

УДК 534
ISBN 978-5-89118-863-1
DOI: 10.34756/GEOS.2023.17.38421

ОГЛАВЛЕНИЕ

GENERAL CONTENTS



ОРГАНИЗАТОРЫ

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

СПОНСОРЫ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Организаторы



Общественная организация
«Российское акустическое общество»



АО «Акустический институт
имени академика Н.Н. Андреева»

Спонсоры

Финансовую поддержку конференции оказали:



Генеральный спонсор:
Акционерное общество «Акустический
институт имени академика Н.Н.Андреева»



Спонсор:
Группа компаний «Акустик Групп»

©Российское акустическое общество

©АО «АКИН»

**СТРАТЕГИИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОИСКА ВПЕРЕДСМОТРЯЩЕГО ИМПУЛЬСНОГО
СОНАРА ДЕЛЬФИНА****Иванов М.П.^{1,2)}, Данилов Н.А.³⁾, Романов Б.В.⁴⁾, Красницкий Б.Ю.⁴⁾, Рогачева О.Н.¹⁾**¹⁾ Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9;²⁾ ФГУП Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Россия, Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, 29;³⁾ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67 л. А;⁴⁾ Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, филиал ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», Россия, г. Феодосия, п.г.т. Курортное ул. Науки, 24,Тел.: +7(911) 942 5478, E-mail: 20mivanov@mail.ru

В процессе активной работы импульсного сонара китообразных в зависимости от акустической обстановки, дельфин использует различные сигналы при поиске подводного объекта. В представленном докладе приводятся примеры изменения стратегии поиска с использованием дельфином излучения пакетов импульсов с разнообразной длительностью, изменением количества импульсов в пакете с различными законами время-импульсной модуляции и манипуляции. Доказательная база основана на результатах собственных экспериментов на представителях зубатых китообразных *Tursiops truncatus* и *Delphinapterus leucas*, а также по результатам опубликованных работ. По полученным данным просматривается использование стратегии моноимпульсного и мультиимпульсного режимов эхолокационного поиска. Мультиимпульсный режим основан на излучении пакетов, состоящих из ультракоротких широкополосных биполярных сосредоточенных во времени импульсов и использовании в этих пакетах время-импульсной модуляции. При смене стратегии поиска дельфин формирует составные пакеты импульсов, в которых используется не только время-импульсная модуляция, но и манипуляция сложной временной структуры временного интервала. В стратегии моноимпульсной эхолокации акустический контакт или слежение за объектом поиска видно по коэффициенту перекрытия, который равен ~ 1.2 при контакте с целью, а при потере контакта с целью коэффициент перекрытия как правило меньше ~ 1 или достигает ~ 2 и более. Аналогичные правила изменения стратегии поиска используются дельфином при мультиимпульсном режиме, но при сложной манипуляции коэффициент перекрытия может быть много меньше 1.

Ключевые слова: импульсный сонар, пакеты импульсов, время-импульсная модуляция, время-импульсная манипуляция

УДК: 57.084.1

ВВЕДЕНИЕ

В современных исследованиях в области гидроакустики в качестве идеальной гидроакустической системы рассматривается биологическая модель, поскольку в процессе эволюции китообразные приобрели наиболее совершенную эхолокационную систему. 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]. Устойчивость эхолокационной системы дельфинов к воздействию пассивных помех подтверждается наблюдениями за животными при охоте на мелководье. Устойчивость к воздействию активных помех подтверждается наблюдениями при коллективной охоте [2]. Биологические системы преодолевают пассивные и активные акустические помехи естественного и антропогенного происхождения, а также работают в самых сложных условиях сосредоточенных помех [3]. Предполагается, что такая помехозащищенность и универсальность реализуется с помощью различного рода адаптаций с оперативно изменяемыми частотно-временными и пространственными характеристиками поля излучения. Изучение закономерностей работы биологического сонара позволит найти технические решения совершенствования гидроакустической аппаратуры. Опыт последних десятилетий показал, что наиболее

рациональным методом изучения поведения и возможностей дельфинов является работа с ними в морских вольерах и открытых акваториях [4].

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ СОНАРА КИТООБРАЗНЫХ

Из теоретической гидроакустики известно, что для подводного наблюдения в изотропной среде наилучшими сигналами, будут узкополосные длинные импульсы. Изотропная среда – это идеализация акустической трассы, которая действительно может быть таковой на малых расстояниях между системой наблюдения и объектом поиска. К аппаратным средствам подводного наблюдения, прежде всего, относятся приемно-передающие антенны, которые при современном уровне технологий, как правило, узкополосные. Узкая полоса, благодаря резонансным свойствам элементов антенны, дает возможность получить максимальную чувствительность на приеме и максимальный КПД на излучающей антенне. Однако при работе в естественных условиях, когда помеховая обстановка нестационарная и зависит от многих гидрофизических факторов, использование узкополосных сигналов сужает возможности решения гидроакустических задач обнаружения, распознавания и связи. Повышение помехозащищенности и скрытности в проектируемых гидроакустических средствах может быть реализовано с помощью создания широкополосных излучающих и приемных антенн [5], а также систем обработки больших массивов многоканальных информационных потоков в реальном масштабе времени.

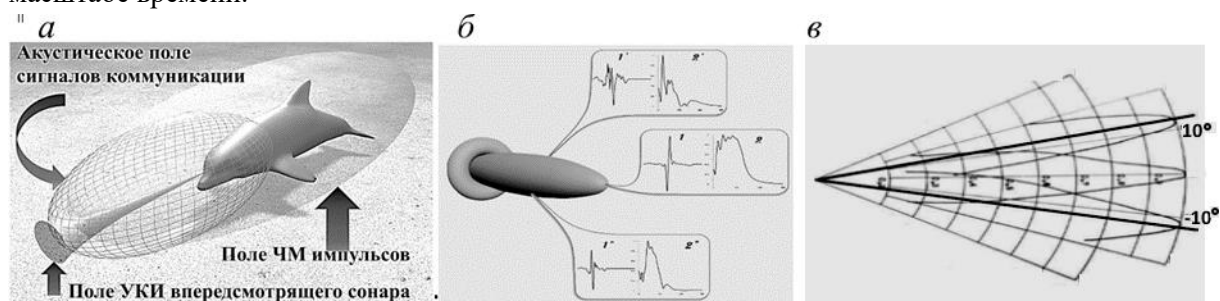


Рис.1. Условные изображения акустического поля: *a* – частотно-модулированных импульсов, ультракоротких импульсов, смешанных сигналов-сигналов коммуникации; *б* – нестационарное поле впередсмотрящего сонара; *в* – сканирование пространственной характеристик поля излучения в диапазоне $\pm 10^\circ$ с помощью смещения акустических пучков (генераторы) в области рефлектора в горизонтальной плоскости (натурные измерения)

Расширение полосы частот приемно-излучающего тракта в технических системах расширяет зону освещения за счет увеличения дальности действия ГАС и увеличения разрешающей способности по всем координатам, а при нарастающем потоке информационных данных улучшить звукоподводную связь. Альтернативы широкополосным сигналам для работы в сложных акустических условиях не существует [5], но и изучать такое нестационарное поле непростая задача. Сегодня рассматривается гипотеза работы 3-х одновременно работающих сонаров, но эта гипотеза имеет экспериментальное подтверждение, только на уровне излучения. На уровне моделей рассматриваются две гипотезы генерирующих устройств, с помощью которых формируется биполярный сосредоточенный по времени широкополосный импульс. Первая модель – это гибкая труба, разделенная сфинктером. При критическом давлении между половинками трубы сфинктер раскрывается и порция воздуха перемещается из трубки с повышенном давлением в трубку с пониженным давлением. В момент перехода пузырька воздуха через сфинктер, размер сфинктера увеличивается, что и создает акустический импульс [6].

Вторая модель основана на создании вакуумного объема для формирования дельта импульса. Дельта импульс не распространяется в пространстве. Но, при расширении фронта одна плоскость фронта падает на поверхность рефлектора, содержащего лобные пазухи. Фронт волны, отражаясь от лобных пазух рефлектора, переворачивается по фазе, что приводит к формированию биполярного сверхширокополосного импульса, который способен распространяться в пространстве [7]. Таким образом, помимо генератора или трех генераторов антенна формирует сигнал с помощью рефлектора, расположенного в дыхательной системе в районе лобных костей [8.] и акустической линзы – рефрактора. У сверхширокополосной антенны, в отличие от узкополосной, отсутствуют боковые лепестки, снижая тем самым вероятность ложных сигналов. Суммарная картина суперпозиции всех частот приводит к формированию по акустической оси длинного луча, вокруг которого формируется «бублик» различных частот (рис.1, б). Однако, такая картина происходит чисто теоретически, когда рефлектор симметричный.

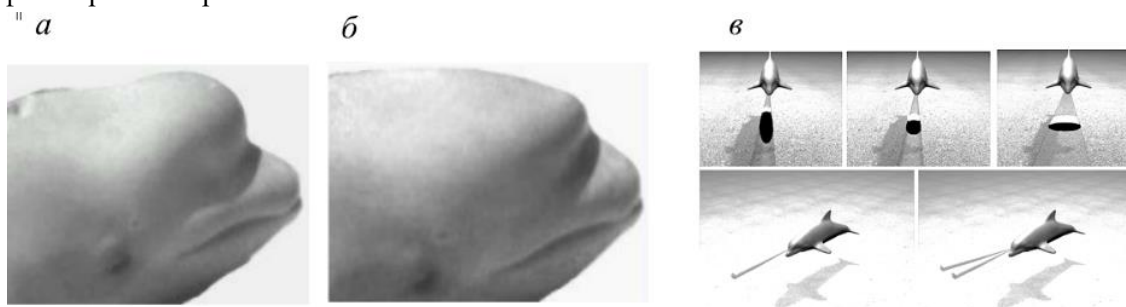


Рис. 2. Формирование поля излучения с помощью изменения геометрических размеров и конфигурации рефрактора (акустическая линза): *а* - переменный профиль акустического луча круглый и вытянутый в вертикальной плоскости; *б* - приплюснутый в горизонтальной плоскости; *в* – профиль основного луча и формирование двойного луча

Направленность акустического максимума зависит от положения излучающего элемента относительно геометрического центра рефлектора и рефрактора (рис. 1, в), 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. Реально рефлектор далек от симметрии, особенно на частотах ниже 50 кГц, но за счет смещения генератора или трех генераторов в горизонтальной плоскости дельфин способен сканировать пространство (рис.1, в) ультракороткими биполярными импульсами [9, 10]. С помощью акустической линзы дельфин меняет конфигурацию рефрактора (рис.2, *а, б*), но не фокусирует луч на предмете поиска, а меняет профиль луча, что очень заметно на высоких частотах (рис.2, *в*). Появление второго луча доказывает работу двух генераторов (рис. 2, *в*).

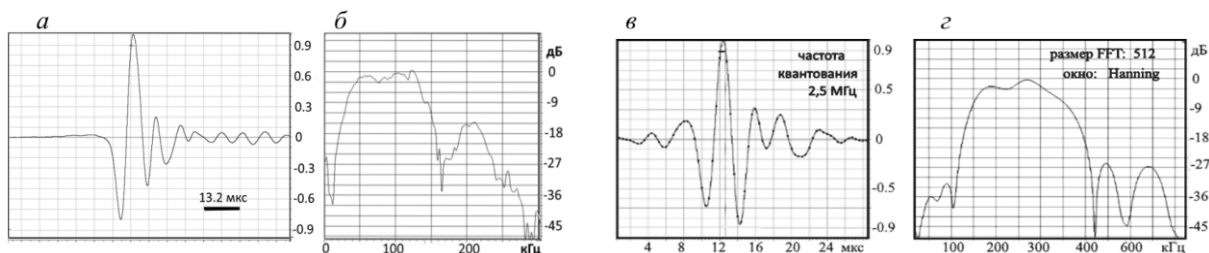


Рис. 3. Осциллограмма и спектральная плотность биполярных ультракоротких широкополосных импульсов дельфинов: *а* – временная структура импульса афалины; *б* – спектральная плотность импульса афалины; *в* – временная структура импульса белухи; *г* – спектральная плотность импульса белухи

В процессе исследования у созданного природой биосонара необходимо найти адаптивные характеристики сигналов излучения в зависимости от акустических и физических характеристик среды распространения сигнала, методические решения по регистрации сигналов и подготовке животных для решения задач в сложной помеховой обстановке [11].

На рисунке 3 представлены два импульса с различными спектрально-временными параметрами. Как видно из представленных импульсов, зарегистрировать стабильную структуру импульса сложно, т.к. количество степеней свободы велико, а создание стабилизированной системы регистрации, существенно зависящей от места крепления гидрофона, усилителя и системы цифровой регистрации широкополосных сигналов представляет технологические сложности. [12] Перечислим основные степени свободы и возможные пути снижения влияния этих факторов:

1. *Изменение положения тела относительно точки регистрации.* В эксперименте место старта необходимо фиксировать.
2. *Изменение положения головы.* Фиксация головы на старте с помощью кольца и загубника.
3. *Изменение конфигурации рефрактора* (рис.2, а, б). Меняется частотная характеристика поля излучения, что приводит к изменению профиля акустического луча (рис.2, в).
4. *Изменение отражательной характеристики рефлектора.* Место акустической пушки располагается либо перед толстой лобной костью, либо перед лобными пазухами, что приводит к смене акустического сопротивления рефрактора.
5. *Изменения профиля рефрактора* (создаются условия сканирования в горизонтальной плоскости (рис.1, в) [10]
6. *Изменение количества рабочих излучателей импульсного сонара.* На основе полученных данных импульсного излучения просматриваются три излучателя работающих синхронно или асинхронно.
7. *Изменение количества лучей* (рис.1, в). Доказывает включение второго излучателя. Для обнаружения такого излучения необходимо иметь многоэлементную антенну приема.

Таким образом включение различных режимов излучения связано с необходимостью улучшения помехозащищенности и скрытности за счет формирования в пространстве:

- простых биполярных широкополосных сосредоточенных во времени ультракоротких импульсов с базой ≈ 1 и коэффициентом относительной широкополосности 0.7-0.8 (UWB);
- серии UWB импульсов в диапазоне от 5 мкс до 20 мкс;
- серии разнообразных пакетов с UWB импульсами
- серии пакетов с UWB импульсами с время-импульсной модуляцией;
- серии пакетов с UWB импульсами и манипуляцией;
- серии сложных пакетов UWB с время-импульсной модуляцией и манипуляцией.

Разнообразие сигналов, зарегистрированных в лабораторных экспериментах, подтверждает или отрицает модели излучающей или приемной антенны, а также модели обработки гидроакустического потока информации. Поток сигналов, который дельфин воспринимает постоянно - это естественная подсветка пространства низкочастотным шумом среды обитания. Импульсная подсветка пространства сигналами других особей, в том числе креветками в области низких и высоких частот до 200 кГц и до 400 кГц (рис.3). Столь обширная область частотного пространства, закрытая помехами, заставила природный сонар отстраиваться от помех различного класса в течении 65 млн. лет. Природный сонар способен отстраиваться даже от самых сложных помех, создаваемой сородичами – это сосредоточенные помехи.

Рассмотрим более подробно процесс эхолокации импульсного природного сонара, использующего ультракороткие импульсы, которые сохраняют свои спектрально-временные параметры в максимуме пространственной характеристики направленности излучения вперёдсмотрящего сонара. Договоримся, что в пределах угла $\pm 2^\circ$ высокочастотные составляющие 200 кГц и более сохраняют свои параметры в пространстве. Все пространство,

более $\pm 2^\circ$ подвергается изменению поля излучения, особенно на высоких частотах (более 50 кГц). Чем дальше радиальное удаление от максимума, тем более низкочастотным становится импульс излучения. Будем основываться на импульсе, который регистрируют, как правило, все исследователи, работающие в открытой воде – это сигнал, представленный на рисунке 3, а.

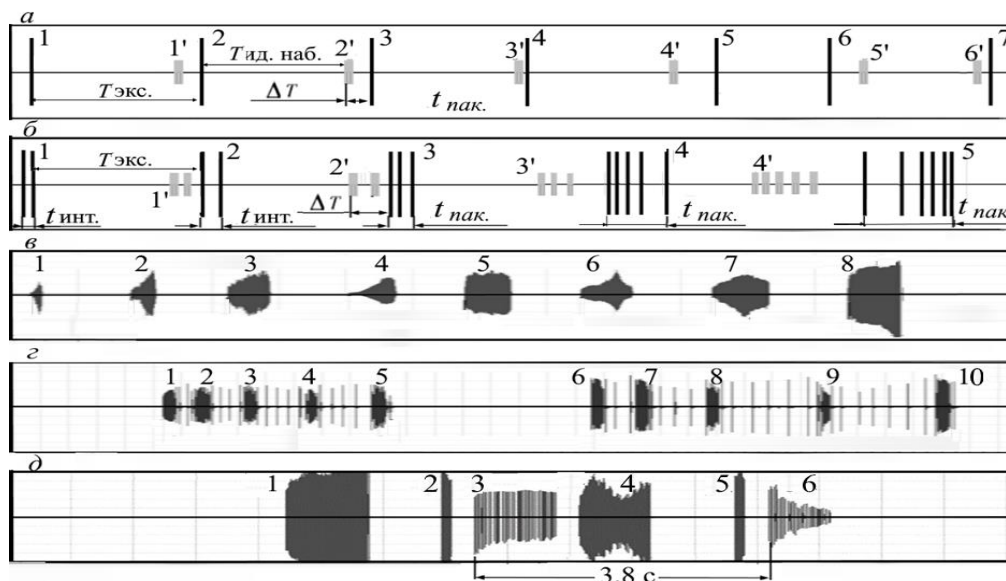


Рис.4. Основные стратегии поиска впередсмотрящего сонара дельфина: а – моноимпульсная эхолокация; б – мультимпульсная эхолокация - формирование серии пакетов, состоящих из 2-30 ультракоротких импульсов с низкочастотной время-импульсной модуляцией от 10 мс до 120 мс; в – серия пакетов, состоящих из УКИ с высокочастотной время-импульсной модуляцией от 3 мс до 10 мс; г – сложно организованные серии пакетов с манипуляцией высокочастотными и низкочастотными пакетами, состоящих из УКИ; д – синхронная (3.8 с) манипуляция трех генераторов при формировании двойных пакетов, состоящих из УКИ с высокочастотной модуляцией (пакеты 2 и 5), среднечастотной модуляцией (пакеты 1 и 4), низкочастотной модуляцией (пакеты 3 и 6)

Основная стратегия поиска основана на излучении УКИ в моноимпульсном режиме эхолокации (рис.4, а). Серия излучения УКИ во время поиска цели претерпевает некоторые временные изменения в интервалах между излученными импульсами в соответствии с дальностью объекта поиска. Если измерить интервал между 1 и 2 импульсами, то получаем экспериментальное значение $T_{\text{экс.}}$ временного интервала, который состоит из времени прохождения сигнала от дельфина до объекта и обратно (назовем это время $T_{\text{ид. наб.}}$ – время работы идеального наблюдателя) и времени задержки, что позволяет найти коэффициент перекрытия $K_{\text{коэф. перек.}} = T_{\text{экс.}} / T_{\text{ид. наб.}}$. Задержка равна $\Delta T \approx T_{\text{экс.}} - T_{\text{ид. наб.}}$, и включает в себя время обработки отраженного импульса 1' и время принятия решения. Как показали эксперименты по сопровождению цели $K_{\text{коэф. перек.}}$ меняется незначительно и лежит в пределах значений 1.1÷1.2. При смене обстановки эксперимента или исчезновении цели $K_{\text{коэф. перек.}}$ меняется от 0.7 до 1.6, т.е. показатель оптимальной величины составляет 1.1÷1.2 и меняется он в экстренных ситуациях. Изменения интервала между эхолокационными импульсами, вызванные неизвестными факторами, дельфин самостоятельно поправляет до оптимальной величины. Интервалы между импульсами 3-4-5-6-7 меняются, что заметно по задержке между отраженным сигналом от цели и последующим импульсом. Изменение коэффициента перекрытия является доказательством определения дельфином того, как далеко или близко от него находится цель, обрабатывая информацию подсвеченных объектов в 3-х мерном пространстве, и самостоятельно устраняя неопределенность по изменению дальности объекта поиска.

Усложнение акустического фона среды или изменение силы цели приводит к смене сигнала поиска с одиночных импульсов на излучение пакетов УКИ, состоящих из двух импульсов и конечно изменению длительности сигнала в пределах от 5 до 60 мс. При 2-х импульсах в пакете интервал между импульсами совпадает с параметром длительности пакета $t_{\text{инт.}} = t_{\text{пак.}}$. При излучении 3-х и более импульсов в пакете увеличивается длительность пакета и появляется еще

один показатель - время-импульсная модуляция. Время- импульсная модуляция временного интервала между импульсами в пакете может быть прямая (пакет № 4 на рис. 4, б) и обратная (пакет № 5 на рис. 4, б). При этом временная конфигурация отраженного сигнала полностью повторяет эхолокационную последовательность зондирующего сигнала (сигнал №2 и эхо 2', сигнал № 3 и эхо 3', сигнал №4 и эхо 4' на рис.4, б). Предполагается, что изменение интервала между импульсами в пакете позволяет кодировать собственное излучение от сигналов других особей.

Дальнейшее изменение акустического фона среды или показателя силы цели приводит к дальнейшей адаптивной подстройке подсвечивания среды, формируя пакеты с высокочастотной время-импульсной модуляцией (рис.4, в) до величины интервала 1.5 ± 0.3 мс, а количество импульсов в таких высокочастотных пакетах достигает 150. Период следования высокочастотных пакетов доходит до 1.5 с, а количество пакетов зависит от сложности акустической обстановки.

Если высокочастотная время-импульсная модуляция и длинные импульсы исчерпали запас помехозащищенности, то дельфин переходит на следующий уровень, используя сложные серии пакетов с манипуляцией высокочастотными и низкочастотными пакетами (рис.4, г). Так, например, в первой серии дельфин использует пять пакетов с высокочастотной (пакеты №1, №2, №3, №4, №5) и низкочастотной (пакеты №1-2, №2-3, №3-4, №4-5) манипуляцией. Во второй серии дельфин также использует пять пакетов с высокочастотной (пакеты №6, №7, №8, №9, №10), но с более низкочастотной (пакеты №6-7, №7-8, №8-9, №9-10) манипуляцией, чем в первой серии.

И самые сложные сигналы, которые удалось обнаружить в натурном эксперименте – это сигналы с синхронной (3.8 с) манипуляцией трех генераторов при формировании сдвоенных пакетов, состоящих из УКИ с высокочастотной модуляцией (пакеты 2 и 5) с интервалами от 1.62 мс, до 1.72 мс среднечастотной модуляцией (пакеты 1и 4), низкочастотной и псевдослучайной модуляции (пакеты 3 и 6).

Параметры излучения сигналов, состоящих из серий пакетов, дельфин выбирает в зависимости от акустической обстановки и активно меняет их в случае необходимости. Большая часть пакетов содержит модуляцию скважности, определяемую временными параметрами кодирования с коэффициентом разнообразия, определяемой как $K_{\text{разн.}} = (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) / (t_{\text{max}} + t_{\text{min}})$. Для значений $t_{\text{min}} = 10$ и $t_{\text{max}} = 60$, $K_{\text{разн.}} = 0.7$. Для пакетов с параметрами $t_{\text{min}} = 2.2$ и $t_{\text{max}} = 2.4$, $K_{\text{разн.}} = 0.043$. Таким образом, в низкочастотных пакетах коэффициент разнообразия гораздо выше, чем в высокочастотных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленных фрагментах показано разнообразие зарегистрированных сигналов при смене стратегии поиска в статическом режиме эхолокации и поиске цели при смене дальности между дельфином и подводным объектом. Использование дельфином ультразвуковых ультракоротких импульсов не ограничено формированием сосредоточенных во времени сверхширокополосных импульсов. Основное разнообразие сигналов основано на использовании различного рода модуляций и манипуляций пакетов УКИ и серий пакетов УКИ. Если УКИ занимают частотный диапазон до 200 кГц или даже до 400 кГц, то время-импульсная модуляция, как правило, не превышает 1 кГц. Используя различные комбинации, формируя пакеты импульсов и серии пакетов с ВИМ, природный сонар освещает пространство перед собой и адаптируется к новой помеховой обстановке. Сказанное подкрепляется результатами лабораторных исследований в натуральных экспериментах, проведенных в открытой воде.

Описанное разнообразие модуляций и манипуляций в пакетах УКИ надо дополнить еще и смешанными последовательностями УКИ, когда природный сонар совместно с излучаемыми пакетами излучает одиночные импульсы, т.е. используется одновременно моноимпульсный режим и мультиимпульсный режимы эхолокационного поиска. Формирование пакетов УКИ с

ВИМ и без начинается не с дальности 100-120 м, а зависит от соотношения сигнал/помеха. Дельфин способен формировать и использовать пакеты находясь на достаточно близких расстояниях до цели, при этом дельфина не заботит возникающая неопределенность дальности до объекта поиска. По-видимому, использование пакетов с различной модуляцией и манипуляцией создает условия инвариантного приема нечувствительного к неопределенности по дальности [13]. Возможные неопределенности по углу могут сказываться, но только на высоких частотах из-за изменений пространственной характеристики поля излучения. Для инвариантного приема ВИМ УКИ на низких частотах (до 1 кГц) излучение в пакетном режиме делает нечувствительным приемную систему к искажениям по углу. Возможно, кодирование сложных пакетов также создает благоприятные условия для поддержания необходимой помехозащищенности, Ответом на вопросы о помехозащищенности всей системы в целом может быть использование частотно-модулированных длинных импульсов, но для этого надо придумать лабораторные эксперименты, в которых такие импульсы дельфин будет повторять.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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. 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/
4. Ivanov M.P., Rodionov A.A., Stefanov V.E. Technology broadband observation and communications on the basis of a study of sonar cetaceans // Proceedings of the XIII all-Russian Conference «Advanced technologies of hydroacoustics and hydrophysics». SPb. Science, 2016. С. 25-30. (in Russian).
5. Voronin M.A., Pivnev P.P., Tarasov S.P. Building broadband and ultra-wideband antennas hydroacoustic research facilities // Proceedings of the XI all-Russian Conference «Advanced technologies of hydroacoustics and hydrophysics». SPb. Science, 2012. P. 108-111. (in Russian)]
6. 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.
7. Aroyan, J. L., Cranford, T. W., Kent, J., and Norris, K. S. Computer modeling of acoustic beam formation in *Delphinus Delphi's* //1992. DOI: 10.1121/1.404424
8. 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.
9. Иванов М.П., Иваненко Ю.В. Механизмы управления направленностью акустического излучения у зубатых китов // Сб. XX Сессии РАО. 2008. Т.3. С.168–171.
10. 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.
11. 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.
12. Иванов М.П., Бутов С.Н., Леонова Л.Е., Романовская Е.В., Стефанов В.Е. Апробация лабораторного макета регистрации сигналов дельфинов с расширенной полосой частот сквозного тракта // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 5. С. 699–707. DOI: 10.1134/S0320791919050101
13. Оганов Т.А. Помехоустойчивость инвариантного приема импульсных сигналов // Радио и связь М.:, 1984. ББК 32,81. О-36. С.176.