

УДК 551.046.0+551.463.2 Т78

Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». — СПб. : Издательство «ЛЕМА», 2023 — 492 с.

ISBN 978-5-00105-780-2

В сборнике трудов представлены доклады о достижениях отечественных и зарубежных ученых в области гидрофизики и гидроакустики. Особое внимание уделено результатам фундаментальных исследований и их внедрению при решении прикладных проблем, в том числе при разработке технологий мониторинга Мирового океана с целью исследования и освоения его ресурсов, предупреждения природных катастроф и чрезвычайных ситуаций, при изучении рельефа прибрежных акваторий и экономических зон, при обосновании методов и средств борьбы с подводным терроризмом и минной опасностью, при разработке датчиков и систем контроля и управления техногенными процессами.

Для научных работников и инженеров, а также для широкого круга специалистов, интересующихся подводной акустикой и гидрофизикой.

Конференция проводилась с 14 по 16 сентября 2022 г.

Доклады публикуются в редакции авторов.

Оригинал-макет изготовлен в Санкт-Петербургском филиале Института океанологии РАН.

ОРГАНИЗАЦИИ-СОУЧРЕДИТЕЛИ

Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (СПбФ ИО РАН)

АО «Концерн «Океанприбор»

АО «Концерн «Морское подводное оружие — «Гидроприбор»

Научный совет по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики
Санкт-Петербургского научного центра Российской академии наук (СПбНЦ РАН)

Авторы - составители:

чл.-корр. *А. А. Родионов;*
д-р физ.-мат. наук *Ф. Ф. Легуша;*
д-р техн. наук *И. А. Селезнёв;*
д-р техн. наук *В. В. Малый*

Рецензенты:

чл.-корр. *А. А. Родионов;* д-р геогр. наук *А. В. Зимин;* д-р техн. наук *В. В. Малый;*
д-р техн. наук *И. А. Селезнёв;* д-р физ.-мат. наук *Ф. Ф. Легуша;* канд. геогр. наук *А. В. Исеев;*
канд. техн. наук *В. А. Попов;* канд. техн. наук *Д. А. Никитин;* канд. техн. наук *К. Г. Погудин;*
канд. техн. наук *Р. Ю. Монахов;* канд. физ.-мат. наук *А. Ю. Дворников;*
канд. физ.-мат. наук *В. А. Горчаков;* канд. физ.-мат. наук *Л. В. Григорьев;*
канд. физ.-мат. наук *С. Д. Мартыанов;* акад. *А. А. Клещев*

ISBN 978-5-00105-780-2

© Санкт-Петербургский филиал
Института океанологии
им. П. П. Ширшова РАН, 2023
© Издательство «ЛЕМА», 2023

БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И КИТООБРАЗНЫХ

М. П. Иванов, канд. биол. наук, *Н. А. Данилов*¹, канд. техн. наук, *М. И. Калинов*², д-р техн. наук, *А. А. Родионов*^{3, 4}, чл.-корр. РАН, *В. Е. Стефанов*, канд. биол. наук

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия

²Санкт-Петербургское отделение Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, Россия

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

⁴Санкт-Петербургский научный центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

BIOTECHNICAL SYSTEMS BASED ON THE USE OF TECHNICAL FACILITIES AND CETACEANS

M. P. Ivanov, Ph.D., *N. A. Danilov*¹, Ph.D., *M. I. Kalinov*², Dr.Sc., *A. A. Rodionov*^{3, 4}, corresponding member of RAS, *V. E. Stefanov*, Ph.D.

Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

¹St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg branch of the Section of Applied Problems at the Presidium of RAS, Russia

³Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

⁴St. Petersburg Research Center of RAS, St. Petersburg, Russia

Рассматриваются новые решения некоторых технических проблем привлечения животных к выполнению задач двойного назначения. В первую очередь, это задачи служебного использования животных на основе новых технологий управления двигательным поведением с помощью акустической связи, реализующей применение естественных акустических сигналов коммуникации дельфинов. Создание новой технологической базы, а также модернизированного методического обеспечения является основой развития технологий лингвистического анализа акустических последовательностей и использования новых знаний при построении биотехнических комплексов.

New solutions to some technical problems of attracting animals to perform dual-purpose tasks are considered. First of all, these are the tasks of the official use of animals based on new technologies for controlling motor behavior using acoustic communication, which implements the use of natural acoustic signals of dolphin communication. The creation of a new technological base, as well as modernized methodological support, is the basis for the development of technologies for the linguistic analysis of acoustic sequences and the use of new knowledge in the construction of biotechnical complexes.

Использование одомашненных животных для нужд человечества происходило во все времена [1]. Первоначально это было связано с сельским хозяйством (лошадь, корова, коза, собака, птицы и т.д.), а затем — с военными задачами (тигры, львы, слоны и т.д.). Обезьяны свыкаются с человеческим обществом и помогают человеку добывать плоды, находящиеся на высоких пальмах. С помощью обезьян и собак успешно реализуется программа помощи слепым и слепоглухим. Развитие направления одомашнивания морских животных привело к появлению новых задач исследования дельфинов: гидробионических задач, задач исследования помехозащищенности природного сонара для создания их технического аналога [2]. Особо следует выделить задачи военного характера: охрана особо важных объектов в сложных условиях антропогенных и естественных помех; поиск утраченных подводных объектов; поиск и обезвреживание подводных диверсантов [3].

Как показала практика, одомашнивание дельфина и обучение основным командам требует до 6–8 месяцев непрерывного взаимодействия между дельфином и дрессировщиком. Однако накопившийся материал по взаимодействию с дельфинами показал ограниченность существующих каналов передачи информации между дельфином и дрессировщиком. Зрительный канал работает только при хорошей освещенности, а тактильный — только при непосредственном контакте. И тот и другой каналы являются каналами ближнего действия (на расстоянии не более 15 м), что значительно сужает возможности использования дельфинов в биотехнических системах. Использование животных в открытой воде для решения прикладных задач, в том числе для поиска утраченных объектов связано, прежде всего, с решением поисково-спасательных и экологических задач [4]. При этом проявляется ограниченность имеющихся

возможностей передачи информации, что особенно важно при поиске только что утраченных объектов или объектов, не встречавшихся во время обучения. Поэтому абстрагирование видео и акустического образа от конкретных объектов является одной из важнейших современных задач обучения и использования животных для работы в открытой акватории. Необходимо добиться такого взаимодействия между дельфином и дрессировщиком, при котором подаваемые команды однозначно соответствовали бы пространственной ориентации (нырнуть глубже, повернуть направо, повернуть налево, вверх или вниз), «пониманию» дельфином не только существительных, но и глаголов, а также местоимений и числительных. Таким образом, решение тех же самых задач, но на новом уровне контакта между дельфином и дрессировщиком, значительно расширит возможности дрессировки служебных животных за счет полученных знаний при исследовании когнитивных функций дельфинов — памяти, словарного запаса, скорости обучения, счета, возможности вербального взаимодействия, управления акустическим поведением, дальности и помехозащищенности канала вербального взаимодействия [5].

В настоящее время дельфин рассматривается как робот для подводных работ, но в перспективе необходимо иметь интеллектуального робота для поисково-спасательных операций на море, сбора данных, высокоточного картирования дна и доставки минералов на поверхность воды. Решения таких задач требует проведения планомерных исследований по изучению когнитивных функций дельфинов с использованием технологий многоканальной сверхширокополосной системы регистрации сигналов морских млекопитающих с обработкой биоакустической информации в реальном масштабе времени. Многоканальность позволяет точно идентифицировать сигналы с конкретным животным, выполняющим поставленную дрессировщиком задачу. Сверхширокополосность тракта регистрации дает возможность точно описать принимаемые сигналы как в частотной, так и во временной областях. Для точного понимания исследуемых сигналов морских млекопитающих необходимо иметь возможность воспроизведения эксперимента, в котором провокация двигательного или акустического поведения дельфина точно рассчитывается на основе известных методических приемов лабораторного опыта. Такие эксперименты важны при решении дельфином задач обнаружения подводных объектов на различных дистанциях и в условиях искусственного воздействия с помощью антропогенных помех.

Последние исследования в этой области показали, что некоторые зарегистрированные биосигналы являлись результатом искажения их в приемном тракте. Особенно это касается сигналов, записанных в полосе частот до 20 или 50 кГц. На рис. 1 представлена полная последовательность сигналов дельфина в одном испытании при решении задачи поиска подводных объектов в статическом режиме эхолокации в сложных условиях преднамеренных низкочастотных помех. Дальность объекта поиска составляла 200 м при глубине погружения мишени 2 м и преднамеренной широкополосной помехе до 100 кГц на расстоянии 220 м от животного. Как видно из осциллограммы (рис. 1, *а*), дельфин использует пакеты ультракоротких импульсов (УКИ) с время-импульсной модуляцией (ВИМ). На динамическом спектре (рис. 1, *б*) хорошо выделяются спектры УКИ, которые не превышают величину 200 кГц, что обусловлено шириной полосы частот тракта регистрации. При рассмотрении динамического спектра в низкочастотной области (рис. 1, *в*) на частотах от 1 кГц до 18 кГц сигналы не выделяются, т.е. в зарегистрированных пакетах существуют только сверхширокополосные УКИ [6].

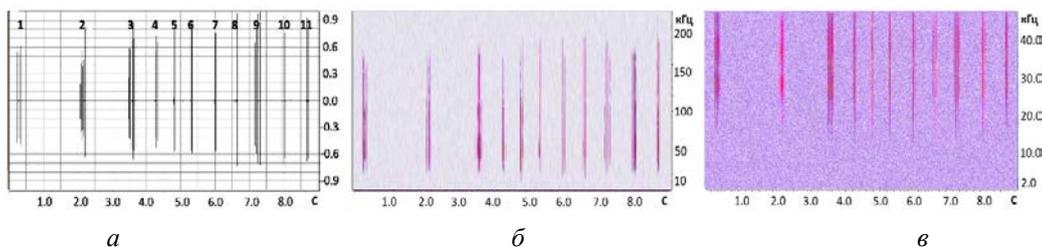


Рис.1. Последовательность пакетов УКИ при решении задачи обнаружения в условиях низкочастотный преднамеренной помехи.

а — осциллограмма; *б* — динамический спектр в полосе частот до 200 кГц;

в — динамический спектр в полосе частот до 45 кГц.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Исследование сонара дельфина в условиях динамики, когда дельфин движется на максимальной скорости, требует надежной фиксации видео и акустического оборудования на теле животного. В данном случае необходимо иметь не только сверхширокополосную аппаратуру, но и максимально ее миниатюризировать с необходимым креплением на коже или специальном бандаже на животном. Сложность реализации этой задачи приводит к получению результатов акустических измерений с большими искажениями.

В современных исследованиях показано, что дельфины активно используют как режим моноимпульсной эхолокации, так и режим мультиимпульсной эхолокации с ультракороткими биполярными импульсами с относительной широкополосностью до 0,7. В режиме моноимпульсной эхолокации интервал между импульсами в отличие от идеального наблюдателя (наблюдатель работает без задержки) задержка изменяется в зависимости от помеховых условий проведения эксперимента. При этом коэффициент перекрытия составляет величину $\sim 1.1 \div 1.3$. При работе в сложных акустических условиях дельфин излучает пакеты ультракоротких импульсов с использованием время-импульсной модуляции интервала между импульсами в пакетах. Количество импульсов в пакетах зависит от акустической обстановки и наличия цели, а коэффициент перекрытия может увеличиваться до $\sim 1.5 \div 1.7$. При отсутствии цели в секторе обзора, коэффициента перекрытия увеличивается до $\sim 2 \div 3$, а в особо сложных условиях и до ~ 4 [7].

В процессе создания системы вербального взаимодействия необходимо иметь соответствующее оборудование для подводного воспроизведения видеорядов и аппаратуры акустического взаимодействия между животными либо между дельфином и дрессировщиком. Основная направленность исследований при этом состоит в провокации вербального взаимодействия с помощью синтеза и трансляции коммуникационных сигналов во время эксперимента, а также в сопоставлении сценария эксперимента и полученного акустического ряда, излучаемого экспериментальным животным. База данных таких сигналов с сопоставлением сценария двигательного и акустического поведения позволит провести лингвистический анализ вербального поведения. Как показали первые эксперименты, дельфины в подобных условиях используют пакеты УКИ с ВИМ интервала между импульсами с переменной длительностью пакетов и количеством импульсов в пакетах. При этом возникает вопрос для стороннего наблюдателя: «Чем отличаются пакеты УКИ импульсов, используемых дельфином для эхолокации в сложных условиях акустических помех и пакеты УКИ при вербальном взаимодействии?». Последние измерения показали, что в пакетах, состоящих из УКИ с ВИМ и фиксируемых при вербальном взаимодействии, частотный спектр большинства импульсов достигает 600 кГц, что хорошо заметно при регистрации этих сигналов в 2–3 м от животного. Минимальный интервал между импульсами в пакетах составляет 2 мс а максимальный — 120 мс, причем коэффициент модуляции составляет величину $K_{\text{мод}} = 0,93 \pm 0,03$ для одних пакетов и для других $K_{\text{мод}} = 0,3 \pm 0,2$ ($K_{\text{мод}} = (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) / (t_{\text{max}} + t_{\text{min}})$). Такой значительный разброс коэффициента модуляции повторяем, как повторяемы длительность некоторых пакетов и количество импульсов в пакетах. В пакетах вербального взаимодействия, как правило, присутствуют частотно-модулированные (ЧМ) импульсы со слабо выраженной модуляцией или с ярко выраженной модуляцией несущей и длительностью, соизмеримой с длительностью пакета. В некоторых пакетах УКИ с ВИМ встроены два ЧМ импульса. Один импульс со слабо выраженной ЧМ, а второй импульс с ЧМ от 5 кГц до 25 кГц и более.

Таким образом, информационная нагрузка для пакетов с УКИ эхолокационных сигналов состоит во временном способе кодировании собственной последовательности импульсов в пакетах в отличие от сигналов, излучаемых другими особями. Если полоса частот регистрирующего тракта значительно снижена или место регистрации сигналов значительно удалено от максимума диаграммы направленности, то спектрально-временная структура биполярных УКИ импульсов будет нарушена за счет изменения пространственной структуры поля излучения, что приведет к исчезновению высокочастотных составляющих в пакетах импульсов и, в конечном итоге, к деструкции пакета и превращению его в шумоподобный сигнал с длительностью, равной длительности излученного пакета. Информационная нагрузка для пакетов импульсов вербального характера содержится в ВИМ, которая инвариантна к угловым искажениям сигнала, но чувствительна к искажению спектра импульсов в зависимости от угла наблюдения (рис. 2).

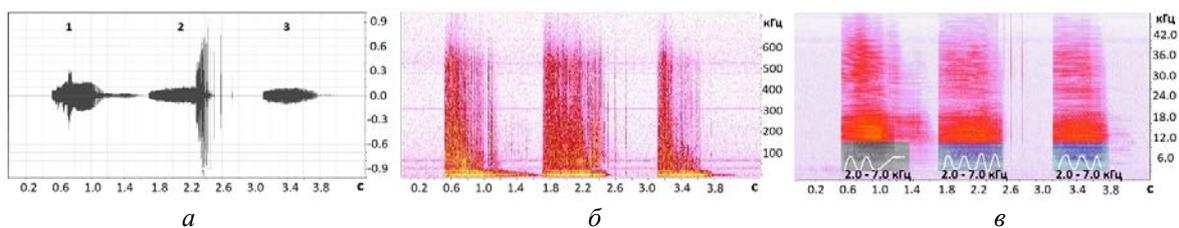


Рис. 2. Полная последовательность пакетов УКИ при вербальном взаимодействии с изображением на подводном мониторе.

a — осциллограмма; *b* — динамический спектр в полосе частот до 700 кГц;
c — динамический спектр в полосе частот до 45 кГц с ярко выраженными ЧМ импульсами с псевдоимпульсной модуляцией несущей.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Для сохранения информационной части (по углу) в некотором виде необходимо, чтобы пространственная характеристика поля излучения сигналов коммуникации была шире, чем у сигналов эхолокации (это предположение нужно доказывать экспериментально). ЧМ сигнал, содержащийся в пакетах коммуникационных сигналов, также инвариантен к угловым искажениям спектра, т.к. на такой низкой частоте пространственные характеристики поля, как правило, гладкие и пологие и не содержат острых пиков, как на высоких частотах. Причем это относится и к ЧМ импульсам с малой модуляцией, так и к импульсам со значительной модуляцией несущей, т.е. возможно, что в сигналах дельфина природа использует двухуровневую частотную модуляцию (ДЧМ).

Традиционные активные гидроакустические системы в качестве несущего колебания при передаче информации используют гармонические или квазигармонические колебания. Расширить полосу частот в антенне излучения или приема мешают технологические ограничения построения широкополосных излучающих антенн [8], что приводит к комплексу проблем, свойственных традиционным узкополосным волновым сонарам: интерференции и многократным отражениям от препятствий, низкой проникающей способности сигнала, низкой помехоустойчивости и информационной незащищенности каналов передачи данных [9]. Хорошо известно, что риск столкновения мобильных подводных объектов связан с принципиальным противоречием противостояния в подводной среде — требованиями максимальной дальности обнаружения цели и минимальной дистанции скрытности. Степень заметности гидроакустических средств наблюдения определяется не только мощностью и характеристикой направленности излучающей антенны, но и пространственными частотно-временными параметрами сигналов. Именно эти факторы и определяют задачу проводимых исследований биологической акустической системы в условиях, приближенных к естественной сигнально-помеховой обстановке.

Системы со сверхширокополосными сигналами в большинстве прикладных задач обладают рядом преимуществ по сравнению с узкополосными что позволяет успешнее решать задачи обнаружения и распознавания подводных объектов, повышение информационного объема и скрытности передачи данных, а также повышение точности определения местоположения в навигации. Конечно, в настоящее время это только прогнозируемые параметры выигрыша, поскольку на практике необходимо иметь технический аналог подобной системы. Это возможно только после достижения соответствующего уровня технологии генерации мощных сверхкоротких импульсов с практически неограниченным ресурсом непрерывной работы, с высокой стабильностью и большой частотой повторения, технологии излучения таких импульсов в пространство (сверхширокополосная антенна), технологии скоростной обработки больших массивов информации (вычислительная техника и системы построения всей системы цифровой обработки данных).

Применение сверхширокополосных сигналов в системах передачи данных по гидроакустическому каналу позволит значительно повысить ее надежность и защищенность от несанкционированного проникновения, благодаря технологии расширения спектра [10]. Излучение ультракоротких биполярных импульсов выше полосы 1 МГц технологически уже реализовано в акустических томографах. Но необходимо получить такие же возможности и в

более низкочастотной части спектра, в той области частот, в которой работают китообразные: сигналы коммуникации — до 600 кГц, а сигналы эхолокации — до 100 кГц и менее. Особенно, это касается эхолокационных сигналов усатых китов, для которых регистрация и анализ сигналов эхолокации исследованы ограниченно. В технических системах предполагается создать антенну для излучения мощных ультракоротких биполярных широкополосных импульсов, т.к. такие сигналы не подвержены кавитации, даже при очень больших уровнях акустического давления. Технические системы по этому параметру в зависимости от частоты несущей ограничены пределами 220–230 дБ. Максимальный уровень акустического давления, который можно получить при излучении сигналов, подобных сигналам дельфина, гораздо выше и в настоящее время не определен.

Иными словами, основные отличия сонара китообразных от технических гидролокаторов состоят в том, что технические системы используют монохроматические импульсы для локации подводного пространства с разной частотой несущей, а биологический сонар использует сверхширокополосные УКИ биполярной структуры с неопределенным спектральным максимумом («сигнал без несущей») в различных частотных диапазонах и ВИМ, пакеты УКИ с ВИМ, длинные ЧМ сигналы, а также составные сигналы, такие как пакеты УКИ с ВИМ со встроенными ЧМ длинными импульсами, причем сигналы перекрываются по спектру друг с другом и могут излучаться одновременно. Синтезировать такие сигналы для создания преднамеренной помехи очень сложно, т.к. частотно-временные параметры зависят от угла наблюдения, и подобрать сигнал для подавления такой сверхширокополосной системы практически невозможно. Кодирование пакетов с ВИМ сигналов эхолокации дает возможность отстраиваться от сигналов других особей и выделять эхо-сигналы на фоне других сигналов по кодовой последовательности ВИМ.

Поле излучения сигналов эхолокации имеет нестационарную структуру, которая меняется от импульса к импульсу с помощью медленного сканирования пространства (поворот головы), быстрого сканирования (акустической линзой), изменением профиля луча (изменения геометрии акустической линзы). Поэтому посторонний наблюдатель не способен определить спектрально-временные параметры излученного импульса и создать соответствующую помеху. Помехозащищенность при этом обеспечивается разнообразием изменчивости сигналов, а скрытность обеспечивается нестационарной структурой поля излучения (изменением профиля пространственной характеристики поля излучения (рис. 3), минимальным временем излучения (биполярный импульс) и кодированием собственного излучения от сигналов других особей. В некоторых случаях при поиске цели, дельфин использует излучение с помощью формирования двух лучей одновременно (рис. 3).

Полученные результаты нашли свое подтверждение при проведении аналогичных работ на дельфине белухе (Владивосток, бухта Витязь) [11] и в экспериментах с применением методики акустической обратной связи в Сан-Диего [12]. В Сан-Диего работы по изучению адаптивных возможностей сонара китообразных продолжаются в целях исследования динамики излучения пакетов УКИ с ВИМ и формирования концепции обработки таких сигналов в слуховой системе дельфина.

В эксперименте в статическом режиме эхолокации использовалась система акустической обратной связи, что позволило получить значение энергетической дальности 850 м при использовании дельфином пакетов УКИ с ВИМ (рис. 1, а) [6]. Полученный результат обнаружения объекта на дальности 650 м [7] подтверждается установленным значением энергетической дальности.

Для демонстрации возможностей использования животных в задачах охраны поставлен специальный эксперимент, в котором дельфины работали в режиме запрос-ответ в условиях непрерывного наблюдения в течение 15 суток (рис. 4). [13, 14]. Эксперимент был остановлен самими экспериментаторами из-за собственной усталости решения задачи в непрерывном режиме длительное время.

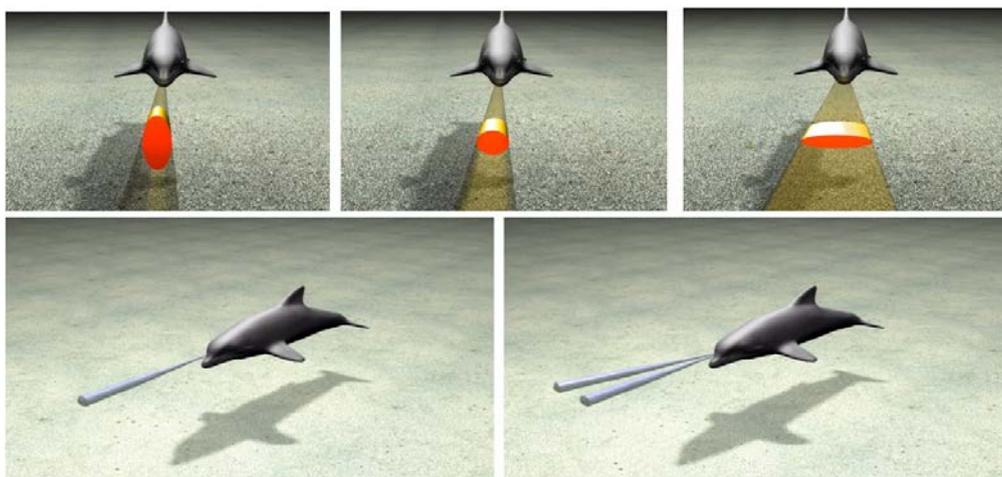


Рис. 3. Изменение профиля пространственной характеристики поля излучения и формирование одного либо двух лучей одновременно.

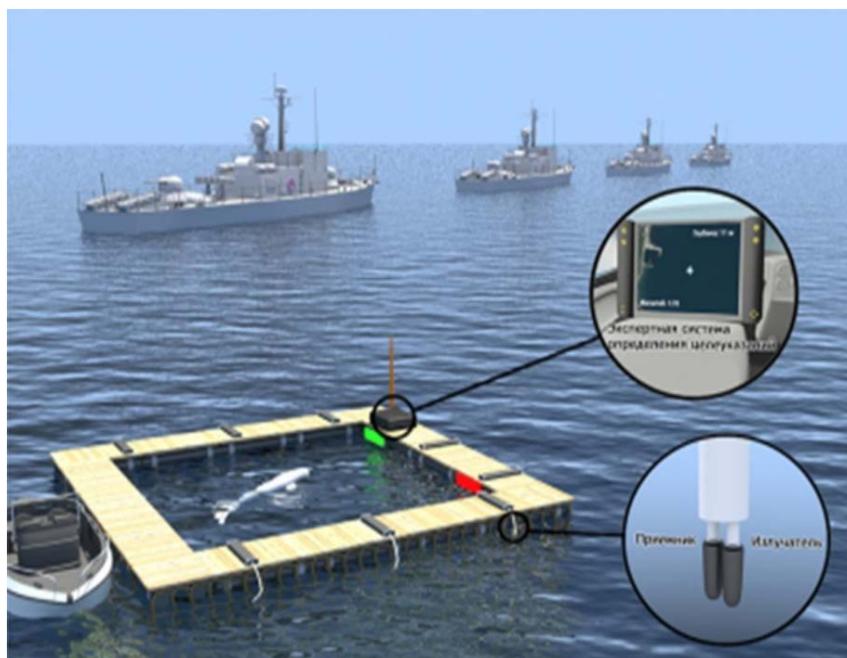


Рис. 4. Биотехнический комплекс охраны территорий в открытой акватории с системой целеуказания по сигналам эхолокации.

Таким образом, создание биотехнического комплекса с системой целеуказания и автоматизированной системой подготовки животного — это задача, которая может и должна быть оперативно решена в современных условиях. С помощью биотехнического комплекса появляется возможность не только тренировать дельфина и человека-оператора, но и обучать и совершенствовать интеллектуальную информационную систему корабельной охраны. Биотехнический комплекс должен снабжаться гидроакустической системой контакта с дельфином, обученного выполнению гидроакустических команд и подтверждений. Причем система акустических сигналов обмена информацией должна состоять из сигналов, имитирующих вербальное взаимодействие между дельфинами во время исследования когнитивных функций. Поэтому создание современной системы «биологический сонар — технический аналог» является необходимой задачей при разработке многоплановых роботизированных комплексов с активным применением технологий искусственного интеллекта.

Литература

1. Иванов А. А. Этология с основами зоопсихологии: Учебное пособие. СПб.: Изд. «Лань», 2007. 624 с.
2. Vincent M. J., Sayigh L. S. Communication in bottlenose dolphins: 50 years of signature whistle research // *J. of Comparative Physiology A*. 2013. Issue 6. Vol. 199. P. 479–489.
3. Стародубцев Ю. Д., Надолишня А. П. История, современное состояние и перспективы служебного использования китообразных в составе биотехнических систем двойного назначения // *Фунд. и прикл. гидрофиз.* 2011. Т. 4, № 3. С. 123–128.
4. Стародубцев Ю. Д., Надолишня А. П. Некоторые аспекты взаимодействия человека и дельфина // *Тр. Первой Междун. науч.-практ. конф. «Экологическое партнёрство. Аспекты взаимодействия человека и животного в современном обществе»*. СПб.: НОИР ООО «ИКЦ», 2010. С. 136–140.
5. Иванов М. П., Толмачев Ю. А., Тулуб А. А., Леонова Л. Е., Романовская Е. В. Изучение когнитивных функций дельфина (*Delphinapterus leucas*) // *Эволюционной биохимии и физиологии*. 2018. Т. 54, № 3. С. 217–219.
6. 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.
7. Иванов М. П. Эхолокационные сигналы дельфина (*Tursiops truncatus*) при обнаружении и распознавании подводных объектов. СПб: канд. диссертация. 2000.
8. Иванов М. П., Степанов Б. Г. Исследование акустического биосонара дельфина и возможности построения его технического аналога // *Фунд. и прикл. гидрофиз.* 2011. Т. 4, № 3. С.108–121.
9. Воронин В. А., Зайцев А. А., Пивнев П. П., Тарасов С. П. Широкополосные антенны гидроакустических систем подводного наблюдения и связи для оснащения необитаемых аппаратов // *Тр. XI Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб: Наука, 2012. С.108–111.
10. Архипкин В. Я., Мешковский К. А. Сравнительная помехозащищенность систем связи с широкополосными и узкополосными сигналами // *Информация и космос*. 2004. № 3. С. 22–27.
11. Рутенко А. Н., Вишняков А. А. Временные последовательности гидроакустических сигналов, генерируемых белухой при поиске и лоцировании подводных объектов // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52, № 3. С. 375–384.
12. Finneran, J.J. Dolphin 'packet' use during long-range echolocation tasks // *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. Vol. 133. P. 1796–1810. <https://doi.org/10.1121/1.4788997> Google Scholar Scitation.
13. Ridgway S., Keogh M., Carder D., Finneran J., Kamolnick T., Todd M., Goldblatt A. Dolphins maintain cognitive performance during 72 to 120 hours of continuous auditory vigilance // *J. of Experimental Biology*. Published by The Company of Biologists. 2009. Vol. 212. P 1519–1527. doi:10.1242/jeb.027896.
14. Branstetter B. K., Finneran J. J., Fletcher E. A., Weisman B. C., Ridgway S. H. Dolphins Can Maintain Vigilant Behavior through Echolocation for 15 Days without Interruption or Cognitive Impairment // *Published: October 17, 2012. DOI: 10.1371/journal.pone.0047478*.