

ВОЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И НАЦИОНАЛЬНАЯ ОБОРОНА

УДК 681.519

**ЗАЙЦЕВА КИРА АЛЕКСАНДРОВНА,
КОРОЛЕВ ВАЛЕНТИН ИВАНОВИЧ,
АХИ АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,
БУТЫРСКИЙ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ,
САПРЫКИН АЛЕКСЕЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

СПОСОБНОСТЬ ДЕЛЬФИНОВ К ВОСПРИЯТИЮ И КЛАССИФИКАЦИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ

АННОТАЦИЯ

Изучена способность слуховой системы дельфина воспринимать и классифицировать шумоподобные сигналы, имитирующие естественные шумы моря. Результаты исследований, проведенные в морской бухте при свободном передвижении животных, показали, что дельфины способны определять шумоподобные сигналы и относить их к определенному классу, используя инвариантные признаки, такие как ритмическая последовательность импульсов, независимо от частотно-временного масштаба представления сигнала.

Ключевые слова: дельфин; обнаружение; классификация; шумовой сигнал; помеха; эксперимент; модель.

**ZAYTSEVA K.A.,
KOROLEV V.I.,
AKHI A.V.,
BUTYRSKIY E. YU.,
SAPRYKIN A.V.**

CAPABILITY OF DOLPHINS FOR PERCEPTION AND CLASSIFICATION OF THE LOW-FREQUENCY SIGNALS

ABSTRACT

Is studied the ability of the auditory system of dolphin to receive and to classify the noise-like signals, which imitate natural noise of sea. The results of studies, carried out in the sea bunch during the free movement of animals, showed that the dolphins were capable of defining noise-like signals and of carrying them to a defined class, using invariant signs, such as the rhythmical sequence of pulses, independent of the frequency-time scale of the idea of signal.

Keywords: dolphin; detection; classification; noise signal; interference; experiment; model.

Введение

В настоящее время противостояние между Россией и Западом все нарастает. В первую очередь это связано с исторической мотивацией западной цивилизации ослаблять Россию, чтобы в дальнейшем «откусить» как можно больше территорий. Поэтому сейчас, когда Россия, после распада СССР, встала с колен, появились первые признаки оживления экономики, возросла военная мощь

государства, решаются социальные проблемы, возникли общественные институты, которые ведут независимую от США и ЕС политику, не приемлют либеральные ценности и толерантность, противопоставляя этому патриотизм, национальное самосознание, духовные и нравственные ориентиры российского цивилизационного пути, Запад начал информационную войну. Причем политика «промыывания мозгов» носит многогранный характер:

откровенная ложь, искажение фактов, русофобия, стремление пересмотреть итоги Второй мировой войны и многие другие исторические события, блокирование российских информационных каналов и т.д. Задачей информационной войны является не только создание образа врага, но и получение корпорациями США и НАТО дополнительных ассигнований на развитие военно-промышленного комплекса.

Одним из важнейших направлений в настоящее время является создание биотехнических систем (БТС), основой, которой являются морские животные: дельфины и морские львы.

Биотехнические системы представляют собой совокупность биологических и технических элементов, объединенных в единую функциональную систему. Использование БТС считается перспективным при решении различных прикладных задач в условиях, когда эти задачи не могут быть возложены на людей и/или обычные технические системы.

Основным биологическим компонентом современных морских БТС являются крупные морские животные (млекопитающие) – китообразные (киты, косатки, дельфины) и ластоногие (морские львы, котика, тюлени, нерпы). К настоящему времени в иностранных государствах наибольших успехов в создании таких систем добились учёные из США. В ВМС этой страны целенаправленные работы в области использования морских животных для решения различных прикладных задач непрерывно ведутся с 1959 года.

В ходе предварительных исследований было установлено, что морские животные обладают уникальными адаптивными возможностями. Высокая физическая выносливость, совершенные биологические системы движения, гидродинамики, механизмы кислородного обмена, декомпрессии, позволяют и китообразным, и ластоногим длительное время двигаться с высокой скоростью под водой, преодолевая значительные расстояния, легко перенося перепады гидростатического давления и понижение температуры тела с изменением глубины погружения.

Огромный интерес исследователей привлекла исключительно эффективная система биологической эхолокации дельфинов. По мнению специалистов, она представляет собой лучший пример эволюционной адаптации к прибрежным мелководным условиям, отличающимся значительными уровнями помех, реверберации и шумов, харак-

терных для заливов, устьев рек и прибрежных фарватеров. За годы проведенных наблюдений и исследований дельфины продемонстрировали необычайную способность оценивать не только местоположение подводных объектов, но и такие их характеристики, как размеры, форма, материал, из которого они изготовлены, пустотелость или цельность и даже толщина стенок.

Практически все биологические системы и механизмы морских животных до настоящего времени превосходят по своим возможностям характеристики большинства существующих технических средств аналогичного назначения. Специалисты ВМС США целенаправленно занимались их изучением с целью использования полученных разработок в перспективных образцах вооружения и военной техники (В и ВТ). Однако вскоре выяснилось, что гораздо больший интерес для ВМС США будет представлять непосредственное использование дрессированных морских животных. Поэтому в последующие годы основные усилия были направлены на [1-6]:

- выбор видов животных, наиболее предпочтительных для ВМС;
- определение круга задач, которые морские животные будут способны решать;
- разработку методик дрессировки, которые дадут наилучшие результаты;
- определение возможности длительного обитания выбранных видов в пресной воде.

По официальной информации в составе Военно-морских сил США существуют пять подразделений морских млекопитающих, насчитывающих не менее 75 подготовленных дельфинов и 25 морских львов:

- Подразделение Mk.4 Mod.0 для поиска и уничтожения морских якорных мин. Данное подразделение входит в состав сил немедленного реагирования, имея в своем составе только полностью подготовленных дельфинов.
- Подразделение Mk.5 Mod.1 (SLSWIDS, Sea Lion Shallow Water Intruder Detection System) – система обнаружения подводных диверсантов в мелководных районах с использованием морских львов. Подразделение сформировано в 1976 году. Состоит из двух команд по четыре морских льва в каждой. Кроме основных задач морские львы тренируются на поиск и обезвреживание взрывоопасных объектов.

- Подразделение Mk.6 Mod.1 (ASDS, Anti – Swimmer Dolphin System) – система обнаружения боевых пловцов с использованием дельфинов. Предназначена преимущественно для обеспечения противоподводно-диверсионного обеспечения акваторий пунктов базирования сил флота и отдельных особо важных объектов. В составе подразделения шесть дельфинов.
- Подразделение Mk.7 Mod.1 (DSWMCDS, Deep / Shallow Water Mine Countermeasures Dolphin System) – противоминная система с использованием дельфинов для глубоководных и мелководных районов. Предназначено для поиска и уничтожения морских донных мин и других взрывоопасных объектов. В составе подразделения восемь дельфинов.
- Подразделение Mk.8 (MCDS Mine Countermeasures Dolphin System) – противоминная система с использованием дельфинов. Предназначено для поиска и уничтожения морских мин и других взрывоопасных объектов. В составе подразделения несколько дельфинов.

Боевых дельфинов использовали ВМС США в 2003 году во время войны в Персидском заливе и войны в Ираке для поиска морских мин. В первый месяц после высадки американских войск в Ираке шесть дельфинов изучили 237 объектов и обнаружили 100 мин.

В настоящее время в ВМС США действует не менее пяти центров подготовки морских животных, в которых находятся более 115 различных их видов.

1. На мысе Пойнт-Лома (Сан-Диего, шт. Калифорния).
2. В зоне Панамского канала.
3. В бухте Канеоха-Бэй (шт. Гавайи).
4. На озере Панд-Орей (шт. Айдахо).
5. На мысе Принца Уэльского (шт. Аляска).
6. В районе озера Пончартрейн (шт. Луизиана).

Кроме того, известно, что в районе Ки-Уэст (шт. Флорида) подготовкой дельфинов занимаются специалисты ЦРУ.

Представители ВМС США отрицают, что когда-либо обучали своих морских млекопитающих причинять вред людям, а также доставлять оружие для уничтожения вражеских кораблей^[5], однако некоторые источники утверждают, что боевые дельфины использовались для борьбы с подво-

дными диверсантами. В частности, во время войны во Вьетнаме. Тогда в ходе сверхсекретной операции «Шорт Тайм» (1971–1972) противодиверсионных оборону военно-морской базы Камрань во Вьетнаме в течение 15 месяцев осуществляла группа из шести боевых дельфинов. Утверждается, что боевые дельфины уничтожили при обороне базы Камрань не менее 50 подводных разведчиков и диверсантов противника.

В проекте изучения морских млекопитающих при ВМС США в настоящее время задействованы афалины (большие дельфины) и калифорнийские морские львы. Они выполняют три основные задачи: охраняют суда и порты от нападения вражеских водолазов, достают потерянные предметы и ищут подводные мины. За время существования программы морские млекопитающие участвовали в военных операциях в 25 странах мира. В прошлом для военных целей использовали и других морских млекопитающих, включая дельфинов и белуг.

Дельфины и морские львы наделены достоинствами, которые просто не могли остаться без внимания военных. Они плавают гораздо быстрее, чем водолазы, их гораздо проще доставить на место операции, чем удаленных подводных аппаратов с дистанционным управлением (и стоит это гораздо дешевле). Они могут погружаться на глубину нескольких сотен метров и подниматься на поверхность, и при этом у них не возникает проблем с декомпрессией (человек никогда не сможет так же быстро адаптироваться к перепадам давления). Дельфины так хорошо видят и слышат под водой, что могут на слух обнаружить 3-дюймовый шар на глубине 200 метров в полной темноте, и даже различать разные виды металла. Вода – их родная стихия. Как известно, мозг дельфина больше мозга человека, отчасти потому, что в нем есть часть, ответственная за обработку гидроакустических сигналов.

В настоящее время, Военно-морские силы США создали систему безопасности морской базы Kitsap в вашингтонском Бангоре. Периметр базы патрулируют калифорнийские морские львы и дельфины-афалины в сопровождении аквалангистов. Новая система безопасности заработала в 2010 году [7].

К сожалению, в связи с переходом подразделений, занимающихся подготовкой и изучением дельфинов под юрисдикцию Украины, работы в этом направлении были свернуты и какой-либо внятной программы, в настоящее время не сформулировано. Хотя сама ситуация на данный момент

требует активного внимания к этому направлению в ВМФ России. В частности, в Одессе открыт центр изучения дельфинов под патронажем США (вполне мирная вывеска лечение больных детей). Строительство Керченского моста также требует больших сил и средств по его охране во всех средах, и в водной, в том числе. И здесь дельфины могут оказаться незаменимыми помощниками.

За годы работы с морскими животными в СССР и России (до 1991 г.) был наработан огромный экспериментальный материал, проведены теоретические исследования, методики, которые затем «успешно» были переданы Украиной США. Большая часть материала имеется и в соответствующих институтах и ведомствах России. Но без наличия дельфинов невозможно проверить многочисленные гипотезы, выдвигаемые, к примеру, для объяснения их феноменальных способностей по обнаружению и классификации морских объектов и предметов. Раскрытие механизмов обработки гидроакустической информации дельфинами, позволит продвинуться в развитии гидроакустических средств. В противном случае, Россия может многое потерять в решении проблемы создания сверх эффективных средств подводного обнаружения, а наши подводные лодки могут потерять, то преимущество, которые получили за счет снижения шумности.

В настоящей статье, рассматриваются некоторые аспекты исследования эхолокатора дельфина, приводятся результаты экспериментов и условия их проведения. В частности, проведено изучение способности слуховой системы черноморской афалины воспринимать и классифицировать шумовые сигналы, имитирующие шумы моря.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования на дельфинах показали высокую эффективность его эхолокационной системы [7,8]. В ходе эволюции слуховая система дельфинов приспособилась к функционированию в условиях постоянного действия различных акустических помех, встречающихся в морской среде, таких как шумы биогенного, абиогенного и антропогенного происхождения. Эти шумы могут иметь широкое разнообразие спектральной картины по макроструктуре (огибающей спектра) и микроструктуре (внутреннему наполнению в виде дискретных составляющих). В зависимости от характера источника шумоизлучения, его возможной скорости перемещения, направления и других факторов спектр шума может растягиваться

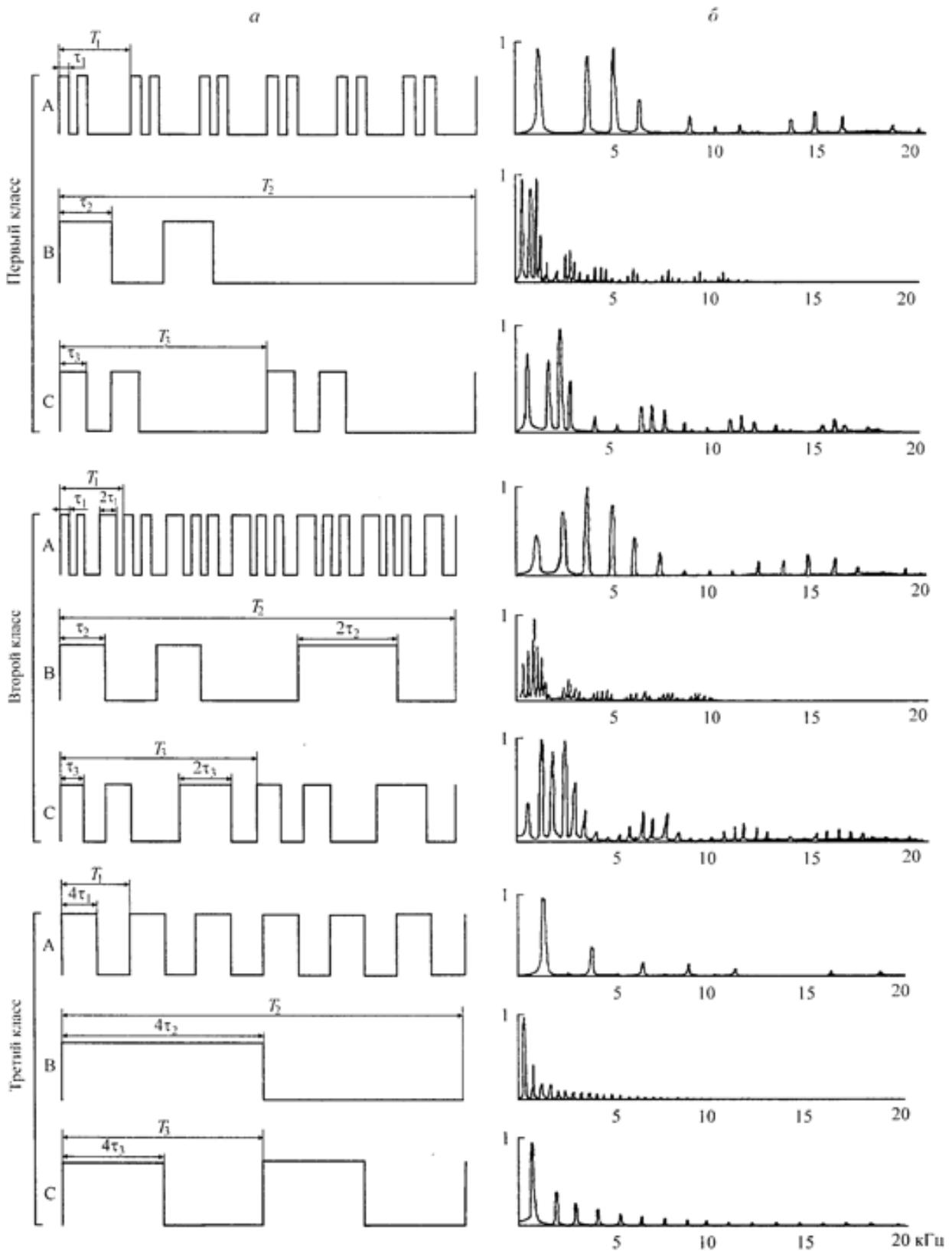
или сжиматься, то есть менять частотно-временной масштаб, сохраняя при этом определенные неизменные (инвариантные) признаки. Исследования способности дельфинов к различению шумовых сигналов вызвана с одной стороны необходимостью поиска механизмов в работе слуховой системы, на основании которых она способна производить классификацию сложных сигналов, с другой стороны – определением предела возможностей слуховой системы при восприятии и обработке акустической информации.

В экспериментальных исследованиях на афалинах изучена проблема выделения полезного сигнала из шумовой помехи и влияние шума на эхолокационную активность при решении животным задач локационного различения [9,10]. Шумовые сигналы использовались как элементы методических приемов для оценки функциональных возможностей слуха [11,12]. Однако исследований чувствительности слуховой системы дельфинов к восприятию собственно шумовых сигналов, меняющих свои параметры за короткий промежуток времени, а также способности к классификации шумов мало. В работе [13] установлено, что дельфин способен различать шумы с различной спектрально-временной структурой.

В основу имитации шумов был положен метод образования широкополосных сигналов, представляющих собой совокупность импульсов разной полярности, так называемых псевдослучайных последовательностей. Отличие их от случайных заключается в том, что:

- 1) изменение выходного напряжения происходит с частотой, кратной частоте тактовых импульсов;
- 2) последовательность имеет период.

Для синтеза сложных шумоподобных сигналов был разработан и сконструирован прибор, позволяющий моделировать разнообразные псевдослучайные непрерывные процессы. Управляемый генератор вырабатывает последовательность прямоугольных импульсов с заполнением несущей частотой 125 кГц, которые поступают на дешифратор, преобразующий ее в параллельный восьмиразрядный код. При помощи набора поля K1-K7 выбирается код, формирующий последовательность видеоимпульсов прямоугольной формы. После усилителя сигнал поступает на гидрофон. В результате акустический процесс на выходе преобразователя получает шумоподобный характер. В генераторе предусмотрена возможность образования сигналов с измененным частот-



*a – временная структура сигналов, T – период следования импульсов,
 t – минимальная длительность одного импульса в каждом режиме работы*

Рисунок 1 – Временная и спектральная структура сигналов, предъявляемых дельфину.

но-временным масштабом без искажения формы энергетического спектра (режимы А, В, С). Кодирование временной последовательности импульсов задавало отличительный признак класса сигналов (их инвариантность). Среди множества вариантов классов сигналов для эксперимента были выбраны три, отличающиеся определенным временным кодом последовательности импульсов. Изменение частоты следования импульсов определяло различный частотно-временной масштаб формирования сигналов. В первом классе (рис. 1) сигнал представлял в одном периоде T : последовательность прямоугольного импульса длительностью τ ($\tau = 1/8T$ - длительность минимального импульса и минимальной паузы), паузу длительностью τ , прямоугольный импульс длительностью τ , паузу длительностью 5τ , затем идет повторение. Во втором и третьем классах (рис. 1) последовательность импульсов была другой.

В каждом классе импульсы разделены по длительности на три режима:

А - $\tau_1 = 92$ мкс; В - $\tau_1 = 560$ мкс; С - $\tau_1 = 260$ мкс. Таким образом, достигается возможность «растяжения» или «сжатия» сигнала по времени при сохранении его ритмического рисунка. Другими словами, обеспечивается его инвариантность относительно мультипликативных преобразований.

Эксперименты проводили на черноморских афалинах в свайно-сетевом вольере размером $10 \times 5 \times 3$ м открытой бухты моря по методике двигательного-пищевых условных рефлексов при свободном перемещении животных. Первоначально ставилась задача исследования принципиальной возможности различения дельфином шумоподобных сигналов, отличающихся различной временной последовательностью импульсов. Сигналы подавали на гидрофон (пьезокерамическую сферу диаметром 20 мм), характеристики которого представлены на рис. 2. Животным предлагалось отли-

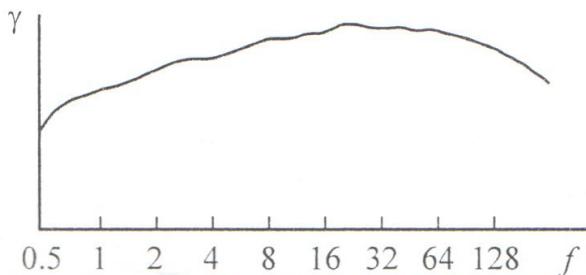


Рисунок 2 – Частотные характеристики акустического преобразователя, использованного в режиме излучения/

γ – коэффициент преобразования.

чить сигнал режима А с длительностью импульса ($\tau_1 = 92$ мкс) положительного класса (1 класс) от одинаковых по длительности ($\tau = 92$ мкс), но разных по временной последовательности импульсов сигналов режима А отрицательных классов (2 и 3 класс).

Для выработки прочного условного рефлекса на положительный сигнал с вероятностью 0,9 правильного ответа потребовалось 150 его сочетаний с отрицательными сигналами. Таким образом, была выявлена способность дельфина различать шумоподобные сигналы, отличающиеся временной последовательностью импульсов. Однако, в естественной среде обитания дельфин редко сталкивается с подобной простой задачей распознавания, поскольку потенциальные возможности слуховой системы этих животных предполагают необходимость различения большого многообразия оттенков звуковых образов реального моря. Поэтому на следующем этапе выявлялась способность дельфина формировать понятие классов сигналов: от животного требовалось распознать множество (девять) сигналов, разделенных на три класса и различающихся по частотно-временному масштабу, но объединенных в каждом классе одним неизменным признаком – определенной последовательностью импульсов. С этой целью на фоне высокой вероятности различения трех сигналов режима А трех классов (при $\tau_1 = 92$ мкс) в контрольных опытах предъявляли последовательно весь набор сигналов на один гидрофон, при этом шесть сигналов (режим В и С из 1, 2, 3 классов) дельфин слышал впервые. Таким образом, выявлялась способность к классификации.

Результаты и обсуждение

Как показали результаты опытов, дельфин способен определять шумоподобные сигналы и относить их к определенному классу, используя его инвариантные признаки, т.е. временную последовательность импульсов независимо от изменения частотно-временного масштаба сигнала, т.е. его «растяжения-сжатия» с вероятностью 0,9 при последовательном предъявлении. Приведенные исследования по распознаванию шумоподобных сигналов показали, что дельфин способен воспринимать и классифицировать шумы, если в структуре сигналов сохраняются инвариантные признаки, а именно, ритмическая последовательность импульсов, которая не зависит от мультипликативных преобразований частотно-временного

масштаба (его «растяжения-сжатия»).

Акустические сигналы играют исключительно важную роль в жизнедеятельности морских эхолоцирующих животных. Задача органа слуха как биологического анализатора состоит в установлении направления и свойств источника звука. У всех морских млекопитающих орган слуха решает указанную задачу как в пассивном режиме, восприятие сигналов окружающей среды, так и в активном режиме, когда объекты облучаются зондирующими сигналами животного и становятся источниками эхосигнала. Принципы и механизмы работы слуха дельфинов в активном режиме при восприятии высокочастотных сигналов изучены довольно полно в большом количестве экспериментальных работ [9,10,14]. Условия работы органа слуха в активном режиме легче, т.к. начиная с момента локационного зондирования известно направление прихода эха, расстояние до источника отражения звука, интенсивность эха и время его появления. Диапазон частот эха, как правило, совпадает с диапазоном частот зондирующего сигнала. Основная неопределенность в оценке свойств эха при работе в активном режиме заключается в его тонкой спектрально-временной структуре. При работе в пассивном режиме перед слуховой системой животного стоит более сложная задача, поскольку неизвестны направление прихода звука, расстояние до источника, интенсивность звука, момент его прихода и спектрально-временные характеристики. Для эффективного восприятия в этом случае орган слуха должен быть постоянно готовым к приему сигналов во всем диапазоне изменений этих параметров. Необходимость восприятия сигнала, пришедшего с заранее неизвестного направления, требует, чтобы пассивный слух был ненаправленным, что подтверждается в работах по исследованию направленности восприятия в области низких частот [10]. Характеристики направленности определяются отношением длины волны звука к интерауральной базе. Данное требование выполняется для диапазона частот, верхняя граница которого $f_{\max} = c / \lambda$ (c – скорость звука в воде, λ – минимальная длина волны) определяется из условия $\lambda < d$. Поскольку интерауральная база для взрослой афалины приблизительно равна 15-20 см, а $f_{\max} < 7.5 \div 10$ кГц, то оказывается, что пассивный слух афалины может быть низкочастотным, обеспечивая дельфину получение необходимой информации по дальности обнаружения и распознавания звуковых сигналов, т.к. на низких частотах

затухание звука в воде, невелико. Кроме того, наиболее важными биогенными источниками звука для афалины являются низкочастотные звуки рыб, что и предопределяет важность низкочастотности пассивного слуха, так мало изученной до настоящего времени. В настоящей работе показано, что слуховая система дельфина способна эффективно воспринимать сложные шумоподобные сигналы, частотные характеристики которых расположены в низкочастотной области.

Существует принципиальное сходство в работе междусонарами животных и радио-гидролокационными техническими системами, созданными человеком. Но каждая из них предназначена для определенных целей и соответствующих задач. В технических гидроакустических системах для определения направления на источник акустических шумов, находящихся в море, их прослушивания и классификации, т.е. задаче, решаемой в настоящей работе афалиной, используются шумопеленгаторы [15]. Их работа возможна только в том случае, если приемная акустическая станция обладает свойствами направленного действия, используя метод формирования и сканирования многолучевой характеристики направленности, предполагающей жесткое ограничение входных сигналов, подаваемых на сдвиговые регистры в целях получения задержек, необходимых для формирования характеристики направленности. Изменение угла осуществляется путем изменения величины задержки во времени. Такие системы обладают недостатком, заключающемся в том, что острота максимума зависит от направления. От этого недостатка свободны системы, в которых все приемники расположены по окружности, но в них акустические приемники частично экранируют друг друга. При этом акустический сигнал принимается главным образом приемниками, расположенными в секторе ± 90 относительно направления на источник звука, т.е. только половиной акустической системы, при этом необходимо максимальное время задержки. В целях уменьшения времени задержки необходимо сужать сектор пеленгования. Эти станции дают сравнительно низкую точность пеленгования и при этом наблюдение возможно только за одним объектом. Шумопеленгаторы кругового обзора, дающие возможность одновременного наблюдения за несколькими объектами, имеют низкий коэффициент концентрации. Приемная акустическая система принимает лишь часть сигнала и предъявляет определенные требования

к его длительности. Потерю энергии сигнала необходимо компенсировать увеличением мощности станции. Роль и конструкция гидроакустических станций определяются техническим заданием заказчика, т.е. МО РФ. Обязательным требованием к современным гидроакустическим станциям стало обнаружение и классификация шумовых сигналов подводных целей на больших расстояниях [10]. Требование к увеличению дальности действия обусловили переход к все более низким частотам, чтобы уменьшить потери из-за пространственного затухания звука. Переход к использованию низких частот привел к увеличению габаритов антенн в целях обеспечения заданной точности определения направления на цель. С точки зрения решения классической теории обнаружения сигнала одиночной цели на фоне шумов с известным законом распределения, технические характеристики современных акустических станций можно считать удовлетворительными. Но достижение заданных параметров ограничивается возможностями апертур по пространству, времени, частоте и характеристикам среды. Однако, как только чувствительность обнаружения слабых сигналов повышается, система, описывающая поле шумов, становится неудовлетворительной. Океан заполнен источниками шумов, аналогичных по характеристикам шумам цели. Эти источники могут иметь биологическое или искусственное происхождение. Чем выше чувствительность приемных трактов шумопеленгаторов, тем больше число источников влияющих на обнаружение. Многочисленные источники шумов различного происхождения снижают надежность функционирования любого сонара и, как правило, являются по отношению к нему помехой. По существу, в естественных условиях обитания и дельфин решает задачу, соответствующую основной проблеме передачи информации – обеспечению помехоустойчивости канала связи, то есть противостояния вредному влиянию помех. Наблюдения за дельфинами в естественных условиях обитания и экспериментальные исследования свидетельствуют о высокой эффективности работы слуховой системы этих животных при обнаружении и распознавании целей. В ряде работ, специально изучавших влияние искусственно создаваемых шумов на характеристики работы сонара дельфина, было показано, что животное не теряет способности обнаруживать и различать объекты, даже, если уровень шумов достигает 1200 Па [10]. Способность дельфина обнаруживать шум дви-

жущейся рыбы наблюдается при таких уровнях помехи, при которых не представляется возможным выделить из шума полезный сигнал техническими средствами. Эти данные свидетельствуют о наличии у дельфинов механизмов, способных снижать маскирующее действие окружающего шума. У дельфина один компактный приемник, который принимает широкополосные сигналы в пассивном режиме. В технических системах для достижения большей помехозащищенности прием осуществляется за счет набора узкополосных датчиков разных спектров, которые перекрывают весь диапазон частот. Однако, на пути сужения полосы частот встречаются трудности, связанные в эффектом Доплера и приемом коротких сигналов [16]. Главной проблемой становится выделение и классификация сигналов, поступающих от многих целей. Объем данных, создаваемых в этих условиях современными гидроакустическими станциями с многолучевыми характеристиками направленности, оказывается очень большим. Ключевой технической задачей становится разработка методов, с помощью которых эта информация должна обрабатываться для исключения помех и представления оператору-гидроакустику лишь существенной ее части. Попытка разрешить эти проблемы, извлекая полезную информацию из больших объемов данных, привела лишь к появлению многочисленных вариантов автоматического обнаружения и классификации целей, адаптации системы к локальным окружающим условиям за счет управления ее техническими параметрами.

Гипотезы и модели

Анализ возможностей дельфина по распознаванию широкополосных сигналов, в целом показал, его высокую эффективность системы обработки гидроакустической информации, которая по большинству показателей значительно эффективней технических систем. Большая дальность действия в гидроакустических системах может быть достигнута только увеличением энергетического потенциала. Но известно, что синие киты, к примеру, могут «переговариваться» между собой на расстояниях до нескольких сотен километров, имея при этом локатор значительно меньших размеров, чем современные гидроакустические средства. Значит, не размеры, а принципы обработки лежат в основе преимущества биологического локатора перед техническим. По-видимому, следует несколько пересмотреть классические схемы обработки, осно-

ванные на концепции корреляционного сравнении, согласованного фильтра, квадратурного и энергетического приемников и т.д. Система обработки информации в сонаре дельфина представляется в виде не только комбинации подходов, реализуемых в технических средствах, но и какие-то до сих пор нам неизвестные методы, включающих в себя:

- адаптивные и робастные процедуры, учитывающие фундаментальные законы сохранения (откуда вытекают теоретико-групповые подходы к обработке сигналов);
- принцип наименьшего действия, в соответствии с которым, природа всегда стремится достичь максимального результата затратив при этом минимум работы.

Необходимо отметить, что имеются работы [17-19], где предлагается нетрадиционный подход, заключающийся, в частности, в том, что в одном канале обработки проводилось корреляционное сравнение энергетических спектров, а в другом корреляционное сравнение фазовых спектров. Отклики на выходе каналов суммировались с весом. Эффективность приемника почти не уступала оптимальному фильтру, но значительно его превосходила по области применимости.

Известно, что корреляционные методы приема слабо критичны к флуктуациям амплитуды, но очень чувствительны к фазовым искажениям. Рассмотрим, как влияют флуктуации фазового спектра широкополосного сигнала на помехоустойчивость корреляционного приемника. Положим;

$$|S_1(\omega)| = |S_2(\omega)|, \quad \varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega) = \varepsilon(\omega) - \text{искажения фазового спектра.}$$

Подставим их значения в выражение для коррелятора в спектральном представлении [17]:

$$R(\tau, \varepsilon) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S_1(\omega)|^2 e^{i\omega\tau} e^{i\varepsilon(\omega)} d\omega. \quad (1)$$

Для гауссовской случайной величины ε верно равенство: $\langle e^{i\varepsilon(\omega)} \rangle = e^{-\langle 0.5\varepsilon^2 \rangle}$, тогда имеет место соотношение:

$$\langle R(\tau, \varepsilon) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S_1(\omega)|^2 e^{i\omega\tau} e^{-\langle 0.5\varepsilon^2 \rangle} d\omega = R_1(\tau) \quad (2)$$

где: $\langle \varepsilon^2(\omega) \rangle$ – дисперсия случайного процесса развернутого вдоль оси частот ω . Положим: $\langle \varepsilon^2(\omega) \rangle = \varepsilon^2 = \text{const}$, тогда:

$$R_1(\tau) = e^{-0.5\varepsilon^2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S_1(\omega)|^2 e^{i\omega\tau} d\omega = R(\tau) e^{-0.5\varepsilon^2}. \quad (3)$$

$R(\tau)$ – корреляционная функция сигнала в отсутствии искажений.

Сигнальная составляющая на выходе коррелятора оценивается выражением:

$$q_s(\tau) = \frac{2}{N} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2}} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S_1(\omega)|^2 e^{i\omega\tau} d\omega \right]. \quad (4)$$

При $\tau = 0$: имеем

$$q_s(0) = \left(\frac{2E_s}{N} \right) e^{-0.5\varepsilon^2} = Q_m e^{-0.5\varepsilon^2}, \quad (5)$$

где: Q_m – потенциальная помехоустойчивость по мощности;

E_s – энергия сигнала; N – спектральная плотность помехи.

Обозначим:

$$q_{nn} = \sqrt{\frac{q_s(0)}{Q_m}} = e^{-0.5\varepsilon^2} = e^{-0.25\varepsilon_\Phi^2}. \quad (6)$$

q_{nn} – нормированное отношение С/П по напряжению.

Анализ величины q_{nn} позволяет сделать вывод, что при уровне 0.8 окна когерентной обработки составляет примерно $\pm 50^\circ$. Таким образом, корреляционный метод обнаружения сигнала чувствителен к искажениям фазового спектра принимаемого сигнала. Это обусловлено тем, что оптимальный прием известного сигнала основан на компенсации фазового спектра поточечно. Что является следствием реализации критерия:

$$\min_{\omega \in \Omega} \{ |\varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega)| \} = \varepsilon_{\min}, \quad (7)$$

Этот критерий очень чувствителен к локальным отклонениям. Более устойчивым является среднеквадратический критерий (СКО-критерий):

$$\varepsilon_k = \int_{\Omega} [\varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega)]^2 d\omega, \quad (8)$$

который сводится к максимизации интеграла [17]:

$$R_\Phi = \int_{\Omega} \varphi_1(\omega) \varphi_2(\omega) d\omega. \quad (9)$$

Так как СКО-критерий слабо зависит от локальных отклонений, то априори ясно, что «окно когерентной обработки» должно быть шире, чем при классическом корреляционном способе. Рассмотрим сигнальную функцию на выходе, представляющую собой сумму:

$$R_+ = \lambda \int G_1(\omega) G_2(\omega) d\omega + \sqrt{1 - \lambda^2} \int \varphi_1(\omega) \varphi_2(\omega) d\omega, \quad (10)$$

$$\text{или} \quad R_+ = \lambda R_G + \sqrt{1 - \lambda^2} R_\Phi \quad (11)$$

где: G – центрированный энергетический спектр;
 λ – весовой коэффициент.

R_G – корреляционная функция энергетических спектров;

λ – весовой коэффициент.

Максимум $R_{+max} = 1$ определяется величиной λ . Для ее определения, от обеих частей (9) возьмем производную по λ и приравняем результат к нулю. Путем элементарных расчетов получаем:

$$\lambda = \frac{R_G}{\sqrt{R_G^2 + R_\Phi^2}}. \quad (12)$$

Предлагаемый способ реализует операцию аддитивного сложения выходных откликов корреляционных каналов по энергетическому и фазовому спектру. Особенностью данного подхода является, то, что корреляционные сравнения проводятся в спектральной, а не во временной области. Анализ выражения (10) показывает, что на уровне 0.8 окно когерентной обработки составляет примерно $\pm 126^\circ$, что в 2.5 раза больше, чем при традиционном методе корреляционной обработки. Для проверки гипотезы использует дельфин нечто подобное, а также других предположений, которые не освещены в рамках статьи, в виду ограниченности объема, необходимо проводить эксперименты с дельфинами. Тогда та или иная гипотеза может подтвердиться и стать рабочей моделью. В любом случае, только эксперименты с животными могут дать новый материал для теоретических исследований в области обработки гидроакустических сигналов. Иначе, может возникнуть наше отставание в гидроакустических средствах, которое может приобрести необратимый характер. Современные атомные подводные лодки, в том числе и стратегические, без гидроакустики слепы и глухи и могут стать легкой добычей потенциального противника.

Заключение

Полученные в настоящей работе экспериментальные данные, показали, что слуховая система дельфина как приемная часть гидроакустической локационной системы успешно справляется с вышеуказанной задачей. Будучи достаточно миниатюрной по сравнению с техническими антеннами, она способна не только обнаруживать низкочастотные сигналы в полосе до 10 кГц, но и формировать представление об акустическом классе сигналов по определенному признаку, используя их инвариантность в виде определенной ритмической последовательности импульсов. При

этом эффективность распознавания оказывается высокой и надежной, поскольку сохраняется при достаточно быстром изменении частотно-временного представления сигнала в виде его «растяжений-сжатий». Уверенное распознавание дельфином синтезированных шумовых сигналов, имитирующих шумы мелкого моря, на фоне естественных шумов бухты моря, согласованных по уровням, свидетельствует о высокой помехоустойчивости работы слуховой системы дельфина.

Компактный широкополосный приемник живого сонара способен работать как в активном, так и в пассивном режимах, осуществлять быструю их смену за короткие промежутки времени, исчисляемые секундами, и перекрывая большой диапазон частот.

На основании вышеизложенного можно говорить о большой эффективности работы сонара дельфина по сравнению с техническими гидроакустическими системами. Уступая последним по дальности действия, он превышает их по разрешенной способности, быстродействию и габаритам. Мозг животного со всеми его регуляторными, активирующими аппаратами обеспечивает особые возможности высокоадаптивной работы живого сонара. Подобными возможностями пока не обладает ни одна из современных гидроакустических систем, созданных человеком.

Список литературы

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. Морская биологическая программа ВМС США.
2. Боевые дельфины ВМС США (Martial U.S. Navi Dolphins). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=rWfs9ss9gCk>.
3. A Brief History of the Navy's Marine Mammal Program from the foreword to the Annotated Bibliography of Publications from the NMMP (англ.).
4. Дельфины на службе ВМС: секретные агенты морских глубин. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chuchotezvous.ru/investigations/896.html/>
5. Использование дрессированных морских животных в ВМС США. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://refdb.ru/look/1931254-pall.html>.
6. На караульную службу в ВМС США наберут дельфинов и морских львов (20.11.2009). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amic.ru/news/114795/>.

7. *Зайцева К. А., Королев В. И., Ротин В. В.* Адаптивные изменения пространственных характеристик слуха дельфина *Tursiops truncatus* // *Ж. эвол. биохим. и физиол.* – 2002. – Т. 38. – С. 370-375.
8. *Зайцева К. А., Королев В. И.* О роли временной микроструктуры эхосигнала в механизмах классификации дельфинами *Tursiops truncatus* малоразмерных мишеней // *Ж. эвол. биохим. и физиол.* – 2005. – Т.41. – С. 364-370.
9. *Белькович В. М., Дубровский Н. А.* Сенсорные основы ориентации китообразных. – М., 1976.
10. *Айрапетьянц Э.Ш., Константинов А.И.* Эхолокация в природе. – Л., 1974.
11. *Супин А. Я., Плетенко М. Г., Тараканов М. Б.* Частотная разрешающая способность слуха дельфина // *Докл. Акад. наук.* – 1992. – Т. 323. – С. 794-797.
12. *Сухорученко М. Н.* Верхний предел слуха дельфинов по частоте // *Тр. Акустич. института.* – 1971. – вып. 17. – С. 54-59.
13. *Au W.W.L., Pawlovski J.L.* Detection of Noise with rippled spectra by atlantic bottlenose dolphin // *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1989. 86. P. 591-596.
14. Черноморская афалина *Tursiops truncatus ponticus* / Под ред. В.Е.Соколова, Е.В.Романенко. – М., 1997.
15. *Тюрин А. М., Станкевич А. П., Таранов Э. С.* Основы гидроакустики. –Л., 1966.
16. *Бурдик В. С.* Анализ гидроакустических систем. – Л., 1988.
17. *Сапрыкин В. А., Бутырский Е. Ю., Малый В. В., Сотничук С. В.* Способ обнаружения сигналов. Патент на изобретение RUS 2249833 16.01.1992
18. *Сапрыкин В. А., Бутырский Е. Ю., Беленков В. Н., Алексеев М. В.* Способ обнаружения сигналов. Патент на изобретение RUS 2032917, 1993.
19. *Бутырский Е. Ю.* Методы обработки широкополосного сигнала при флуктуациях его фазового спектра // *Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире.* – 2015. – № 9-1. – С. 16-26.