

Пакеты ультракоротких импульсов дельфина *Tursiops truncatus* при решении задачи обнаружения на дистанциях более 500 метров

**М.П. Иванов^{1),3)}, Ю.А. Толмачев¹⁾, Н.Г. Бибииков²⁾, Е.В. Мухачёв³⁾,
Н.А. Данилов^{3),4)}, Б.В. Романов⁵⁾, Б.Ю. Красницкий⁵⁾, В.Е. Стефанов¹⁾**

¹⁾ Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9;

²⁾ АО Акустический институт им Н.Н. Андреева, Россия, Москва, ул. Шверника, 4.;

³⁾ ФГУП Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Россия, Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, 29.;

⁴⁾ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67 л. А;

⁵⁾ 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

DOI:10.34756/GEOS.2021.17.38167

Приведены результаты обработки данных акустического поведения дельфина афалины *Tursiops truncatus* при решении задачи обнаружения подводных объектов, удаленных на расстояние более 500 м. Эксперимент проведен по методике вынужденного выбора с акустическим управлением двигательного и акустического поведения с регистрацией акустических сигналов дельфина в ситуации «объект есть» и «объекта нет». Известно, что в таких экспериментах дельфин, как правило, использует моноимпульсный и мультиимпульсный режимы эхолокации. В зависимости от акустических условий среды моноимпульсный режим дельфин использует при дальности до объекта не более 120 м. На дистанциях, превышающих 120 м дельфин формирует пакеты импульсов, состоящие из двух и более импульсов с модуляцией интервалов между импульсами от 10 до 60 мс. Количество пакетов зависит от ситуации, существует или отсутствует объект поиска в секторе обзора. Если объект поиска находится в секторе обзора, то количество излученных пакетов варьирует от 1 до 5, а в случае отсутствия объекта поиска, количество пакетов увеличивается. Интервал между импульсами при моноимпульсном и мультиимпульсном режимах эхолокации зависит от коэффициента перекрытия, величина которого при правильном решении задачи больше 1. На

дистанции равной или более 500 м до объекта поиска дельфин начинает использовать пакеты импульсов с интервалом между импульсами от 1 до 3 мс. Модуляция интервала между импульсами в таких пакетах выражена слабо, но количество пакетов увеличивается с ростом дальности до объекта поиска с коэффициентом перекрытия более 1.

Ключевые слова: эхолокация дельфинов, обнаружение, пакеты сигналов

УДК: 57.084.1

PACS number (s): 43.80.Ka, 43.80. Lb [WWA]

Введение

Изучение эхолокационной системы дельфина обычно проводится на лабораторных животных с использованием условно-рефлекторных методик обучения с пищевым подкреплением или с подкреплением с помощью акустических сигналов (команды) и сигналов обозначения реакции (правильно, неправильно) [1]. Представленные результаты исследования сонара дельфина получены в натуральных условиях в открытой воде в статическом режиме эхолокации в динамике [2], когда животное двигалось по направлению к объекту поиска или в статическом режиме эхолокации с использованием фантомного эха [3]. В зависимости от методики эксперимента использованы соответствующие приемы системы регистрации сигналов эхолокации.

В процессе поиска и идентификация объекта поиска дельфин решает несколько задач: облучение пространства и поиск объекта, акустический контакт с объектом, сопровождение этого объекта, распознавание его акустического образа. О решении поставленной задачи дельфин сообщает оператору соответствующим двигательным поведением (нажатием на педаль «есть объект» или на педаль «объекта нет» в секторе обзора) или акустическим сигналом – разной модальности пакет из УКИ или длинный ЧМ сигнал (свист). Регистрация сигналов во всех испытаниях проводилась в дальней зоне в 50 м от вольера, что позволило при обработке данных сравнивать спектрально-временные параметры зарегистрированных сигналов [4].

Результаты и обсуждение

Рассмотрим эхолокационное поведение дельфина при поиске объекта (уголковый отражатель силой -1 дБ, 0 дБ) на различных дистанциях. На дистанции до 120 м

дельфин афалина использует, как правило, моноимпульсный режим эхолокации. Коэффициент перекрытия с априори известной дальностью или при сопровождении объекта составляет величину, в ситуации наличия объекта поиска в секторе обзора $K_{\text{перек.}} = 1.2$, а при отсутствии объекта поиска – $K_{\text{перек.}} = 4.0$ [5]. Сравнение результатов исследований показывает, что дельфины активно используют смешанный режим излучения: серии одиночных импульсов и пакеты импульсов, состоящие из двух и более импульсов с интервалом между импульсами 10÷40 мс. По мере удаления объекта длительность пакетов увеличивается до 350 мс, а количество импульсов в пакетах достигает 20 с интервалами между импульсами от 10 мс до 60 мс. На дальностях от 500 м до 650 м количество пакетов увеличивается от 2 до 5 при наличии объекта поиска и до 7 пакетов в его отсутствии.

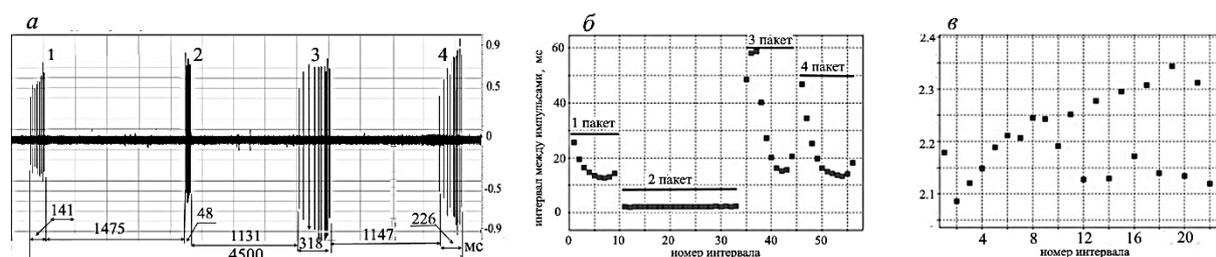


Рис.1. Временные параметры последовательности пакетов УКИ при решении задачи обнаружения подводного объекта (дистанция 500 м) при отсутствии объекта поиска и правильной ответной реакции дельфина (время работы идеального наблюдателя 666 мс); *а* – осциллограмма нормированной по амплитуде последовательности пакетов УКИ с временными параметрами; *б* – модуляция временных интервалов всех пакетов УКИ (периоды отсутствия излучения устранили); *в* – модуляция временных интервалов в пакете №2

На рисунках 1÷3 представлены три серии пакетов УКИ, излучаемых дельфином при удалении на 500 м, 550 м и 630 м, нормированные по амплитуде. На осциллограммах показаны все условия испытаний и основные временные параметры, представленных серий сигналов (рис.1, *а*; 2, *а*; 3, *а*). На графиках (рис.1, *б*; 2, *б*; 3, *б*) представлены временные конфигурации интервала между импульсами внутри пакетов. На графиках (рис.1, *в*; 2, *в*; 3, *в*) показаны временные конфигурации интервала между импульсами в самых коротких пакетах. Методика эксперимента была рассчитана так, что дельфин самостоятельно определял время поиска и параметры пакетов. При расстоянии до объекта 450 м начинают появляться пакеты длительностью 40-60 мс с интервалом между ультракороткими импульсами 1÷5 мс и модуляцией скважности. Более часто такие короткие пакеты проявляются при расстояниях до объекта 500 м и более.

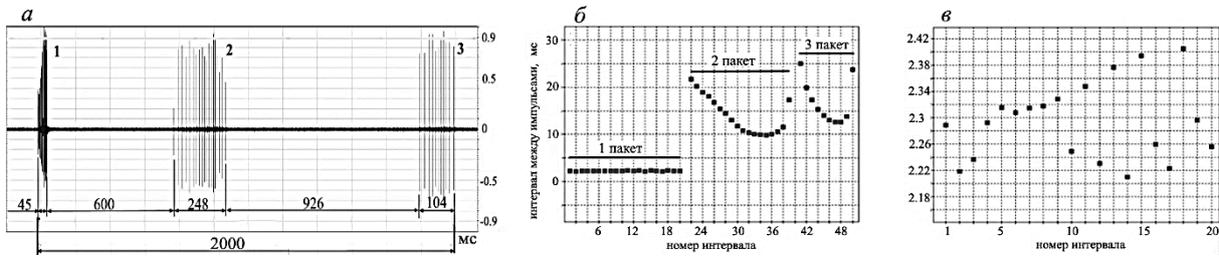


Рис.2. Временные параметры последовательности пакетов УКИ при решении задачи обнаружения подводного объекта при удалении объекта поиска на дистанцию 550 м и правильной ответной реакции дельфина (время работы идеального наблюдателя 733 мс); *a* – осциллограмма нормированной по амплитуде последовательности пакетов последовательности пакетов УКИ с временными параметрами; *б* – модуляция временных интервалов всех пакетов УКИ; *в* – модуляция временных интервалов в пакете №1

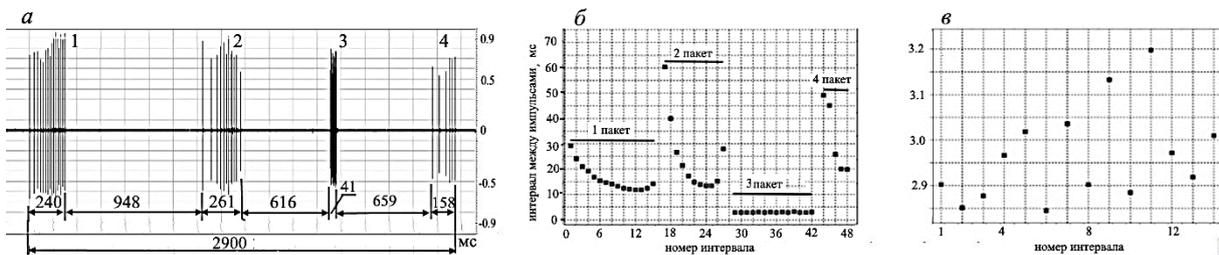


Рис.3. Временные параметры последовательности пакетов УКИ при решении задачи обнаружения подводного объекта (дистанция 630 м) при отсутствии объекта поиска и правильной ответной реакции дельфина (время работы идеального наблюдателя 840 мс); *a* – осциллограмма нормированной по амплитуде последовательности пакетов УКИ с временными параметрами; *б* – модуляция временных интервалов всех пакетов УКИ; *в* – модуляция временных интервалов в пакете №3

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, определяемой 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 $t_{\text{max}} = 2.4$, $K_{\text{разн.}} = 0.043$. Это пакеты, которые имеют длительность от ~ 40 до ~ 60 мс с интервалом между импульсами в пакете от 2.1 мс до 3.2 мс (рис.1-3, *в*). Расположение такого пакета внутри серии из 3-4 пакетов может быть самым разнообразным, например, вторым (рис.1, *a*), первым (рис.2, *a*) или третьим (рис.3, *a*). В пакетах, в которых коэффициент разнообразия более 0.5 интервал между импульсами варьирует сильнее по сравнению с пакетами, в которых коэффициент

разнообразия меньше 0.1 при ошибке измерения в третьем знаке после запятой. Понятно, что чем выше коэффициент разнообразия, тем больше вариаций кодирования собственной последовательности импульсов в пакетах. Можно предположить, что это обеспечивает более надежную систему обнаружения эхо-сигнала и его выделения на фоне эхолокационной последовательности других особей, находящихся рядом.

Максимальная амплитуда представленных сигналов составляет 220 дБ/мПа/м, причем отдельный импульс пакета имеет приблизительно форму производной от гауссианы с затухающими колебаниями в конце. В пакетах с коэффициентом разнообразия менее 0.1 амплитуда и спектрально-временные параметры импульсов, как правило, совпадают с остальными импульсами в пакете. Интервал между импульсами в некоторых пакетах меняется скачками с размахом от 2.12 мс до 2.35 мс (рис.1, в) и от 2.22 мс до 2.40 мс (рис.2, в) или от 2.9 мс до 3.2 мс (рис.3, в). Для пакетов с минимальным коэффициентом разнообразия максимальная величина изменения интервала составляет 0.23 мс, 0.18 мс, 0.3 мс, а минимальная - 0.01 мс. Такое значимое изменение минимального и максимального интервалов наводит на мысль, что наблюдаемые изменения интервала представляют собой не случайное, а вполне «обдуманное» решение дельфина для оптимизации процесса поиска подводного объекта в секторе поиска, т.е. временное кодирование импульсного потока. Предполагаем, что в данном случае, перед нами времяимпульсная модуляция в пакетах ультракоротких импульсов (УКИ).

Вариации изменения спектра импульсов в зависимости от угла регистрации показывают, что наблюдаемые изменения спектра не несут информации о расстоянии до объекта. В то же время, интервал между отдельными импульсами вполне инвариантен относительно угла наблюдения. Таким образом, на временных промежутках более секунды (дальности до объекта более 500 метров) при движении дельфина линия излучения и приема разнесены по пространству наблюдения, и спектр сигнала, который животное принимает, отличается от спектра излученного. При этом временная картина вариации интервала между импульсами в пакетах останется неизменной. Разнообразие структуры зарегистрированных пакетов подтверждает информационное значение времяимпульсной модуляции. Аналогичные результаты изучения пакетов импульсов описаны в работах [6, 7], где показано излучение дельфином пакетов импульсов при использовании в эксперименте фантомного эха и имитации изменения дальности до объекта от 25 м до 800 м.

Заключение

Результаты серии проведенных опытов определенно показывают, что увеличение расстояния между дельфином и объектом поиска приводит к смене стратегии поиска и излучения дельфином сигналов, адаптированных к акустическим условиям среды. С увеличением дальности до объекта появляются пакеты импульсов, длительность которых составляет $40 \div 60$ мс, в то время как большинство пакетов УКИ импульсов при расстоянии до цели 500 и более метров имеют длительность $100 \div 300$ мс. Количество импульсов в коротких и длинных пакетах примерно одинаково $20 \div 25$. Интервал между импульсами в коротких пакетах меняется в пределах $1 \div 5$ мс, а в длинных пакетах - в пределах $10 \div 60$ мс. Коэффициент разнообразия коротких пакетов не превышает величину 0.05, в то время как для длинных пакетов $K_{разн.} = 0.7$. Предполагается, что при увеличении дальности более 600 метров количество коротких пакетов в испытаниях будет увеличиваться, а количество длинных пакетов уменьшаться. Таким образом, наблюдается подстройка параметров пакетов импульсов под акустические условия среды и улучшение с помощью нового сигнала соотношения сигнал/шум+помеха.

Литература

1. *Ivanov M.P.* // Acoust. Phys. 2004, 50, 469– 479.
<https://doi.org/10.1134/1.1776226>, Google Scholar Crossref
2. *Michael Ladegaard, Jason Mulsow, Dorian S. Houser, Frants Havmand Jensen, Mark Johnson, Peter Teglbjerg Madsen, James J. Finneran* // Journal of Experimental Biology. 2019, 222, jeb189217. doi: 10.1242/jeb.189217
3. *Finneran J.J., Mulsow J., Branstetter B.K., Moore P.W.* // The Journal of the Acoustical Society of America 140(4). 2016. :3179-3180 DOI: 10.1121/1.4969993
4. *Ivanov M.P., Bibikov I.G., Mukhachev E.V., Danilov I.A., Romanov B.V., Krasnitsky B.Yu., Stefanov V.E.* // Ocean Acoustics Proceedings XVII 19-23 October 2020. 300-304.
5. *Ivanov M.P., Rodionov A.A., Stefanov V.E.* // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2020, 13, 4, 100–120. doi: 10.7868/S2073667320040097
6. *James J. Finneran.* // J. Acoust. Soc. Am. 2014, 136, 2876. doi: 10.1121/1.4898043
7. *James J Finneran.* // J.Acjust. Soc. Am. 133 (3), 2013. 1796-1810.

Сведения об авторах

1. Иванов Михаил Павлович – канд. биол. наук, старший научный сотрудник; Санкт-Петербургский государственный университет; тел.: +7(911)9425478, e-mail: 20mivanov@mail.ru
2. Толмачев Юрий Александрович – докт. физ-мат. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет; тел.: +7(964)3927536, e-mail: tolmashevuyua@yandex.ru
3. Бибиков Николай Григорьевич – докт. биол. наук, главный научный сотрудник; АО Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева; тел.: +7(916)3933263, e-mail: nbibikov1@yandex.ru
4. Мухачев Евгений Владимирович – канд. биол. наук, заведующей лаборатории, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем»; тел.: +7(905)2034133, e-mail: evgeniy012@gmail.com
5. Данилов Николай Анатольевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»; тел.: +7(905)2647933, e-mail: dan_nick@mail.ru
6. Романов Борис Валериевич – младший научный сотрудник; «ФГБУН Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, филиал ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» тел.: +7(978)7511397, e-mail: bvromanov@gmail.com
7. Красницкий Борис Юрьевич – ведущий инженер; «ФГБУН Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, филиал ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», тел.: +7(978)8077908, e-mail: krasnitzkij.b@yandex.ru
8. Стефанов Василий Евгеньевич – канд. биол. наук, доцент, заведующий кафедрой биохимии, «Санкт-Петербургский государственный университет»; тел.: +7(921)5539076, e-mail: vastef@mail.ru

назад к содержанию секции БИО

***Tursiops truncatus* dolphin ultra-short pulse packets when solving the detection problem
at distances of more than 500 meters**

**M.P. Ivanov^{1),3)}, Yu.A. Tolmachev¹⁾, N.G. Bibikov²⁾, E.V. Mukhachev³⁾,
N.A. Danilov^{3),4)}, B.V. Romanov⁵⁾, B.Yu. Krasnitsky⁵⁾, V.E. Stefanov¹⁾**

¹⁾*St. Petersburg State University, Russia, St. Petersburg, University Emb. 7/9;*

²⁾*JSC Acoustic Institute named after N.N. Andreev, Russia, Moscow Shvernika street, 4;*

³⁾*FSUE State Research Institute of Applied Problems, Russia, St. Petersburg, Obvodny Canal emb. 29.*

⁴⁾*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya St.67 l. A;*

⁵⁾*T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station — Nature Reserve of RAS — Branch of A. O. Kovalevsky
Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Russia, Feodosia, Kurortnoe, 24 Nauki Street.*

Tel.: +7(911) 942 5478, E-mail: 20mivanov@mail.ru

The results of data processing of acoustic behavior of the bottlenose dolphin *Tursiops truncatus* when solving the problem of detection the underwater objects at a distance more than 500 m. The experiment was carried out according to the method of forced selection under the acoustic control of motor and acoustic behavior with registration of acoustic signals of the dolphin in the situation of "there is an object" and "there is no object". It is known that in such experiments, the dolphin, as a rule, uses monopulse and multipulse echolocation modes. Depending on the acoustic environmental conditions, the dolphin uses the monopulse mode at a distance to the object of no more than 120 m. At distances exceeding 120 m, the dolphin forms pulse packets consisting of two or more pulses with modulation of intervals between pulses from 10 to 60 ms. The number of packets depends on the situation whether the search object exists or does not exist in the overview sector. If the search object is inside the overview sector, the number of emitted packets varies from 1 to 5, and in the absence of a search object, the number of packets increases. The interval between pulses in multipulse echolocation mode depends on the overlap coefficient which value at the correct solution of the problem is greater than 1. At distances to the search object greater than 500 m, the dolphin begins to use pulse packets with an interval between pulses from 1 to 3 ms. The modulation of interval between pulses in such packets is weakly expressed, but the number of packets increases under increasing the range to the search object with an overlap coefficient more than 1.

Keywords: dolphin echolocation, detection, pulse packets

PACS number (s): 43.80.Ka, 43.80. Lb [WWA]

[back to the content of the section](#)