



Издается с 2008 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Корчак В.Ю.</i> К 60-летию Секции прикладных проблем при Президиуме РАН .....	4
<b>Статьи</b>	
<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
<b>Перспективные направления развития науки и техники</b>	
<i>Арсентьев В.Г., Криволапов Г.И.</i> Некоторые результаты реализации подводных сетевых технологий в СибГУТИ .....	129
<b>Конференции</b> .....	135
<b>Поздравляем!</b> .....	138
<b>Хроника</b> .....	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 599.53; 534.232; 612 821; 591.51; 573.3:007

© М.П.Иванов<sup>1</sup>, Б.Г.Степанов<sup>2</sup>, 2011

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

20mivanov@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО БИОСЕНСОРА ДЕЛЬФИНА И ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО АНАЛОГА

Представлены результаты экспериментальных исследований биосенсорной системы дельфинов, использующих акустический канал для поиска и распознавания подводных объектов, ориентации в трехмерном пространстве и подводной связи между особями. Анализируется работа сонара дельфина *Tursiops truncatus* в сложных условиях акустических помех. Показано, что основными механизмами, обеспечивающими помехозащищенность сонара дельфина является: излучение широкополосных импульсов с нулевой несущей, использование пачек импульсов (накопление), переменной частоты следования пачек импульсов (временная селекция) и пачек импульсов с интервально-временным кодированием. Рассмотрены возможные пути построения широкополосных гидроакустических преобразователей и антенн, способных излучать акустические сигналы подобные эхолокационным импульсам китообразных. Анализируется работа двух электрически управляемых моделей широкополосных преобразователей: стержневого с фазированным возбуждением секций и волноводного типа в виде соосного набора пьезоактивных колец. Приводятся некоторые результаты решения задач синтеза и анализа для этих моделей преобразователей. Показана возможность обеспечения ими полосы пропускания соответственно 1.5–2; 2–3 октавы и более.

Ключевые слова: сигналы эхолокации, анализ и синтез широкополосных сигналов, помехозащищенность, широкополосный сигнал, сигнал без несущей, широкополосный гидроакустический преобразователь.

Эффективность обнаружения, ориентации в трехмерном пространстве и связь между особями зависят от пластичности биоакустической системы китообразных адаптироваться к сложной помеховой обстановке биогенного и антропогенного происхождения [1]. Для дельфинов, у которых пищевые предпочтения находятся у поверхности или у дна, борьба с акустической реверберацией также является основной задачей при поиске и распознавании. Известно, что для снижения реверберационного фона необходимо использовать короткие акустические импульсы. Эхолокационные импульсы дельфина отличаются от акустических импульсов, используемых в технических системах поиска и распознавания подводных объектов. Импульсы дельфина такие короткие, что определить традиционные параметры, как например длительность фронта нарастания или спада, длительность установившегося режима, практически невозможно. Активные помехи, с которыми дельфин сталкивается в естественных условиях обитания, это акустические помехи, создаваемые сородичами, являющиеся сосредоточенными помехами. Надо признать, что борьба с широкополосной и особенно импульсной сосредоточенной помехой является трудной теоретической и практической задачей.

Рассмотрим известные акустические сигналы дельфинов, которые условно разделим на три типа: эхолокационные сигналы, короткие сверхширокополосные (с позиции спектральной плотности) импульсы – дельфин определяет и распознает отражающие объекты в направлении движения; длинные импульсы с частотной модуляцией (ЧМ) –

дельфин определяет наличие отражающих объектов вблизи животного, сигналы ближней ориентации (гипотеза); длинные взрывоподобные импульсы – дельфины передают информацию друг другу, сигналы коммуникации (результат одного эксперимента).

Возможности акустического биосенсора китообразных изучаются в естественных условиях обитания дельфинов, а более точные измерения проводятся в условиях лабораторного эксперимента под контролем: объекта поиска или распознавания, дальности до объекта, уровня естественных или искусственно создаваемых помех и т.д. Как известно, этолого-акустические исследования дают материал для пополнения базы данных биоакустических сигналов, а сопоставление их с видеонаблюдениями поведенческих актов особи либо стаи позволяют выдвигать гипотезы о назначении сигналов [2]. Гипотезы доказываются в лабораторном эксперименте, при тщательном контроле за помеховой обстановкой во время опыта в статическом режиме эхолокации, когда дельфин и объект поиска или распознавания неподвижны. Существуют единичные исследования характеристик излучения в динамике, когда объект поиска или дельфин во время испытания перемещаются в пространстве [3].

Для определения параметров излучаемых дельфином сигналов лабораторный эксперимент в открытой воде построен по методике альтернативного выбора с акустически управляемым поведением животного при последовательном предъявлении стимула. Глубина трассы составляет от 4 до 12 м. Подробно методика эксперимента представлена в работах [4, 5]. В целях изучения возможностей акустического биосенсора адаптироваться к помехам естественного происхождения объект поиска предъявляется в приповерхностном слое воды (0.5 м), в среднем слое воды и у дна (0.5 м). Изменение дальности (до 600 м) и глубины погружения мишени позволяло имитировать различные условия реверберационной помехи. Объект поиска опускался в воду оператором, а связь экспериментатора с оператором, находящимся в лодке, осуществлялась по радиоканалу [5].

Для изучения возможности сенсорной системы дельфина адаптироваться к помехам искусственного происхождения формировались специальные помехи, имеющие различную спектральную окраску, с помощью восьми излучателей, расположенных в 7 м от стартовой позиции животного (дельфина), а мишень предъявлялась на расстоянии 200 м от него.

Полоса частот регистрирующего тракта составляла 200 кГц с неравномерностью амплитудно-частотной характеристики не более 2 дБ. В качестве поисковых объектов использовали две мишени с силой цели:  $T_1 = -1.6$  и  $T_2 = -14$  дБ. Измерение силы цели проводили с помощью сигналов, имитирующих импульсы дельфина.

На рис. 1 представлены примеры полной эхолокационной последовательности импульсов при решении задачи обнаружения цели на расстоянии 200 м в естественном акустическом фоне (рис. 1, *а*) и при воздействии низкочастотной антропогенной помехи до 20 кГц (рис. 1, *б*). В качестве мишени использовался пустотелый металлический цилиндр диаметром 120, высотой 400 мм с толщиной стенки 10 мм (сила цели  $T_2 = -14$  дБ).

Представленные данные показывают, что дельфин при эхолокации использует излучение пачками импульсов. Последние излучаются с задержкой, которая зависит от дальности объекта поиска, длительности пачки импульсов, времени обработки и времени принятия решения. Для удобства представления результатов введем понятие коэффициента перекрытия:  $K = T_e / T_m$  ( $T_e$  – временной интервал следования пачек импульсов по результатам эксперимента,  $T_m$  – теоретическое время прохождения сигнала до цели и обратно). Для идеального наблюдателя  $K = 1$ . Анализ данных показал, что коэффициент перекрытия при известной априори дальности равен 1.5. При отсутствии объекта поиска  $K$  меняется в пределах 1.8–2.2. При неизвестной дальности  $K = 4$  и более.

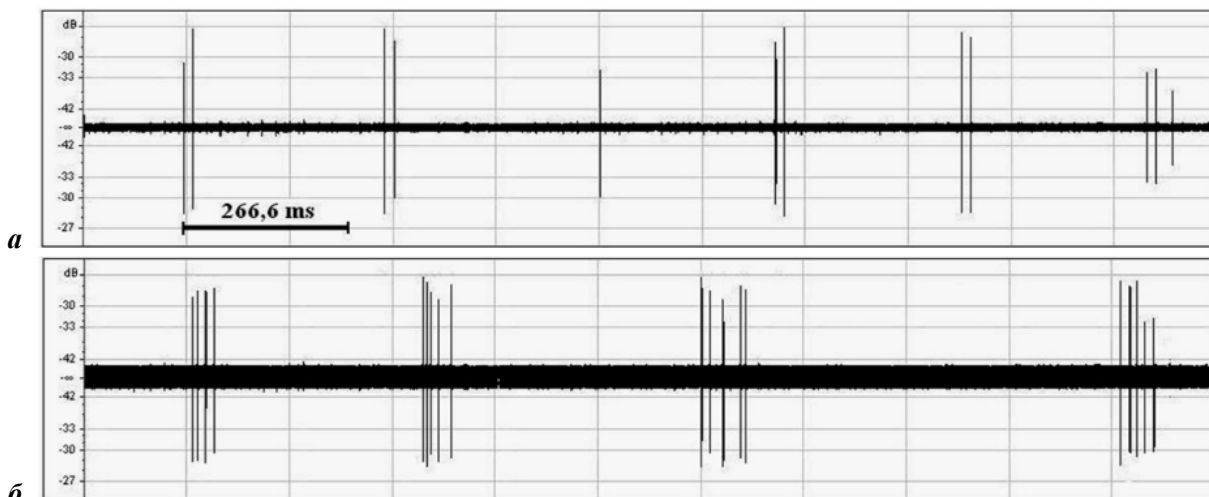


Рис. 1. Полная последовательность эхолокационных импульсов при решении задачи обнаружения. *а* – в естественном акустическом поле; *б* – при воздействии низкочастотной помехи.

За 50 лет исследований акустической системы дельфина достоверно исследованы только эхолокационные сигналы. Результаты этих экспериментов основаны на лабораторных опытах по обнаружению в естественных акустических условиях при изменении дальности объекта поиска [4, 5], в сложных условиях искусственных помех [6], при воздействии помех с различной спектральной окраской [7], изменении траектории акустического луча с помощью акустического зеркала [8]. При решении перечисленных задач дельфин афалина использует сверхширокополосные импульсы с нулевой несущей длительностью от 10 до 30 мкс и пачки импульсов с нестационарной временной последовательностью.

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов, имеющих место при поиске объекта в естественном акустическом фоне (рис. 2, *а*) и при воздействии искусственных помех (рис. 2, *б*). Импульсы близки по своей временной структуре, отличие состоит в дополнительных полутора-двух колебаниях при поиске цели в естественном акустическом фоне на больших расстояниях. При этом длительность периода дополнительных колебаний может отличаться от основного колебания. В зависимости от направления акустической оси амплитуда импульса, отраженного от поверхности раздела сред вода–воздух, может превышать амплитуду зондирующего импульса дельфина (рис. 2, *б*).

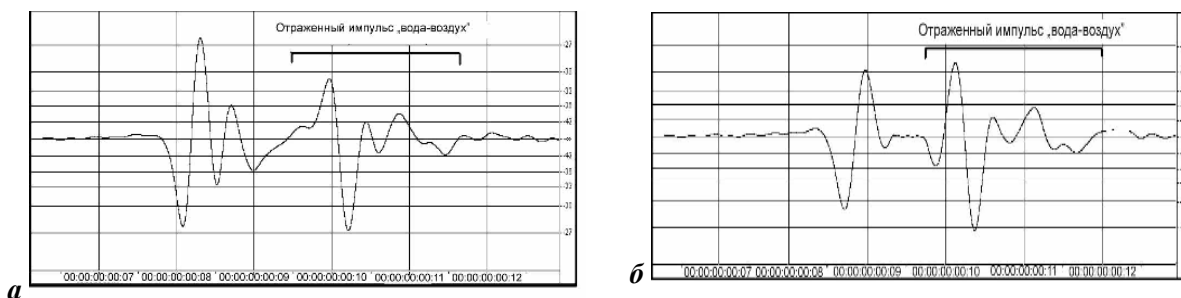


Рис. 2. Осциллограммы импульсов дельфина при решении задачи обнаружения. *а* – в естественном акустическом фоне; *б* – при воздействии искусственных помех.

На рис. 3 представлены амплитудно-частотные характеристики импульсов дельфина при решении задачи обнаружения в естественном акустическом фоне (рис. 3, *а*) и при воздействии искусственной помехи (рис. 3, *б*). Как видно из представленных амплитудно-частотных характеристик, при воздействии искусственных помех дельфин меняет

ширину спектра импульса. Спектр импульса не имеет определенного максимума и практически равномерен в диапазоне частот от 30 до 140 кГц. Импульс дельфина можно рассматривать как сигнал с нулевой несущей (без несущей), так как сигнал сосредоточен во времени и является широкополосным с неопределенным спектральным максимумом.

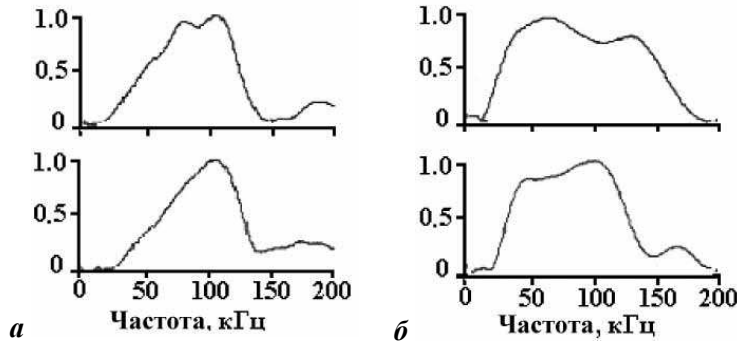


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики импульсов дельфина при решении задачи обнаружения. *а* – в естественном акустическом фоне; *б* – при воздействии искусственных помех.

Обобщенная графическая модель излучения дельфина в естественном акустическом фоне и при воздействии антропогенных помех с различной спектральной окраской показана на рис. 4. Представленная на этом рисунке диаграмма направленности излучения носит несколько условный характер, поскольку ее основные параметры (ширина главного максимума и уровень бокового излучения) определяются структурой акустического импульса и значениями частот, формирующих его колебания.

Согласно экспериментальным данным, при решении задачи обнаружения в различных акустических условиях длительность пачки импульсов достигает величины 220 мс. Число импульсов в пачке меняется от 1 до 30. Пачку импульсов назовем интегральным сигналом (рис. 4, *а*). Если в интегральном сигнале содержится один импульс, то назовем это моноимпульсным режимом эхолокации. Если в интегральном сигнале содержится два и более импульсов, то назовем это мультиимпульсным режимом эхолокации. Как правило, моноимпульсный режим эхолокации дельфин афалина использует для решения задачи обнаружения в естественном акустическом фоне при расстоянии до цели 120 м [4]. Однако это не закон. С технической точки зрения основным критерием перехода у дельфина от моноимпульсного режима эхолокации к режиму излучения пачек импульсов являются его адаптация к изменяющимся акустическим условиям среды и оптимизация соотношения сигнал/помеха. Графические зависимости, полученные в эксперименте по дальности обнаружения в естественном акустическом фоне, и обнаружение в искусственном шумовом поле отражают адаптационные возможности животного (дельфина). Являются ли результаты экспериментов адаптацией к экстремальным воздействиям, сказать невозможно. Экспериментальное исследование пороговых характеристик дает возможность оценить предельные возможности работы биосенсора дельфина [9], но только в том режиме эхолокации, который в данный момент он предпочитает использовать. В эксперименте дельфин меняет режим излучения в зависимости от акустических условий среды, характеристик цели и собственной настройки приемной системы.

Представленные изменения временной последовательности импульсов в пачках показывают, что дельфин кодирует излучаемую последовательность. Аналогичные изменения в сигналах технических систем называют интервально-временным кодированием. В интегральном сигнале местоположение импульсов в пачках отличается временными позициями (рис. 4, *а*, 1, 2). Теоретически общее число интегральных сигналов из одинаковых импульсов составляет число сочетаний  $A = C_N^B$ , где  $B$  – база сигнала, которая равно произведению ширины полосы отдельного импульса на длительность пачки;  $N$  – количество импульсов в пачке [10]. В этом случае общее число интегральных сигналов при больших

базах будет чрезвычайно велико, так как число  $A$  учитывает все возможные комбинации интервально-временного кодирования. Диапазон значений, полученный в эксперименте на дельфине, снижает количество возможных комбинаций. Нижний предел временного интервала между импульсами составляет 1.8 мс. Окончательное значение возможных комбинаций будет получено только при исследовании разрешающей способности слуховой системы, при декодировании излученных сигналов в активном режиме.

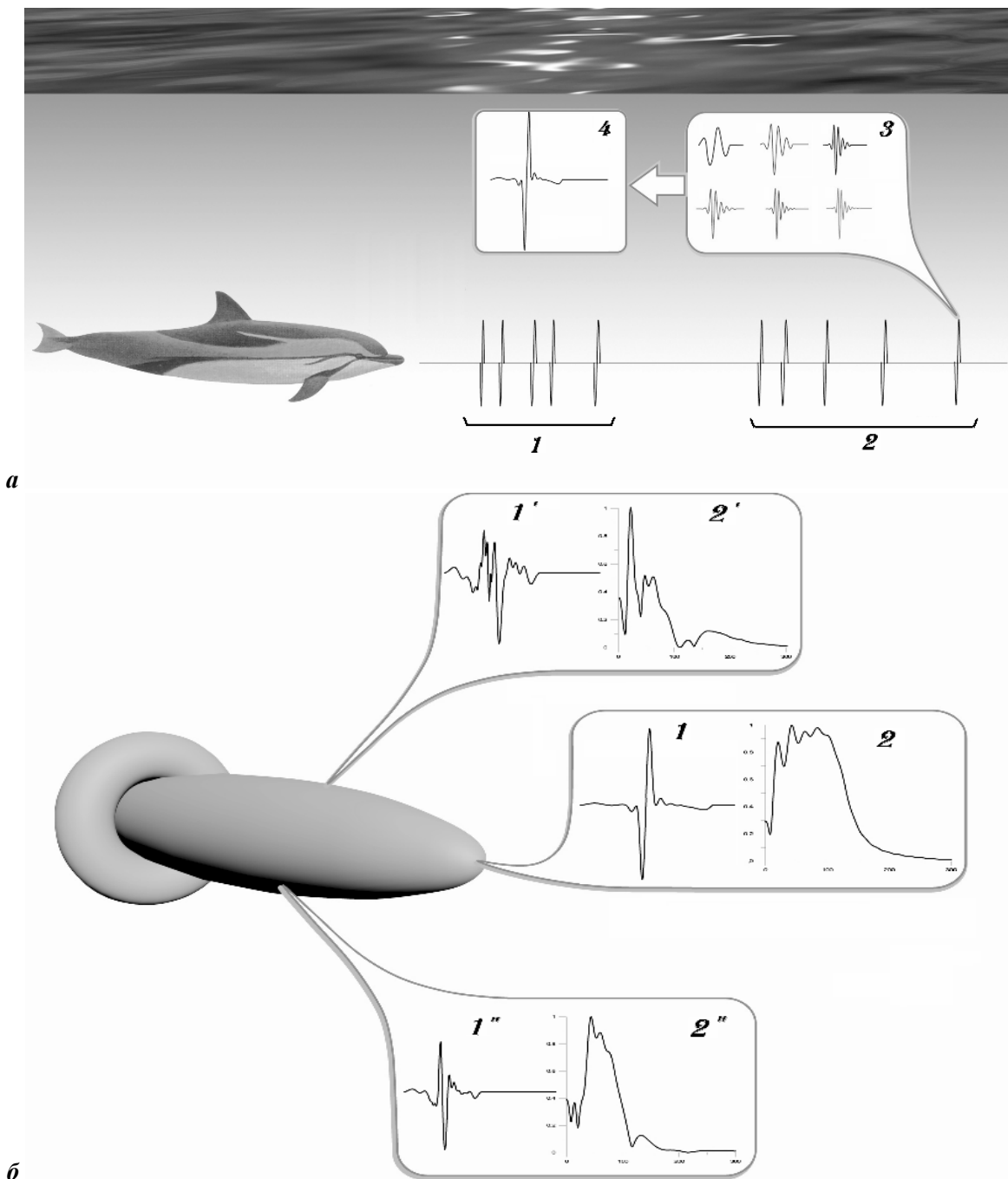


Рис. 4. Эхолокация с помощью сверхширокополосных сигналов с нулевой несущей (а) и условная диаграмма направленности нестационарного процесса излучения (б).

1, 2 – интегральные сигналы дельфина с интервально-временным кодированием последовательности импульсов; 3 – спектрально-временное кодирование с помощью элементарных составляющих; 4 – результирующий эхолокационный импульс дельфина; 1, 1', 1'' и 2, 2', 2'' – осциллограммы импульсов и их спектры по 0, -20, +20° диаграммы направленности соответственно.



Из теории сигналов известно, что повышение эффективности использования ресурсов канала предполагает передачу данных с применением сигналов, имеющих наименьшую базу  $B$ , измеряемую произведением ширины полосы  $\Delta F$ , которую занимает сигнал, на его длительность  $T$ . Если предположить, что дельфин способен кодировать собственный эхолокационный импульс (рис. 4, *a*, 3), то наилучшей моделью эхолокационного сигнала будет описание его с помощью полиномов Эрмита. При совместном использовании  $n$  полиномов можно увеличить базу сигнала:  $B = \Delta F \times T \times n$  [11]. Все семейство полиномов Эрмита обладает свойством ортогональности, т.е. все они могут быть успешно разделены на приеме, если передавались одновременно в общем частотном диапазоне. Таким образом, теоретически дельфин может использовать спектрально-временное кодирование (рис. 2, *a*, 3), а результирующий эхолокационный импульс дельфина является суперпозицией элементарных составляющих (рис. 4, *a*, 4).

В активном режиме у китообразных работает эхолокационная система, которая позволяет успешно обнаруживать объекты, расположенные впереди по траектории следования животного в направлении его геометрической оси. При этом сектор обзора ограничен конусом, образованным диаграммой направленности излучения, причем максимальная интенсивность направлена вдоль акустической оси. Показано, что геометрическая ось дельфина не всегда совпадает с акустической осью, что позволяет быстро сканировать, увеличивая тем самым размеры конуса освещения пространства [12].

Как известно, акустическая система дельфина представляет собой набор пневмопушек (элементарные излучатели) [13, 14], рефлектора, состоящего из лобных костей с переменной отражающей способностью [15], и рефрактора (мелона) – жировой слой с плавным изменением акустического сопротивления от центра к периферии [16]. Жировой слой – акустическая линза с изменяемой геометрией – позволяет менять ширину диаграммы направленности, но у различных видов китообразных **он выражен по-разному**.

Исследования диаграммы направленности показали, что спектрально-временные параметры сигнала зависят от азимута (рис. 4, *b*). Самый короткий импульс с неопределенным максимумом в спектре регистрируется в направлении акустической оси (рис. 4, *b*, 1, 2). При регистрации в других направлениях спектрально-временные параметры сигналов асимметричны ( $\pm 20^\circ$ , рис. 2, *b*, 1', 2' и 2, *b*, 1'', 2'').

Направленность акустического максимума зависит от положения излучающего элемента относительно геометрического центра рефрактора и рефлектора (рис. 5, *a*), что показывает одну из возможных реализаций способа сканирования диаграммы направленности. Характеристики поля излучения дельфин меняет с помощью изменения формы акустической линзы, что особенно выражено у дельфина белухи.

На рис. 5, *b*, *в* представлены фотографии мелона

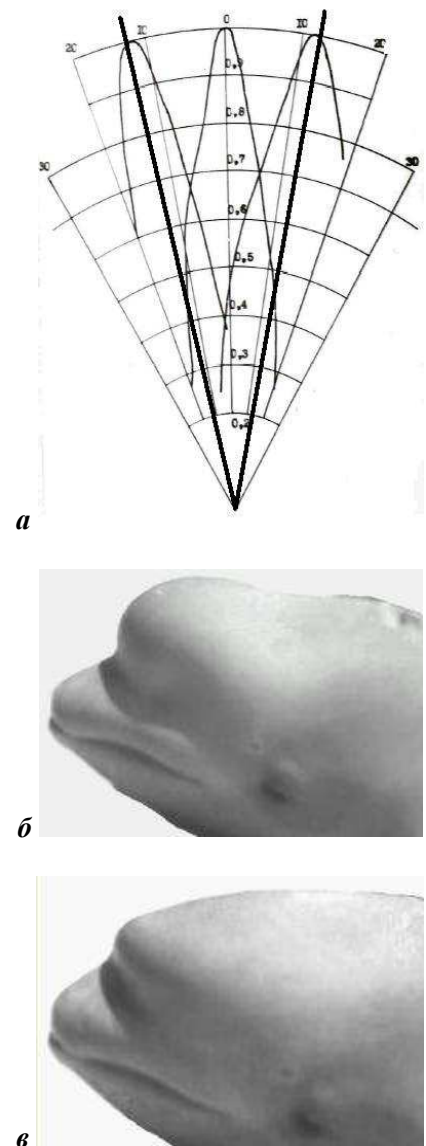


Рис. 5. Сканирование за счет смещения точки излучения и изменение раскрыва излучения за счет формы акустической линзы.

белухи полусферической формы (рис. 5, б) и в противоположность ей – плоская форма мелона (рис. 5, в). У дельфина афалины изменение формы акустической линзы менее выражено, однако можно предположить, что факт сканирования является общим для всех зубатых китов, так как сканирование можно реализовать двумя способами: 1) изменением положения излучателя относительно костных образований (рис. 5, а – смещение точки излучения  $\pm 2$  см относительно фокуса рефрактора); 2) изменением формы и смещением ядра линзы, в которой наименьшая скорость звука [16].

Таким образом, эхолокационная система дельфина имеет три механизма управления направленностью акустического поля излучения. Первый – направление акустической оси совпадает с геометрической осью тела животного; второй – направление акустической оси совпадает с геометрической осью головы животного; третий – направление акустической оси не совпадает с геометрической осью головы животного. Последний механизм позволяет изменять направление акустической оси за счет перераспределения энергии, отраженного от поверхности рефлектора излучения, что подтверждает идеи, высказанные в работе [17]. Максимальный уровень звукового давления, определяемого по максимальному размаху амплитуды импульсного сигнала дельфина, составляет 220 дБ (относительно 1 мкПа приведенное к 1 м).

На основании исследований работы дельфина в различных акустических условиях показано, что механизмы оптимизации эхолокационного процесса и повышение помехозащищенности его акустического биосенсора определяются:

- излучением сверхширокополосных импульсов с нулевой несущей;
- кодированием спектрально-временных характеристик результирующего импульса;
- излучением интегрального сигнала и реализацией механизма временной селекции;
- изменением параметров интегрального сигнала (длительности пачки импульсов, числом импульсов в пачках, интервалом времени между импульсами в пачках);
- интервально-временным кодированием интегрального сигнала;
- реализацией механизма сканирования;
- асимметричной и нестационарной структурой акустического поля излучения.

Анализ рассмотренных результатов экспериментальных исследований свидетельствует о том, что техническая реализация гидроакустической системы, способной имитировать эхолокационные сигналы дельфинов, требует не только разработки сверхширокополосных преобразователей (с полосой пропускания более 1.5–2 октав), но и формирования специального амплитудно-фазового распределения колебательной скорости в раскрыве излучающей апертуры антенны, составленной из таких преобразователей. Последнее обстоятельство говорит также о необходимости решения достаточно сложного комплекса задач антенной техники, связанных с компоновкой, специальным возбуждением и согласованием сверхширокополосных преобразователей (с учетом их взаимодействия в антенне) и генераторных устройств.

Вопросу расширения полосы пропускания электроакустических преобразователей и связанных с ними задач излучения сложных акустических сигналов, в том числе ультракоротких (длительностью 1–2 периода) импульсов (УКИ), посвящено много работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Основными методами расширения полосы пропускания гидроакустических преобразователей являются [18]:

- электрическая коррекция амплитудно-частотной характеристики преобразователя с мощностью пассивных или активных электрических цепей, включаемых между генераторным или усилительным устройством и преобразователем;
- акустическое согласование импедансов пьезоактивного элемента преобразователя и среды;

– использование возбуждения ряда связанных мод колебаний преобразователя.

Реализация каждого из этих направлений может быть осуществлена различными способами. Кроме того, при построении преобразователей возможно одновременное применение нескольких указанных методов расширения полосы пропускания. Следует также отметить, что при излучении сложных акустических сигналов (например, эхолокационные сигналы дельфинов) важна не только равномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) излучения, но и линейность его фазо-частотной характеристики (ФЧХ). Это последнее обстоятельство не всегда может быть обеспечено даже в системах, формирующих сравнительно широкополосные АЧХ излучения.

Спектральная плотность эхолокационных сигналов дельфинов может составлять 2–4 октавы. Обеспечить такую полосу пропускания затруднительно в рамках использования одной колебательной системы преобразователя. Отметим некоторые, наиболее близкие к существу рассматриваемых вопросов решения. Так, преобразователями, рассмотренными в [19, 20], обеспечивается полоса пропускания 1.5–2 октавы. При этом в гидроакустическом преобразователе [19], содержащем соосный набор разночастотных пьезокерамических цилиндров (различаются наружными и внутренними радиусами), излучение (прием) звуковых волн осуществляется в направлении, перпендикулярном их оси симметрии. В гидроакустическом преобразователе [20], состоящим из коаксиального набора нескольких пьезокерамических цилиндров с последовательно нарастающими (от оси преобразователя) диаметрами и конических отражателей, установленных между цилиндрами, которые трансформируют цилиндрические звуковые волны в продольные, излучаемые вдоль оси этой системы. В зависимости от расположения по высоте цилиндров друг относительно друга может быть образована плоская или полусферическая поверхность преобразователя, окончательно сформированная полиуретановой заливкой. Суммарная полоса пропускания таких преобразователей определяется перекрывающимися полосами частот отдельных цилиндров. Эти преобразователи больше предназначены для самостоятельной работы и неудобны для компоновки в антенне. С этих позиций более удобными оказываются стержневые преобразователи [21–24], колебательная система которых позволяет им работать на ряде связанных мод колебаний. При этом преобразователи [21, 22] позволяют достичь полосы пропускания около одной октавы, а преобразователи [23, 24] обеспечивают полосу пропускания 1.5–2 октавы. Указанные преобразователи являются сравнительно низкочастотными с достаточно сложной механической структурой – как собственно пьезостержней, так и согласующих накладок, обеспечивающих сравнительно большой коэффициент трансформации площади поперечного сечения пьезостержня  $\gamma$ , что ограничивает мощность излучения и затрудняет использование преобразователей в области частот выше 50–70 кГц.

Что касается методов, применяемых при формировании УКИ, то в них используются те же пути, что и при расширении полосы пропускания преобразователей. Исключения составляют методы, базирующиеся на возбуждении электрическими импульсами специальной формы [25] и на необратимых преобразователях [13, 26]. Так, излучающие системы на основе электрического разряда или пробоя в твердом теле, а также электродинамические преобразователи (типа «Бумер») [26], обеспечивая эффективное импульсное излучение, не позволяют управлять структурой акустического импульса и формируемой диаграммой направленности. Имитационная пневматическая модель механизма излучения щелчков дельфина [13] также пока далека от совершенства. При использовании параметрических преобразователей или антенн [27] и синтезе УКИ на разностных частотах существует возможность формирования акустической однопериодной волны с колокообразным спектром. Однако эти системы имеют очень низкий КПД (~1 %), сравнительно невысокий уровень излучения и симметричное по углу изменение спектрально-временных характеристик. Кроме того, свойства этих систем зависят от параметров

среды, определяющих степень нелинейности области взаимодействия излучаемых высокочастотных сигналов накачки, и неудобны к использованию в ограниченных по размеру водоемах.

В связи с вышеизложенным определенным интерес представляют гидроакустические преобразователи стержневого и волноводного типов со специальным фазированным возбуждением составляющих их пьезоэлементов [18, 28–32]. Определяющим фактором формирования АЧХ и ФЧХ излучения этих преобразователей является характер их возбуждения, т.е. определенные соотношения и зависимости (в том числе и от частоты) амплитуд и фаз возбуждающих электрических напряжений, подаваемых на отдельные пьезоэлементы преобразователей. Это обстоятельство позволяет не только управлять АЧХ и ФЧХ излучения преобразователей, но и корректировать их при необходимости. Рассмотрим последовательно возможности указанных преобразователей.

В общем случае структура стержневого преобразователя с фазированным возбуждением  $N$  пьезосекций схематически показана на рис. 6. Здесь каждая пьезосекция возбуждается электрическими напряжениями  $U_k = U_{km} e^{j\varphi_k}$ , отличающимися друг от друга по амплитуде  $U_{km}$  и фазе  $\varphi_k$ ,  $k = 1, \dots, N$ . Выбором соотношений между амплитудами и фазами этих электрических напряжений можно управлять путем колебания отдельных пьезосекций стержня, реализуя различные варианты работы преобразователя: многополосный, минимизации уровня тыльного излучения, широкополосный, а также их комбинацию [18]. Остановимся более подробно на варианте работы рассматриваемого преобразователя, позволяющего обеспечить существенное расширение его полосы пропускания. Наиболее полно эта задача исследована для преобразователя, содержащего две пьезосекции [28], – рассматривались решения задач синтеза (по заданным АЧХ и ФЧХ излучения определялись необходимые частотные зависимости отношения амплитуд, возбуждающих электрических напряжений и разности их фаз) и анализа (по заданным законам изменения отношения амплитуд и разности фаз определялись АЧХ и ФЧХ излучения преобразователя). В качестве примера на рис. 7 для преобразователя, содержащего две равные пьезосекции ( $p = l_1/L$ ,  $L = l_1 + l_2$ ,  $l_1$  и  $l_2$  – длины пьезосекций) и одну фронтальную, четвертьволновую согласующую накладку, приведены результаты расчета для нормированной АЧХ звукового давления и ФЧХ излучения, а также – необходимые для их реализации частотные зависимости отношения амплитуд  $U_{21} = U_{2m}/U_{1m}$  и разности фаз  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  возбуждающих электрических напряжений, которые получаются при решении задачи синтеза. Здесь в качестве частотно-зависимой переменной выбран волновой размер всего пьезостержня ( $\psi = kL$ ,  $k = \omega/c$ ,  $L$  – длина пьезостержня), состоящего из двух пьезосекций. При выполнении расчетов предполагалось, что рассматриваемый преобразователь работает в составе плоской антенны, обеспечивающей достаточную нагруженность в формируемой полосе частот. Нормирование выполнено к величине звукового давления, создаваемого синфазно возбуждаемым ( $U_{21} = 1$ ,  $\Delta\varphi = 0$ ), односторонне нагруженным пьезостержнем, без пассивных накладок. В данном примере полоса пропускания, определяемая по уровню  $-3$  дБ (см. штриховую прямую), составляет  $\Delta f/f = 128\%$ , т.е. более двух октав (122%). Поскольку рассматривается отношение возбуждающих напряжений  $U_2/U_1$ , то  $U_1$  можно считать опорным электрическим напряжением, а полученные частотные зависимости  $U_{21}$  и  $\Delta\varphi$  – законом изменения  $U_2$ , т.е.  $U_2 \sim U_{21} e^{j\Delta\varphi}$ .

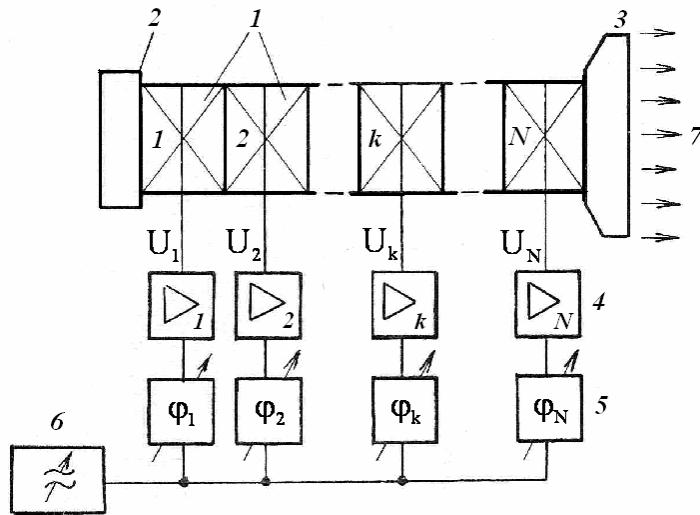


Рис. 6. Стержневой преобразователь с фазированным возбуждением пьезосекций.  
 1 – пьезосекции; 2 и 3 – тыльная и фронтальная накладки; 4 – регулируемые усилители возбуждающего напряжения; 5 – управляемые фазосдвигающие устройства; 6 – генератор сигналов; 7 – направление излучения.

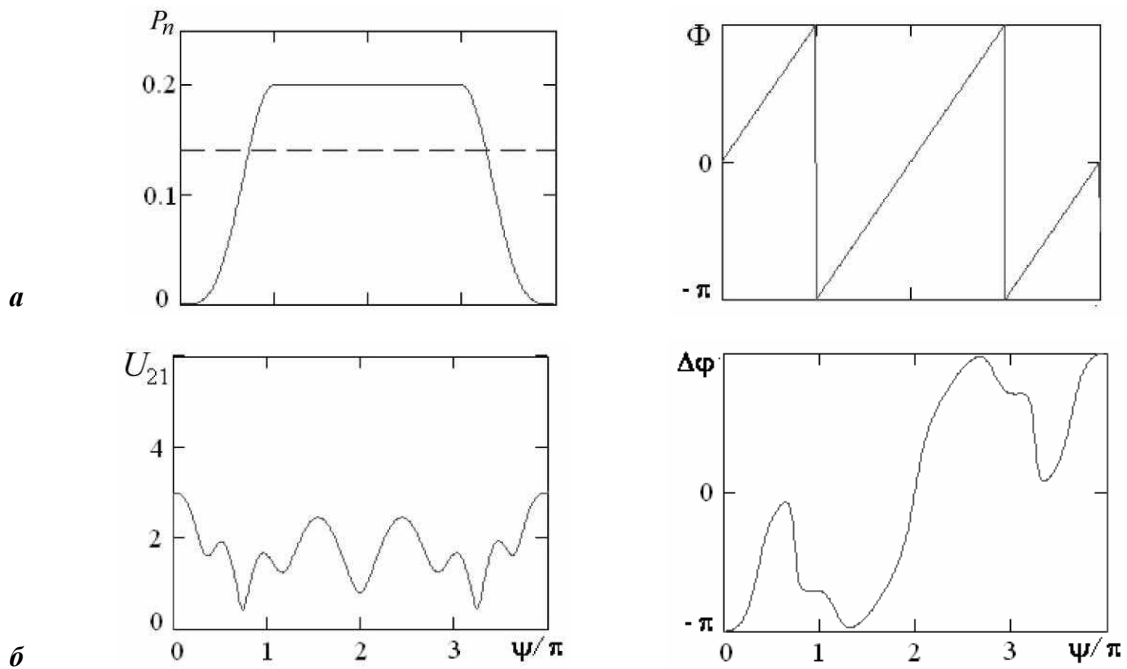


Рис. 7. Результаты расчета по задаче синтеза.

*a* – задаваемые АЧХ и ФЧХ излучения; *б* – частотные зависимости  $U_{21}$  и  $\Delta\varphi$ ,  $\gamma=1$ ,  $p=0.5$ .

Современная микропроцессорная техника в принципе позволяет реализовать необходимые частотные зависимости  $U_{21}$  и  $\Delta\varphi$  в достаточно широком диапазоне частот. Однако возможны и другие варианты фазированного возбуждения секций пьезостержня (задача анализа), когда задаются и поддерживаются в заданном диапазоне частот более простые частотные зависимости отношения амплитуд  $U_{21}$  и разности фаз  $\Delta\varphi$ , например в виде линейных функций:  $U_{21} = U_0 \pm k_U \psi$  и  $\Delta\varphi = \varphi_0 \pm k_\varphi \psi$ , где  $U_0, k_U$  и  $\varphi_0, k_\varphi$  – задаваемые амплитудные и фазовые постоянные. В частности, для рассматриваемой модели преобразователя удобно принять  $\Delta\varphi = -\pi + (\Delta\varphi_k + \pi)\psi/\psi_k$  [29], где  $\Delta\varphi_k$  – значение, задаваемое на частоте  $\psi_k$ . Такая аппроксимация частотных зависимостей  $U_{21}$  и  $\Delta\varphi$  просматривается по результатам решения задачи синтеза. При указанном фазированном возбуждении преобразователя обеспечивается эффективное излучение в областях частот

его полуволнового резонанса и на первой четной гармонике. Для преобразователей с одним и более согласующими слоями путем выбора их параметров удастся обеспечить достаточно высокий уровень излучения и между этими частотами. В качестве примера на рис. 8 приведены результаты расчетов нормированных АЧХ звукового давления для преобразователя с одной (рис. 8, *а*) и двумя (рис. 8, *б*) согласующими фронтальными накладками. При фазированном возбуждении пьезосекций полоса пропускания здесь соответственно составляет 83 и 90 % (1.5 октавы), причем использование двух согласующих фронтальных накладок хотя и приводит к увеличению продольных размеров преобразователя, но способствует формированию более равномерной АЧХ излучения. Следует отметить, что для преобразователей с фазированным возбуждением пьезосекций характерно уменьшение волновой толщины согласующих фронтальных накладок в 1.3–1.5 раз по сравнению со случаем синфазного возбуждения, а полоса пропускания расширяется в сторону высоких частот относительно полуволнового резонанса всего пьезостержня ( $\psi = \pi$ ). При этом мощность излучения этих преобразователей уменьшается не более чем в 1.5–2 раза относительно случая их синфазного возбуждения. Тем не менее это соответствует возможности достижения удельной мощности излучения 5–10 Вт/см<sup>2</sup> при напряженности электрического поля 1 кВ/см – значения, близкого к предельно допустимому для гармонического режима работы. Увеличение коэффициента трансформации  $\gamma$  способствует расширению полосы пропускания (для  $\gamma \geq 4$  до двух октав), но сопровождается уменьшением уровня излучения.

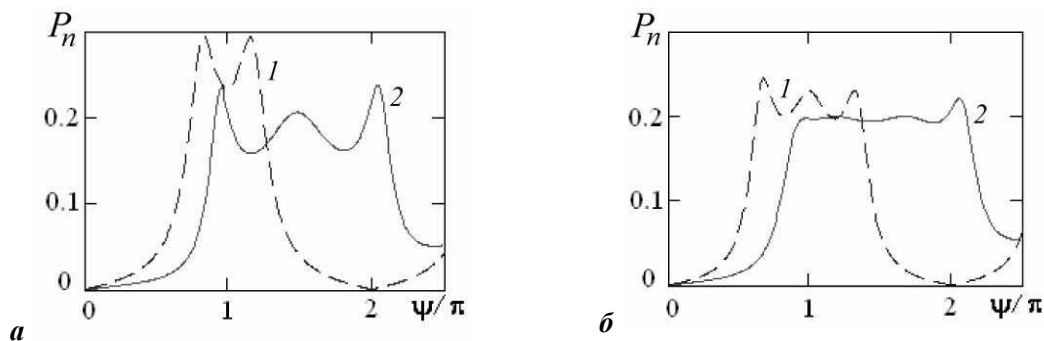


Рис. 8. АЧХ звукового давления при синфазном (1) и фазированном (2) возбуждении пьезосекций преобразователя.  
 $\gamma = 1, p = 0.35, U_{21} = 0.2 + 0.65\psi, \Delta\phi = -\pi + 1.25\psi$ .

Рассмотрим работу преобразователя волноводного типа [30], который состоит из  $N$  идентичных, соосно расположенных пьезоактивных колец с внутренним радиусом  $a$ , высотой  $l$  и межцентровым расстоянием  $d$  (рис. 9). Пьезоактивные кольца акустически разделены по торцам гибкими прокладками толщиной  $\Delta$  и возбуждаются электрическими напряжениями  $U_i = U_{im}(\omega)e^{j\psi_i(\omega)}$ , где  $U_{im}(\omega)$  и  $\psi_i(\omega)$  – амплитуда и фаза электрического напряжения – в общем случае являются функциями геометрических параметров преобразователя и частоты;  $i = 1, 2, \dots, N$ . В данном случае целесообразно выбрать фазовый множитель в виде  $\psi_i(\omega) = k_0 d (i - 1) = \omega\tau (i - 1)$ , что определяется необходимостью реализации звукового поля внутри преобразователя волноводного типа в виде бегущей волны. Здесь  $\tau = d/c_0$  – время задержки,  $c_0$  – скорость звуковой волны в жидкости, заполняющей всю внутреннюю полость преобразователя (пьезоактивные кольца) и внешней среды. Предполагается, что внешняя цилиндрическая поверхность преобразователя не является излучающей, т.е. изолируется звукомягким экраном или газом. Принцип ра-

боты преобразователя имеет сходство с антенной бегущей волны, с тем основным отличием, что излучаемое звуковое поле формируется не во внешнем пространстве, а внутри заполненного жидкостью цилиндрического волновода. Тогда каждое последующее кольцо по мере увеличения его номера будет испытывать все большую акустическую нагруженность ввиду синфазного сложения звуковых волн, бегущих в направлении 4 (фронтальное направление) (рис. 9). Иными словами, в водозаполненной полости преобразователя будет последовательно нарастать звуковое давление, действующее на очередное пьезоактивное кольцо, для которого жидкая среда становится как бы все более плотной. В итоге это приводит к увеличению полосы пропускания как отдельных колец, так и в целом преобразователя волноводного типа. Гидроакустическая антенна формируется параллельным набором таких волноводных преобразователей, подобно антенне, составленной из стержневых преобразователей. При этом требуемая характеристика направленности антенны определяется размерами ее апертуры, формируемой набором выходных отверстий водозаполненных колец.

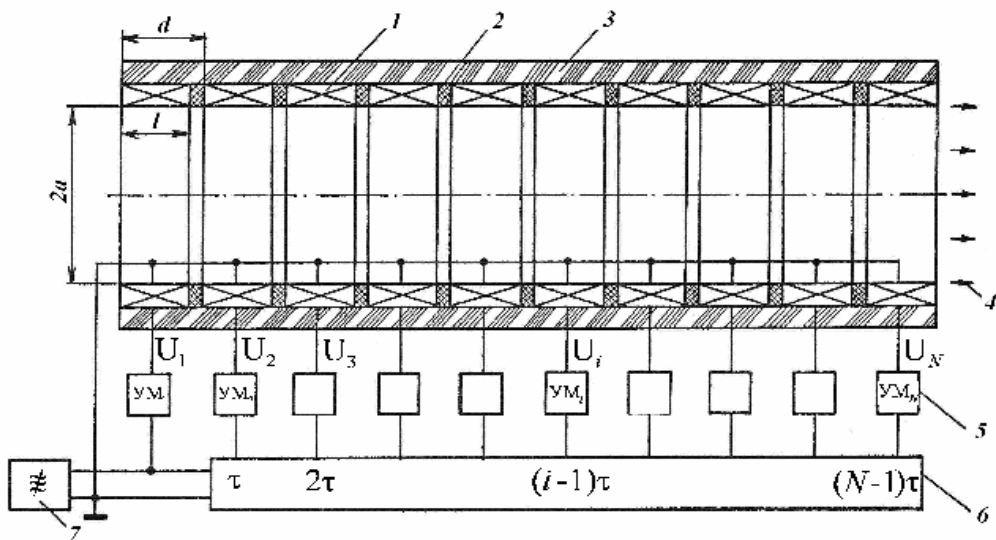


Рис. 9. Модель преобразователя волноводного типа.

1 – пьезоактивные кольца; 2 – гибкие прокладки; 3 – звукомягкий экран; 4 – направление преимущественного излучения; 5 – регулируемые усилители мощности; 6 – линия задержки; 7 – генератор сигналов.

Характер колебаний пьезоактивных колец может быть описан системой  $N$  уравнений:  $\sum_{k=1}^N Z_{ik} v_k = N_0 U_i$ ;  $i = 1, 2, \dots, N$ , где  $v_k$  – колебательная скорость кольца;  $Z_{ik}$  – собственное ( $i = k$ ) и взаимное ( $i \neq k$ ) сопротивление излучения;  $N_0$  – коэффициент электро-механической трансформации. При заданных амплитудах и фазах электрических напряжений  $U_1, U_2, \dots, U_N$  система уравнений позволяет определить амплитуды и фазы колебательных скоростей  $v_1, v_2, \dots, v_N$  (задача анализа), а при заданных амплитудах и фазах колебательных скоростей  $v_1, v_2, \dots, v_N$  система распадается на  $N$  независимых равенств, каждое из которых позволяет вычислить амплитуду и фазу электрического напряжения для соответствующего кольца (задача синтеза). Знание амплитуд колебательных скоростей позволяет определить АЧХ звуковых давлений при излучении во фронтальном и тыльном направлениях. Для частного случая задачи синтеза [32], в предположении что колебательные скорости на излучающей поверхности пьезоактивных колец определяют

ся как  $v_i = v_{im} e^{jkd(i-1)}$  и  $|v_{im}| = v_m = \text{const}$ , на рис. 10 приведены нормированные АЧХ звукового давления при излучении преобразователем волноводного типа во фронтальном  $P^{(1)}$  и тыльном  $P^{(3)}$  направлениях для числа колец  $N = 10$  и  $20$ , а также – частотные зависимости требуемых для реализации задачи синтеза амплитуд электрических напряжений ( $N=10$ ). Параметры колец, принятые при расчете: механическая добротность  $Q=3$ ,  $d/a=0.6$ ,  $\eta=0.8$  – акустомеханический КПД;  $M = U_{Nm} d_{13} \eta / a S_{33}^E$ , где  $d_{33}$  – пьезомодуль,  $S_{33}^E$  – упругая податливость. В рассматриваемом случае уровень фронтального излучения увеличивается пропорционально числу пьезоактивных колец  $N$  при сохранении формы АЧХ излучения (рис. 10, кривые 1 и 2), определяемой в основном значением  $d/a$ . Чем меньше значение  $d/a$ , тем в большей мере АЧХ излучения во фронтальном направлении приближается к прямой параллельной оси частот (волновой размер  $ka$ ). Требуемые для реализации этих АЧХ звукового давления частотные зависимости амплитуд возбуждающих напряжений носят достаточно сложный характер.

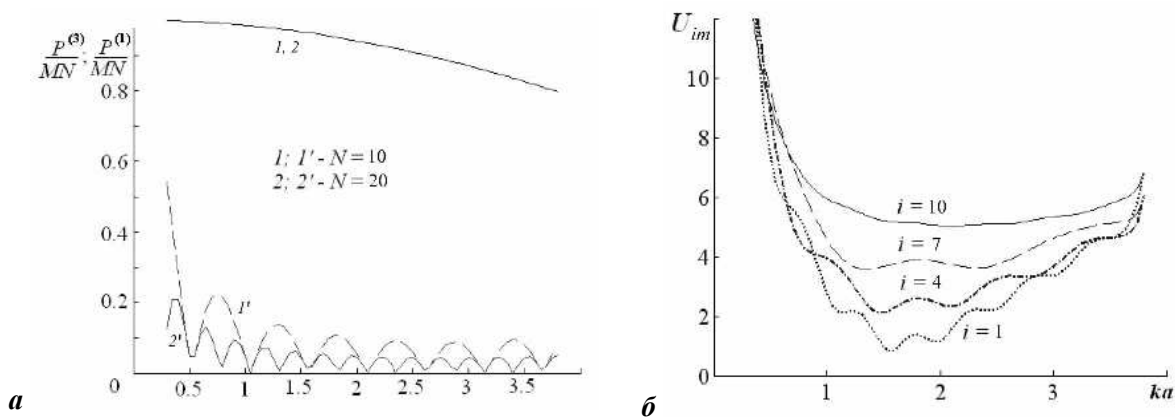


Рис. 10. АЧХ звукового давления во фронтальном (1, 2) и тыльном (1', 2') направлениях (а) и частотные зависимости амплитуд возбуждающих напряжений  $U_{im}$  для  $N = 10$  (б).

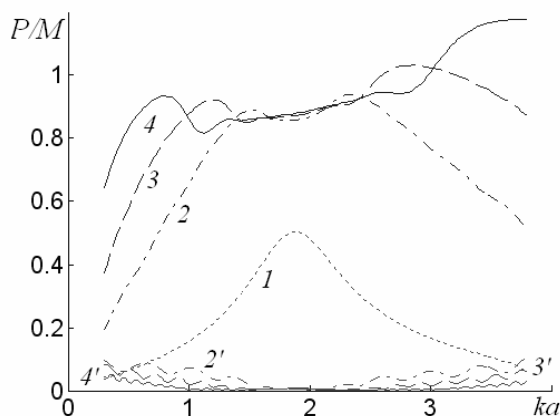


Рис.11. Нормированные АЧХ звукового давления во фронтальном (1–4) и тыльном (2'–4') направлениях.

$Q=3$ ,  $d/a=0.7$ ,  $\eta=0.7$ . 1 –  $N=1$ ,  $\Delta f/f=33\%$ , 2 –  $N=10$ ,  $\Delta f/f=96\%$ , 3 –  $N=20$ ,  $\Delta f/f=138\%$  (2.4 октавы); 4 –  $N=40$ ,  $\Delta f/f=162\%$  (3.3 октавы).

Однако здесь можно выделить две характерные тенденции: 1) рост амплитуд  $U_{im}$  (при фиксации частоты) с увеличением номера  $i$  пьезоактивного кольца практически во всем рабочем диапазоне частот и 2) подобность частотных зависимостей для  $U_{im}$  (частотная характеристика полосового фильтра).

В случае простейшей аппроксимации распределения амплитуд возбуждающих напряжений (задача анализа) в виде последовательно нарастающего закона изменения  $U_{im} = U_{Nm} \left[ p + \frac{1-p}{N-1} (i-1) \right]$  в рассматриваемом диапазоне частот [31], где  $U_i = U_{im} e^{jkd(i-1)}$  и  $p = U_{1m} / U_{Nm}$ ; на рис. 11 приведены результаты расчета АЧХ звукового давления во фронтальном



и тыльном направлениях для разных значений  $N$ .

Здесь принято  $p = 0.2$ , которое позволяло достичь наибольшей полосы пропускания. Уже это приближение обеспечивает в зависимости от значения параметра  $Nd/a$  эффективное излучение в полосе частот, достигающее нескольких октав. Возможно рассмотрение и других видов задания закона изменения амплитуд возбуждающих напряжений  $U_{im}$ , приближающих характер их изменения к зависимостям, определяемым из решения задачи синтеза (см., например, рис. 10, б). Это позволит сократить число пьезоактивных колец при обеспечении заданной полосы пропускания. Что касается ФЧХ излучения преобразователя волноводного типа, то она в основном определяется фазовым множителем  $e^{jkd(i-1)}$  и является практически линейной.

*Научно-исследовательская работа выполнена по заданию Министерства обороны РФ, гос. контракт № 1326 (2003–2005 гг.), рег. № 1604947 (шифр «Цинтия»).*

### Литература

1. Дубровский Н.А. Эхолокация у дельфинов // М.: ЦНИИ «Румб», 1976.
2. Белькович В.М., Хахалкин Э.Н. Этолого-акустические корреляты // Черноморская афалина *Tursiops truncatus ponticus*. Морфология, физиология, акустика, гидродинамика / Под ред. В.Е.Соколова и Е.В.Романенко. 1997. М.: Наука. С.700.
3. Жуковский Ю.Г., Зайцева К.А., Кривченко А.И., Королев В.И. Механизмы определения скоростных характеристик целей дельфинами и технические средства гидролокации и радиолокации // Рос. физиологич. журн. им. И.М.Сеченова. 2005. Т.91, № 8. С.872–884.
4. Au W.W.L., Floyd R.W., Penner R.H., Murchison A.E. Propagation measurements of echolocation signals of the Atlantic bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus* Montagu, in open water // J. Acoust. Soc. Am. 1974. 56. P.1180–1290.
5. Иванов М.П. Эхолокационные сигналы дельфина при решении задач в сложных акустических условиях // Акуст. журн. 2004. Т.50, № 4. С.550–561.
6. Ivanov M.P., Kashinov V.V. Interference Immunity of the Dolphin's *Tursiops truncatus* Sonar to Narrow-Band Interference, Symposium on Bio Sonar Systems and Bio-Acoustics, Institute Acoustics, Loughborough University. 2004. V.26. Pt.6.
7. Stefanov V.E., Ivanov M.P., Kashinov V.V., Stepanov B.G. Mechanisms of interference resistance of the sonar system of dolphins exposed to man-made interference // Symposium on Bio Sonar Systems and Bio-Acoustics, Institute Acoustics, Loughborough University. 2009.
8. Иванов М.П., Михеев А.Г., Кулагин В.В. Эхолокационные сигналы дельфина при обнаружении протяженных объектов // Межд.конф. «Морские млекопитающие Голарктики». М. 2004. С.234–237.
9. Au W.W.L. Target detection in noise by echolocation dolphins // Sensory Abilities of Cetaceans / Ed. by J.Thomas and R.Kastelein. Plenum Press, New York, NATO ASI Ser.A. 1990. P.203–216.
10. Оганов Т.А. Помехоустойчивость инвариантного приема импульсных сигналов. М.: Радио и связь, 1984. С.176.
11. Тужилин С. М. Общая формула спектральной плотности сигналов, повторяющих вид функции Эрмита // Радиотехника. 1987. № 11. С.40–42.
12. Иванов М.П., Иваненко Ю.В. Механизмы управления направленностью акустического излучения у зубатых китов // Сб. XX Сессии РАО. 2008. Т.3. С.168–171.
13. Дубровский Н.А., Гладиллин А.И., Мель Б., Валберг М. Моделирование источника зондирующих импульсов у дельфина: влияние критических параметров // Акуст. журн. 2004. Т.50, № 4. С.543–549.
14. Giro L.R., Dubrovskiy N.A. A plausible mechanism of acoustic click production in the dolphin // J. Acoust. Amer. 1999. V.105, N 2. Pt.2. P.1263.
15. Дубровский Н.А., Заславский Г.Л. О роли костей черепа в формировании пространственно-временной структуры зондирующих импульсов дельфина // Акуст. журн. 1975. Вып.3. С.409–414.
16. Ivanenko U.V., Stefanov V.E., Ivanov M.P. Spatial characteristics of the dolphin melon acoustic field // Symposium on Bio-Sonar Systems and Bio-Acoustics. 16<sup>th</sup> September 2004. Loughborough University. V.26. Pt.6. 2004.
17. Марков В.И. О тонком сканировании диаграммой направленности звукового луча при локационном зондировании подводных предметов у дельфина афалины // Тез. докл. 5-го Всесоюз. совещ. по изуч. морских млекопит. Ч.2. Махачкала, 1972. С.148–149.