\beta_{гр}$ – коэффициент затухания в грунте.

Данное выражение учитывает потери при отражении от донной поверхности, затухание в грунте, а также влияние шумовой помехи, донной и объемной реверберации в грунте.

Особенностью аппаратуры поиска затонувших объектов является ограничение диапазона рабочих частот: сверху – ростом коэффициента затухания в грунте с частотой, снизу – явлениями дифракции, а также необходимостью существенного увеличения габаритов, веса, мощностей аппаратуры с понижением частоты.

В качестве примера приведены результаты расчетов отношения сигнал–помеха в зависимости от глубины обнаружения объекта с $R_3 = 0.2$ м в грунте типа глины с помощью параметрического гидролокатора, работающего в диапазоне разностных частот 3–10 кГц с частотами накачки 100 кГц. Акустическая мощность по каждой из частот накачки составляет 3000 Вт, длительность зондирующего импульса 1 мс, ширина характеристики направленности по уровню -3 дБ в режиме излучения 2° . Размеры излучающей и приемной антенн одинаковы и составляют 0.45 м в диаметре.

На рис. 3, а представлена зависимость отношения сигнал–помеха от глубины обнаружения объекта в грунте на частотах 3, 4, 5, 6, 8, 10 кГц. Уровень шумовой помехи составляет $P_{по} = 0.01$ Па, коэффициент донной реверберации $\alpha_{др} = 10^{-3}$; уровень объемной реверберации в грунте считается настолько малым, что ее влияние не учитывается. Чем больше величина заглубления объекта в донных осадках, тем на более низких частотах удастся получить заданное отношение сигнал–помеха. При малых заглублениях наибольшее отношение сигнал/помеха достигается на тех частотах, где выше эффективность преобразования энергии волн накачки в энергию волн разностной частоты. Это приводит к тому, что одинаковых характеристик обнаружения можно достичь на разных частотах; например, при толщине донного грунта 5 м одинаковые отношения сигнал–помеха $\delta = 9$ можно получить на частотах 5 и 10 кГц. При заглублениях в грунте на 9 м одинаковое значение отношения сигнал–помеха, равное 3, будет на частотах 4 и 8 кГц. Очевидно, с целью увеличения разрешающей способности выгоднее использовать более высокие частоты.

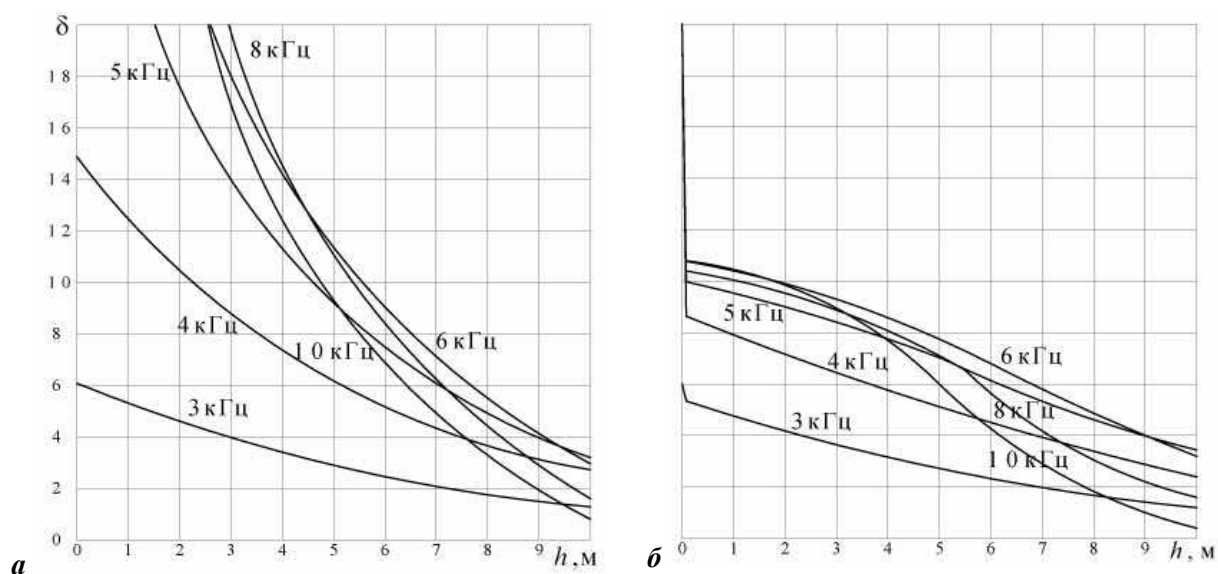


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал–помеха от глубины залегания объекта в донном грунте для различных разностных частот.

На рис. 3, б представлены аналогичные зависимости, но с учетом объемной реверберации в грунте (коэффициент объемного рассеяния в грунте равен $\alpha_{op} = 10^{-4}$). Значения отношения сигнал–помеха существенно снизились. Особенно это заметно для небольших заглоблений объектов в грунт и более высоких частот.

Таким образом, учет объемной реверберации в грунте позволяет более адекватно оценить вероятность обнаружения заиленного объекта и определить необходимые параметры аппаратуры и сигнала.

Задачи разведки полезных ископаемых на дне Мирового океана, необходимость обследования различных подводных объектов, инженерных сооружений, нефте- и газопроводов, кабелей, проложенных по дну водоемов, опор мостов и т.д. требуют разработки специальных методов и средств наблюдения на морском дне и в толще донного грунта.

Гидроакустическая аппаратура для исследования морского дна должна позволять не только фиксировать с высоким разрешением состояние, структуру, рельеф дна водоемов, но и получать сведения о свойствах, физических характеристиках и составе донного грунта.

Тонкая структура придонных осадков традиционно изучается с помощью технологий сейсмопрофилирования. Недостатком обычных широкополосных профилографов является то, что на разных частотах они «озвучивают» различный объем среды, в результате чего физические характеристики грунтов, определяемые по отраженным сигналам на разных частотах, несопоставимы, так как они соответствуют различным объемам осадков.

Перспективным направлением для решения задач исследования донных осадочных структур является использование методов нелинейной гидроакустики, реализуемых с помощью параметрических систем [3]. Высокая направленность параметрических антенн при излучении низких, хорошо проникающих в грунт частот позволяет добиться хорошего разрешения и за счет этого получить детальную информацию об изучаемом участке. В силу своей широкополосности параметрический профилограф способен адаптивно решать задачу профилирования донных отложений, позволяя выбрать оптимальную рабочую частоту в зависимости от вида и типа донного грунта. При этом «озвученный» объем на разных частотах одинаков благодаря свойству постоянства характеристики направленности в широком частотном диапазоне [3, 4].

Методы классификации донных осадков могут быть основаны как на физической модели отражения, преломления, рефракции волн в слоистой среде, так и на выделении статистических параметров из акустических сигналов.

Для определения типа донных осадков необходимо знать их физические характеристики, такие как плотность, скорость звука и др. Акустический импеданс приповерхностного слоя донных осадков можно определить по амплитудным коэффициентам отражения. Методика основана на эмпирически установленной зависимости импеданса от коэффициента отражения и литологии морских осадков. По коэффициенту отражения

$$R = (\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1) / (\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)$$

от границы вода–дно и импедансу морской воды $z_1 = \rho_1 c_1$ можно вычислить импеданс в поверхностном слое морских осадков:

$$z_2 = \rho_2 c_2 = \rho_1 c_1 (1 + R) / (1 - R).$$

Поскольку по коэффициенту отражения акустических волн можно фактически определить лишь произведение плотности на скорость звука, то задача сводится к измерению скорости звука в донных осадках дистанционным методом.

Определение скорости в однородном слое, залегающем в разрезе произвольного строения, а также толщины этого слоя без предварительных знаний о среде, находящейся над этим слоем, можно осуществить методом отраженных волн при наклонном паде-

нии луча, если положить, что скорость звука над исследуемым слоем зависит только от глубины. В этом случае траектория луча характеризуется фиксированным лучевым параметром p , получаемым из закона Снеллиуса:

$$p = \frac{\sin\theta(z, p)}{c(z)},$$

где z – глубина; $c(z)$ – профиль скорости звука; $\theta(z, p)$ – угол между лучом, характеризующим параметром p , и вертикалью на глубине z .

Время распространения t и горизонтальное расстояние x , соответствующие траектории луча с параметром p , можно определить через интегралы по траектории луча. На практике величины t и x известны для некоторой области значений p , поэтому полученные уравнения должны быть решены относительно профиля скорости $c(z)$.

Для однородного слоя, ограниченного горизонтальными отражающими границами на глубинах z_1 и $z_1+\Delta z$, задание лучевого параметра p полностью определяет ход лучей, отраженных от каждой из границ. Действительно, над границей слоя с координатой z_1 оба луча всюду параллельны друг другу. Разности времен пробега Δt и горизонтальных расстояний Δx , проходимых этими двумя лучами, находятся из уравнений [6]:

$$\Delta t(p) = 2 \int_{z_1}^{z_1+\Delta z} c^{-1}(1-p^2c^2)^{-1/2} dz,$$

$$\Delta x(p) = \int_{z_1}^{z_1+\Delta z} pc(1-p^2c^2)^{1/2} dz,$$

в которые множитель 2 введен для учета полного пути отраженного луча. Если внутри слоя скорость c_1 постоянна, интегралы берутся непосредственно. Тогда толщина слоя Δz и скорость звука в слое c_1 определяются по формулам

$$c_1 = \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}}, \quad \Delta z = \frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot \Delta t \cdot \sqrt{1-p^2c^2},$$

где Δx – расстояние между приходом отраженных лучей от верхней и нижней границ слоя; Δt – разность времен между приходом отраженных лучей от верхней границы.

Из приведенных выражений видно, что благодаря выбору определенных лучей структура среды, находящейся над рассматриваемым слоем, из рассмотрения исключается.

Для реализации метода необходима антенна с высокой направленностью низкочастотного луча и возможностью электронного сканирования характеристики направленности. Такие возможности предоставляются при использовании параметрической антенны. Основным элементом последней является антенна накачки, представляющая собой антенную решетку, которая состоит из двух подрешеток, состоящих из элементов с разными резонансными частотами. Подрешетки вставлены друг в друга так, что элементы располагаются в порядке чередования типов. На рис. 4 представлена антенна накачки круглой формы параметрического профилографа в обтекателе. Справа на рисунке представлена антенна накачки низкочастотного сейсмоакустического профилографа с частотами накачки в районе 30 кГц, диапазоном разностных (рабочих) частот, равным 0.5–5 кГц, шириной характеристики направленности параметрической антенны по уровню –3 дБ в пределах $3 \times 3^\circ$ с сохранением этих значений во всем частотном диапазоне. Вся антенна площадью $0.8 \times 1 \text{ м}^2$ составлена из 10 независимых модулей прямоугольной формы, залитых полиуретановым компаундом. Каждый из модулей содержит по 80 пьезо-

преобразователей, образующих две подрешетки, на которые подаются сигналы накачки разных частот.



Рис. 4. Антенны накачки параметрических профилографов.

На рис. 5 приведена экспериментально измеренная характеристика направленности параметрической антенны на разностных частотах 7, 12, 14, 20 кГц. Ширина характеристики направленности составляет 3° и практически постоянна на всех разностных частотах в диапазоне 7–20 кГц. Уровень бокового поля не превышает -40 дБ. Диапазон частот накачки составляет 130–150 кГц.

На рис. 6 представлена профилограмма участка дна и придонных осадков Черного моря, полученная профилографом при длительности зондирующего импульса 2 мс. Начальная частота разностного (рабочего) линейно-частотно-модулированного сигнала равнялась 7 кГц. Девиация частоты составляла 8 кГц. Используемые параметры обеспечили разрешение по дистанции 10–15 см, что существенно для разрешения тонкой структуры верхнего слоя донных осадков и поиска объектов, находящихся в верхнем слое осадков. Глубина профилирования (более 20 м) показывает высокую энергетическую способность профилографа.

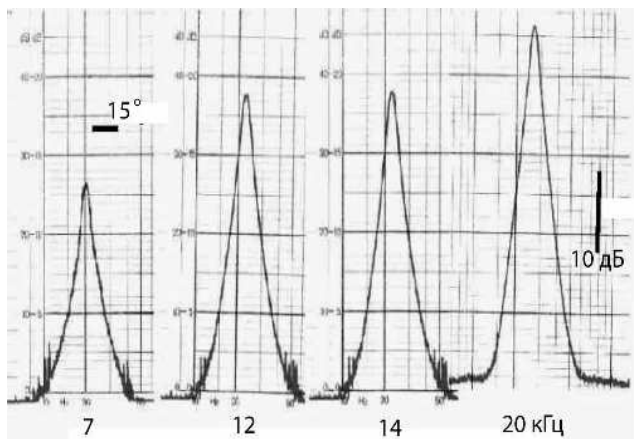


Рис. 5. Диаграммы направленности параметрической антенны на разностных частотах – 7, 12, 14 и 20 кГц.

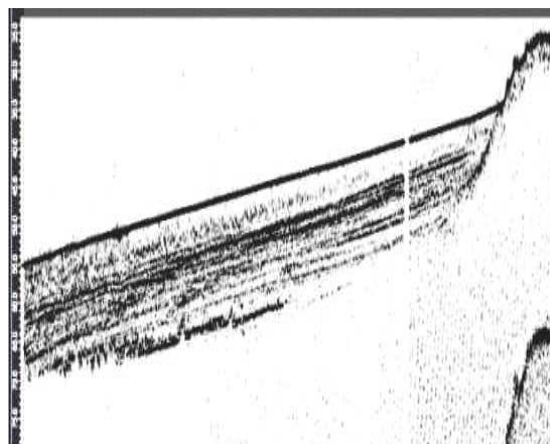


Рис. 6. Профилограмма структуры верхнего слоя донных осадков.

Разработанный профилограф комплексируется с высокочастотными гидролокаторами бокового обзора (ГБО), позволяющими рассмотреть рельеф дна и интерпретировать полученные результаты профилирования на окружающее пространство, т.е. повы-

сильно повысить производительность профилографа без применения технологий сканирования луча параметрической антенны.

Эхограмма ГБО сделана на частоте 240 кГц с длительностью импульса 8 мс и девиацией частоты 32 кГц. Приведенная эхограмма показывает высокую разрешающую способность гидролокатора бокового обзора по угловым координатам и по дистанции, позволяет судить о возможности его использования для проведения мониторинга дна в комплексе с параметрическим профилографом.

На рис. 7 представлена профилограмма участка дна Черного моря, а на рис. 8 – панорамная эхограмма поверхности дна этого же участка, полученная с помощью гидролокатора бокового обзора.

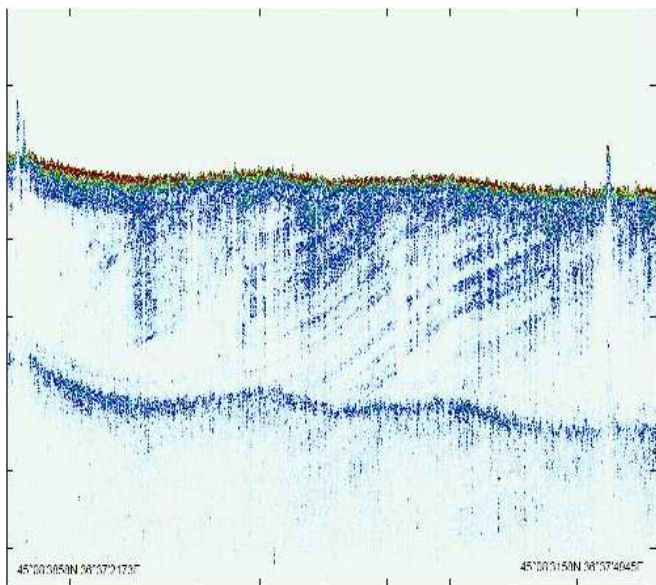


Рис. 7. Профилограмма структуры верхнего слоя донных осадков.

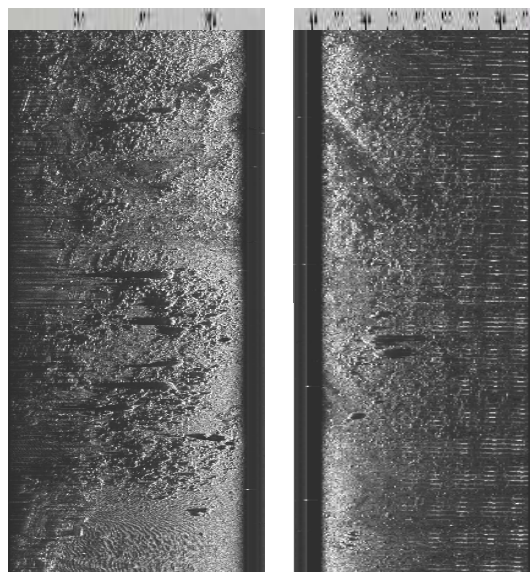


Рис. 8. Эхограмма участка дна Черного моря.

Использование технологий гидроакустических исследований с помощью параметрического профилографа позволяет получить сведения о состоянии морского дна на достаточно больших площадях и значительно сократить время проведения мониторинга.

Значительный интерес в последнее время имеют вопросы, связанные с возможностью дистанционного измерения вертикального распределения скорости звука в океане. В этом случае получение информации о свойствах среды обусловлено характером рассеяния акустических волн. Рассеиватели в океане имеют различную природу и обладают различными акустическими свойствами. Сила обратного объемного рассеяния зависит от частоты зондирующего сигнала. Перспективным инструментом исследования акустики океана являются параметрические антенны, обеспечивающие постоянство озвучиваемого объема в широком диапазоне частот. Для достижения максимальной дальности зондирования неоднородностей необходимо решать задачу выбора оптимальных параметров параметрической гидролокаторной системы. Не менее важна обратная задача, суть которой состоит в том, чтобы по результатам акустического зондирования водной среды определить характеристики обратного объемного рассеяния.

Методика расчета энергетических характеристик параметрических гидролокаторных систем дистанционного зондирования неоднородностей в океане разработана на основе решения уравнения гидролокации [5]. Она может быть использована при решении

задач построения адаптивных гидролокационных систем диагностики водной среды в океане и дистанционных измерителей вертикального распределения скорости звука.

Расчетное соотношение для вычисления коэффициента обратного объемного рассеяния при измерениях с помощью параметрических гидролокационных систем получено в виде

$$\alpha_{op} = \frac{2\delta^2 \cdot P_{no}^2 \cdot 10^6 \cdot 10^{0,05\beta ct} \cdot \gamma_{изл} \cdot \rho_0 \cdot c^5}{F^4 \cdot \pi^2 \cdot \tau \cdot \gamma_{np} \cdot P_{01}^2 \cdot P_{02}^2 \cdot \epsilon^2 \cdot L_d^2 \cdot e^{-2x/L_z} \cdot I^2(B, y) \cdot \eta_{op}},$$

где $L_3 = 1/\beta$; $I_1(B, y) = \int_0^y \frac{\exp(-z) dz}{d + yzB + i(z - y)}$, $y = \frac{x}{l_3}$; $d = \frac{L_D}{l_3}$; $B = \frac{L_D l_3}{l_{D1} l_{D2}}$; $L_D = \frac{a^2 \Omega}{4c_0}$;

$l_{D1}, l_{D2} = a^2 \omega_{1,2} / 2c_0$ – длина зоны дифракции волн накачки; a – апертура излучателя накачки.

Выражение позволяет определить коэффициент обратного объемного рассеяния по измеренной амплитуде рассеянного сигнала, точнее – по отношению сигнал/помеха.

Используя экспериментальные данные измерений, сделанных в Индийском океане [7], временные зависимости которых представлены на рис. 10, рассчитаны распределения по глубине коэффициента обратного объемного рассеяния. Исследования проводились с помощью параметрического гидролокатора. Частота накачки составляла 150 кГц, разностная частота была 30 кГц (верхняя запись, рис. 9) и 20 кГц (нижняя запись). Размеры (диаметры) круглых антенн накачки параметрического излучающего тракта и приемной антенны были одинаковыми и составляли 0.3 м. Длительность зондирующего импульса при измерениях была равна 1 мс, уровень приведенных шумовых помех 0.005 Па (измерения проводились в дрейфе судна).

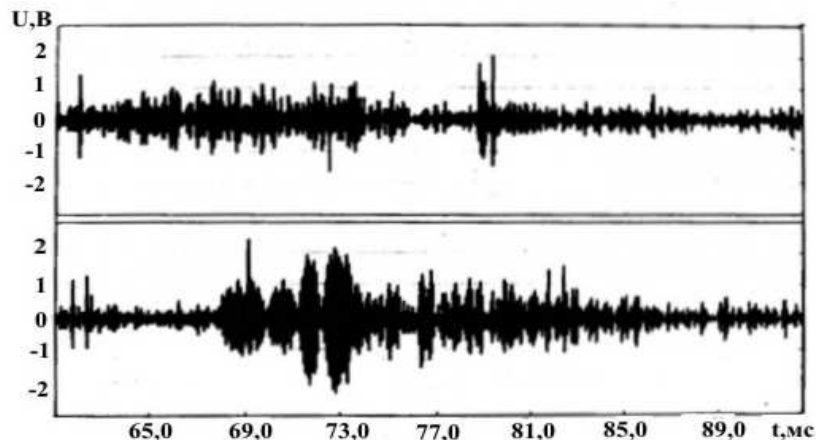


Рис. 9. Временные зависимости сигналов объемного рассеяния на частотах 30 и 20 кГц.

Значения отношения сигнал–помеха для реализаций, приведенных на рис. 9, использовались в качестве исходных данных для вычисления зависимости коэффициента обратного объемного рассеяния от глубины расположения рассеивающего объема. На рис. 10 приведены расчеты для коэффициента рассеяния на частоте 20 кГц. Характер зависимости отличается большим числом флуктуаций коэффициента рассеяния, обусловленных, по-видимому, присутствием в рассеивающем объеме дискретных рассеивателей резонансного типа, например мелких пузырных рыб.

Разработанная методика позволяет производить расчеты в широком диапазоне частот и по экспериментально полученным частотным зависимостям уровня эхо-сигнала

(или отношения сигнал–помеха) вычислять частотные характеристики коэффициента обратного объемного рассеяния с заданного горизонта океана.

По полученным экспериментально частотным зависимостям эхо-сигнала вычислены частотные характеристики коэффициента обратного объемного рассеяния, представленные на рис. 11. Для расчета использовались те же самые параметры антенн и сигналов, как и в эксперименте: частота накачки $f_0 = 150$ кГц, ширина характеристики направленности в режиме излучения 2° , в режиме приема – изменяется в соответствии с частотой от 8 до 30° , длительность импульса 1 мс, полоса пропускания приемного тракта – 40 кГц.

Частотные характеристики коэффициента обратного объемного рассеяния (см. рис. 11) имеют достаточно плавно спадающую, с небольшими флюктуациями, зависимость от частоты, в диапазоне (20–30) кГц. На этих частотах рассеяние звука обусловлено, по-видимому, нерезонансными рассеивателями, главным образом животными, имеющими твердый скелет и панцирь. Более резкие флюктуации наблюдаются в низкочастотной области. В частности, максимумы в районе 12 и 18 кГц, по-видимому, соответствуют резонансным частотам мелких пузырных рыб, присутствующих в слое. Эти результаты согласуются с экспериментальными данными, полученными ранее [7].

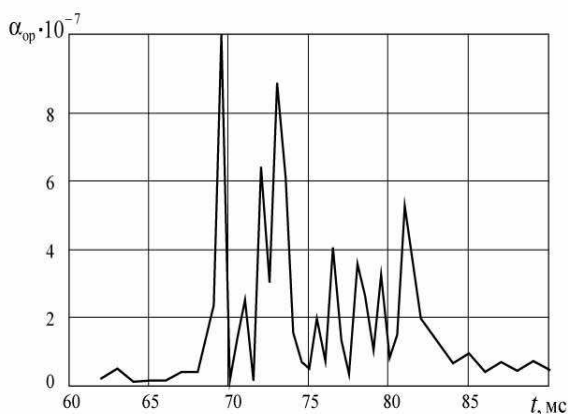


Рис. 10. Зависимость коэффициентов объемного рассеяния от глубины на частоте 20 кГц.

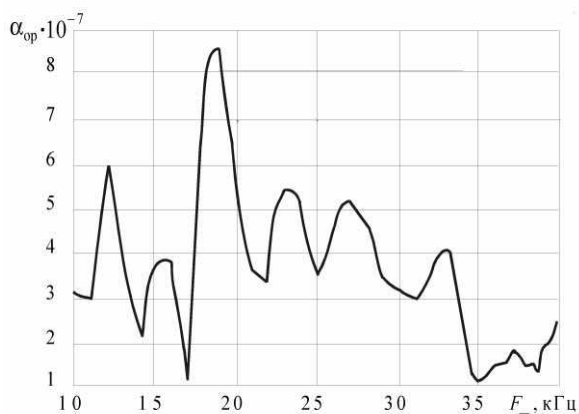


Рис. 11. Частотная зависимость коэффициента обратного объемного рассеяния в океане с горизонта 35 м.

Представленные результаты демонстрируют возможности использования разработанной методики для определения дальности действия широкополосных параметрических гидролокаторов при локации объемного рассеяния и вычисления частотных характеристик коэффициента обратного объемного рассеяния и могут быть использованы при решении задач построения адаптивных гидролокационных систем дистанционной диагностики океана по акустическим характеристикам неоднородностей и построения систем измерения вертикального профиля скорости звука.

Одним из направлений, повышающих эффективность акустического зондирования в океане, особенно в мелком море, является проблема фокусировки акустического излучения в морском волноводе [8, 9]. В то же время известны подходы, которые позволяют перенести известные принципы пространственной обработки сигналов в частотную область [10]. В условиях мелкого моря эти подходы можно реализовать при одномодовом режиме возбуждения морского волновода в широкой полосе частот. Параметрическая антенна благодаря высокой направленности излучения в широкой полосе частот [11] является одним из возможных акустических устройств, создающих условия для реализации этих подходов.

Параметрическая антенна благодаря своим достоинствам может обеспечить селективное возбуждение мод широкополосного акустического сигнала в морском волноводе. Благодаря нерезонансному способу генерации низкочастотного сигнала параметрическая антенна обеспечивает излучение зондирующих сигналов в широкой полосе частот (более чем две октавы).

Морской волновод обладает частотной дисперсией скорости распространения акустического сигнала. Величина дисперсии зависит от профиля скорости звука по глубине и толщины волновода [12]. Частотная дисперсия приводит либо к разрушению коротких широкополосных импульсов, которые распространяются на достаточно протяженные расстояния, либо к концентрации энергии акустического сигнала в коротком интервале времени, если частная модуляция сигнала соответствует условиям дисперсии в среде. В таком случае можно говорить о фокусировке или сжатии акустического сигнала во времени [13]. Были проведены исследования возможности фокусировки во времени (компрессии) широкополосного акустического сигнала, распространяющегося в мелководном морском волноводе.

Условия распространения в мелководном волноводе в нашем случае соответствовали нормальной волноводной дисперсии, когда групповая скорость распространения сигнала увеличивается с частотой. Следовательно, для достижения эффекта сжатия широкополосного сигнала при его распространении в волноводе нужно обеспечивать возрастание частоты за время излучения сигнала.

Предельное сжатие сигнала τ определяется эффективной частотной полосой его спектра Δf , $\tau = (\Delta f)^{-1}$. С другой стороны, длительность изучаемого импульса T при условии его полного сжатия на дистанции L будет определяться частотной дисперсией $\partial c / \partial f$ скорости распространения c ; $T = L \frac{\partial c / \partial f}{c^2} \Delta f$.

Таким образом, при сжатии сигнала в результате волноводной дисперсии возможно увеличение его интенсивности в отношении T / τ раз $T / \tau = L \frac{\partial c / \partial f}{c^2} \Delta f^2$. То есть эффект увеличения интенсивности пропорционален дистанции, на которую распространяется сигнал, величине волноводной дисперсии и квадрату частотной полосы сигнала. При этом увеличивается соотношение между сигналом и шумом, который накапливается в регистрирующей аппаратуре за время приема сигнала τ .

Заметим, что групповая скорость распространения сигнала в волноводе определяется параметрами волновода. В частности, для волновода Пеккериса с постоянной, независимой от глубины скоростью распространения звука c_0 частотная зависимость скорости распространения сигнала определяется соотношением $c = c_0 \left[1 - \frac{c_0^2 l^2}{(2fH)^2} \right]^{1/2}$, где H – вертикальный масштаб волновода, l – номер моды. Отсюда получаем предельную оценку частотной дисперсии скорости звука в волноводе $\partial c / \partial f \approx f^{-2}$. При излучении сигнала с постоянной относительной частотной полосой $\Delta f / f = \text{const}$ оказывается, что относительное сжатие сигнала T / τ увеличивается с увеличением дистанции распространения сигнала L . Поэтому наиболее заметный эффект относительного увеличения интенсивности широкополосного сигнала можно получить при волноводном распространении на протяженных трассах.

Экспериментальные исследования выполнялись летом в Таганрогском заливе Азовского моря на двух маломерных судах. На одном была установлена излучающая антенна, с другого судна обеспечивалась работа приемной антенны. Излучающая антенна крепилась на поворотном устройстве к борту судна и могла обеспечивать сканирование

акватории узким лучом параметрического излучения в диапазоне углов $-90 - +90^\circ$ в горизонтальной плоскости. Во время излучения сигналов судно стояло на якоре. Антенна располагалась на глубине 1.5–1.7 м и ось излучения была ориентирована горизонтально. Глубина места в районе экспериментов была 2.5–3 м. Средняя частота излучения (частота накачки) была равна 150 кГц. Разностная частота или частота излучения сигнала лежала в диапазоне 5–20 кГц. Электрическая мощность усилителя антенны – 2 кВт для каждой из частот накачки. Приемная антенна была выполнена в виде вертикальной цепочки восьми гидрофонов, которые располагались с шагом 0.25 м на металлической штанге. Штанга в составе жесткой конструкции устанавливалась на дне таким образом, что вертикальная цепочка гидрофонов перекрывала весь волновод. Сигнал от приемных элементов антенны по кабелю передавался на борт приемного судна, где он оцифровывался и регистрировался для последующей обработки.

Вертикальное распределение скорости распространения звука в волноводе определялось солнечным прогревом его верхней части в дневное время суток. Регистрировались сигналы параллельно с каждого приемника вертикальной антенны. Измерения были выполнены при расстояниях между излучателем и приемной антенной от 1 км до 5.60 км. Исследовались частотно-временные характеристики распространения импульсов длительностью 2 и 4 мс с заполнением, частота которого имела линейную модуляцию в полосе 7–15 кГц; при этом развертка по частоте сигнала осуществлялась с нижних частот к верхним, что соответствовало нормальной волноводной дисперсии.

На рис. 12 приведен пример записи сигналов, зарегистрированных на вертикальной цепочке гидрофонов на расстоянии 1000 м от излучателя. Видно, что основная энергия излучения концентрируется в средней части волновода. Детальный анализ показал, что сигналы, зарегистрированные разными гидрофонами приемной антенны, оказываются в фазе по всей глубине волновода, что свидетельствует о преимущественно одномодовом режиме распространения сигнала. То есть в условиях эксперимента параметрическая антенна возбуждала первую моду волновода. На рис. 13 сравниваются экспериментальные и расчетные данные для нормированного вертикального распределения акустического поля в волноводе. Экспериментальные данные соответствуют амплитуде импульсов на вертикальной цепочке гидрофонов на частоте 15 кГц (полоса 500 Гц). Характер распределения и то, что оно практически не зависит от дистанции, также указывает на то, что распространение сигнала можно характеризовать как одномодовое.

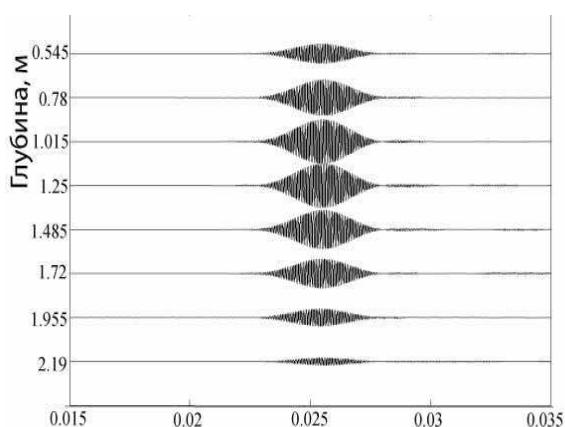


Рис. 12. Сигналы на вертикальной цепочке гидрофонов. Расстояние 1000 м, частота 15 кГц, длина импульса 2 мс.

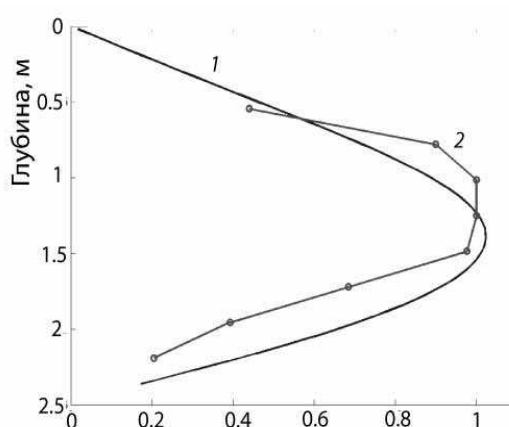


Рис. 13. Нормированное распределение уровня сигнала по вертикальному сечению волновода (1) и расчет собственной функции первой моды (2).

Расчет дисперсии групповой скорости позволяет оценить изменение задержки различных частотных составляющих сигнала при его распространении в волноводе. На рис. 14, *а, б* показаны зависимости такой задержки для различных дистанций, пройденных сигналом. Как видно, наклон дисперсионной кривой для ЛЧМ-сигнала, хорошо соответствует частотно-временной обработке сигнала, измеренного на дистанции 466 м. С увеличением дистанции меняются частотно-временные соотношения в сигнале. Растет задержка низкочастотных составляющих сигнала, что соответствует сокращению его длительности. Анализ показывает, что время прихода низко- и высокочастотных составляющих может совпасть на дистанции приблизительно в 6 км для условий настоящего эксперимента. Поскольку дисперсия скорости распространения сигнала нелинейным образом зависит от частоты, то и характер частотной модуляции должен быть нелинейным, чтобы получить максимальное сжатие сигнала.

С использованным в наших опытах ЛЧМ сигналом было обеспечено сжатие сигнала более, чем в 4 раза на дистанции 3.8 км.

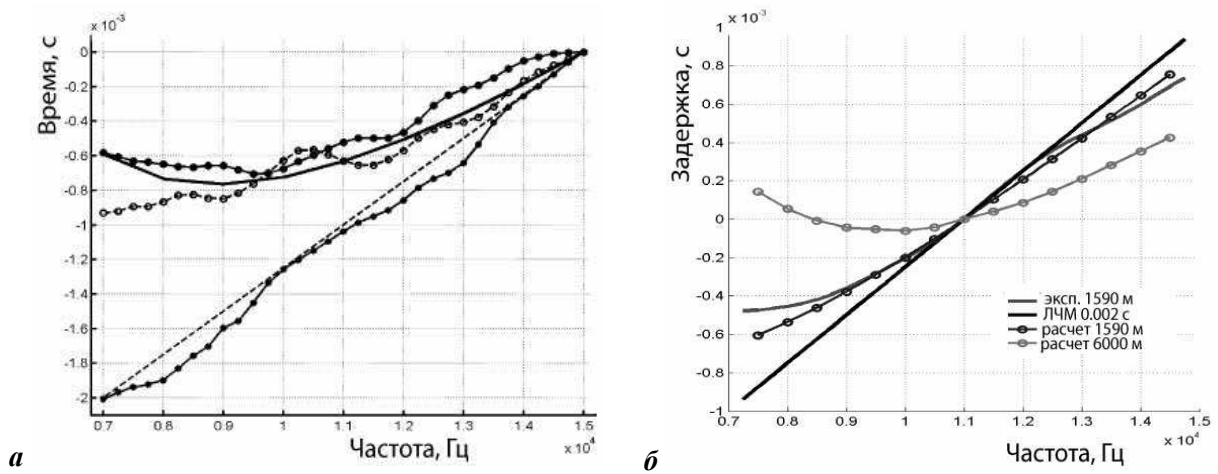


Рис. 14. Изменение времени задержки прихода частотных составляющих сигнала (*а*), расчет и результат эксперимента (*б*).

Наиболее эффективно сжатие сигналов, имеющих широкую частотную полосу. Это возможно осуществить на достаточно протяженных трассах. Поэтому параметрическая антенна в силу своих особенностей к селективному возбуждению мод волноводов в широкой полосе частот представляется наиболее эффективным инструментом для исследований компрессии акустических сигналов в волноводах и измерений проведения мониторинга океана на протяженных трассах.

Литература

1. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.
2. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. The Role of Parametric Arrays in the Ocean Research // Nonlinear acoustic». American Institute of Physics (AIP PRESS). N.Y., 1994. 231–270 p.
3. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. 400 с.
4. Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007. 448 с.
5. Воронин В.А., Кириченко И.А., Пивнев П.П., Тарасов С.П. Антенна накачки низкочастотного параметрического профилографа // Сб. тр. 22 сессии РАО. Т.2. М.: ГЕОС, 2010. С.319–322.
6. Сташкевич А.П. Акустика моря. Л.: Судостроение, 1966. 354 с.

7. Житковский Ю.Ю., Котляров В.В., Кузнецов В.П., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Исследование объемного рассеяния звука в океане параметрическим гидролокатором // Докл. АН СССР, 1989. Т.305, № 4. С.970–973.
8. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 264 с.
9. Кузькин В.М., Переселков С.А. Об эффективности фокусировки звукового поля в океаническом волноводе в присутствии фоновых внутренних волн // Акуст. журн. 2006. Т.52, № 5. С.693–701.
10. Григорьев В.А., Кузькин В.М. Управление фокусировкой поля в многомодовых плоскостойких волноводах // Акуст. журн. 2005. Т.51, № 3. С.352–359.
11. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. Л.: Судостроение, 1990. 256 с.
12. Есипов И.Б., Попов О.Е., Воронин В.А., Тарасов С.П. Дисперсия сигнала параметрической антенны в мелком море // Акуст. журн. 2009. Т.55, № 1. С.56–61.
13. Пономарев А.Е., Булатницкий С.И., Сапожников О.А. Компрессия и усиление ультразвукового импульса, отраженного от одномерной слоистой структуры // Акуст. журн. 2007. Т.53, № 2. С.157–167.

Статья поступила в редакцию 26.05.2011 г.

