

УДК 681.519

*ЗАЙЦЕВА КИРА АЛЕКСАНДРОВНА,
КОРОЛЕВ ВАЛЕНТИН ИВАНОВИЧ,
КРИВЧЕНКО АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ,
АХИ АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ,
БУТЫРСКИЙ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ*

РАЗРЕШЕНИЕ ПО УСКОРЕНИЮ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ ЛОКАТОРА ДЕЛЬФИНА (TURSIOPS TRUNCATUS)*

АННОТАЦИЯ

В статье исследована чувствительность эхолокационной системы к ускорению движущейся цели черноморских дельфинов афалин в поведенческих экспериментах с пищевым подкреплением. Установлен диапазон ускорений, в пределах которого, дельфин осуществляет правильный выбор движущейся цели с заданной вероятностью обнаружения.

Ключевые слова: дельфин; локация; ускорение; движущаяся цель.

*ZAYTSEVA K. A.,
KOROLEV V. I.,
KRIVCHENKO A. I.,
AKHI F. V.,
BUTYRSKIY E. U.*

ACCELERATION RESOLUTION OF THE MOVING TARGETS OF THE DOLPHIN (TURSIOPS TRUNCATUS) LOCATOR

ABSTRACT

The article explored the sensitivity of echolocation system to expedite the moving target of Black Sea bottlenose dolphins in behavioral experiments with food reinforcement. Set range of accelerations, within which, the Dolphin carries out a correct choice of a moving target with the specified probability of detection.

Keywords: dolphin; location; acceleration; moving target.

Введение

В настоящее время, на мировом политическом поле наблюдается агрессивная и наглая информационная война против России. При этом в ход идет не только антирусская истерия, развязанная в средствах массовой информации, но и экономические санкции, вводимые по самым надуманным предлогам, навязывание гонки вооружений, угрозы проведения локальных военных акций и т.д.

В этих условиях, вопросы усиления Вооруженных сил России и, в частности, Военно-морского флота, становятся важнейшей компонентой национальной безопасности. В состав флота поступают новые корабли и подводные лодки, способные эффективно вести боевые действия с любым противником и в любой точке мирового океана. Применение оружия предполагает использование различных комплексов освещения подводной и надводной

* Работа была выполнена в Институте эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН в рамках государственного задания ФАНО. Тема ПФНИГ АН-63. Рег. АААА-А18-1180130902245-6.

обстановки. Единственным средством, позволяющим обнаруживать, классифицировать и решать задачи определения координат и параметров движения подводных объектов и выдачи по ним целеуказания оружию, является гидроакустические средства (ГАС). С другой стороны, нельзя не отметить, что развитие гидроакустического вооружения происходит, в основном, только за счет новой технологической базы и широкого внедрения цифровой техники, оставаясь при этом в рамках давно известных методов и подходов обработки гидроакустической информации. Причем это имеет место не только у нас, но и у наших «потенциальных партнеров». Учитывая, что шумность и заметность подводных объектов значительно снизилась, эффективность ГАС при решении задач обнаружения и классификации растет не так быстро, как этого хотелось бы. Современные системы не могут, например, различать из какого материала сделан тот или иной объект локации. В принципе можно констатировать, что наблюдается определенный застой в развитии систем обработки гидроакустической информации, который трудно преодолеть только за счет технологий и широким применением компьютеров. Кроме современных технологий, необходимо предлагать новые математические модели сигналов и помех, которые требуют более глубокого и фундаментального изучения механизмов взаимодействия акустической волны и объекта локации. С другой стороны, можно «почувствовать у природы». Поэтому на Западе и, в частности, в США ведутся активные исследования по изучению локационной системы дельфинов, которая за миллионы лет эволюции, стала высокоэффективной системой, которая позволяет им выживать вида в сложнейших и постоянно меняющихся условиях существования. Раскрытие механизма функционирования локационной системы дельфинов, позволит реализовать новые принципы формирования гидроакустических сигналов и методы из обработки, включающие в себя целый спектр задач: обнаружение в пассивном и активном режиме, связь, классификация и т.д. Кроме того, большой интерес представляет изучение класса сигналов, которые использует дельфин в условиях взаимного перемещения с объектом локации.

Эхолокационная система морских млекопитающих использует излучение и отражение сигнала

для обнаружения и определения координат цели, а также для измерения параметров движения. Принципы работы локационной системы дельфина при восприятии динамических характеристик движущихся целей практически не изучены, так как основное внимание исследователей было направлено на изучение закономерностей работы сонара дельфина афалины при обнаружении и опознавании им объектов, отличающихся по форме, размеру, материалу [1, 2, 3] и находящихся при этом в стационарном состоянии. Данные о степени подвижности, лоцируемых дельфином объектов и характере их перемещения в пространстве весьма важны для адекватного поведения животного и расчета им траектории движения. Локационное изменение параметров движения позволяет дельфину выделить из окружающей среды объекты биологического происхождения, например, движущиеся стаи рыб [4]. В предыдущих наших работах [5] были получены вероятностные характеристики различения дельфином скорости подвижной цели, которые свидетельствуют о том, что дельфин способен надежно оценивать такие скорости движения цели, как 3–13 см/с, что существенно отличается от тех значений разрешающей способности биологатора (2000–3000 см/с), которые были получены в расчетах, исходя из использования доплеровского сдвига [6, 7, 8]. В условиях естественного обитания часто встречаются ситуации, когда информация только о скорости движения лоцируемых объектов недостаточна. Реальные объекты, как правило, движутся по разным траекториям с нестационарной скоростью. В этом случае требуется оценка производных расстояния более высокого порядка, чем скорость движения.

Цель настоящей работы – выполнение экспериментального исследования возможностей локационной системы дельфина к восприятию ускорения подвижной цели.

Методика проведения эксперимента

Исследования проводились на черноморских дельфинах афалинах в вольере открытой бухты моря в условиях свободного плавания животных по методике условных рефлексов с пищевым подкреплением. В условиях экспериментов формирование ускорения должно состоять в неравномерном движении объекта лоцирования относительно

точки приема зондирующего сигнала. Движение объекта может осуществляться по различным траекториям. В данной работе для упрощения методических условий была выбрана радиальная траектория движения цели: цель либо удалялась, либо приближалась относительно животного. Необходимо использовать такой способ перемещения объекта лоцирования, при котором единственным измеряемым параметром движения являлось бы ускорение. Для этого был выбран метод линейного изменения скорости объекта, перемещающегося радиально по отношению к стартовому положению дельфина.

Была разработана и изготовлена специальная установка. Основой конструкции являлись два направляющих рельса, по которым перемещались тележки под действием приводов. Эта часть конструкции располагалась над водой. Для увеличения сцепления колес с поверхностью направляющих рельсов и бесшумного перемещения тележки колеса снабжены резиновыми шинами. К тележке на дюралюминиевой штанге прикреплена мишень, которая перемещалась в воде и представляла собой шар диаметром 40 мм, выполненный из оргстекла. Для устранения погрешностей, связанных с отклонением мишени от вертикального положения при высоких скоростях движения, и вибраций, диаметр штанги, на которой крепится мишень выбран равным 15 мм. Органами управления продоль-

ного перемещения мишени можно было изменять направление движения мишеней (приближение, удаление) скорость и ускорение.

В основу методики было положено условно-рефлекторное обучение животного распознаванию двух тождественных мишеней, отличающихся лишь ускорениями. Задача распознавания сводилась к выбору дельфином движущейся с ускорением цели, а не цели, движущейся с постоянной скоростью – «фоновой». Мишени шаровой формы располагались симметрично в сетевом вольере размером $20 \times 5 \times 5$ м на расстоянии 16 м относительно стартового положения дельфина. Мишени находились на расстоянии 1,2 м одна от другой и погружены в воду на глубину 0,5 м.

В процессе выработки условно-рефлекторной реакции на положительный (ускоряемый) объект, выбор дельфином «фонового» объекта не подкреплялся. Для исключения возможной реакции животного на различие в скоростях ускоряемой и неускоряемой мишеней, скорость неускоряемой мишени варьировалась таким образом, что могла соответствовать одному из значений мгновенной скорости, начиная с 2,6 м/с (рис. 1). Для исключения влияния фактора времени длина пробега мишеней варьировала от 2 до 10 м. Следовательно, можно считать, что единственным информативным признаком при выполнении экспериментов являлось наличие ускорения у движущегося объ-

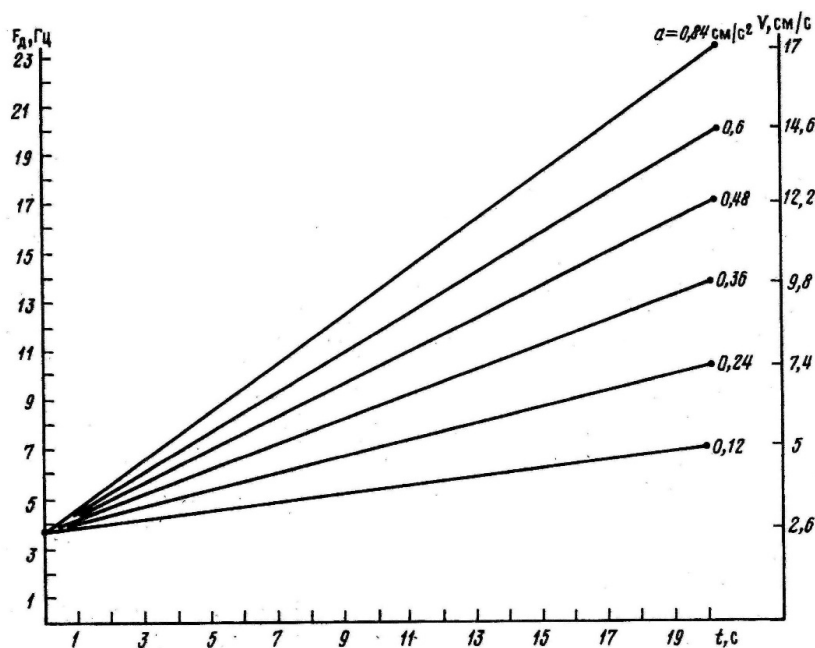


Рисунок 1 – Зависимость скорости (V) и доплеровского сдвига частоты (F_d) от времени (t) для различных величин ускорения (a)

екта. При проведении эксперимента от дельфина требовалось в результате локационного зондирования обнаружить движущуюся с ускорением мишень и выполнить подход в соответствующую зону вольера. Правильные решения, т.е. подходы дельфина в зону ускоренно движущегося объекта, подкреплялись рыбой. Взаимное положение мишеней варьировало в случайном порядке.

При движении объекта появляется гидродинамический шум, вызванный вихревыми потоками при обтекании мишени водой. Однако при малых скоростях движения мишени, которые использовались в настоящей работе (2,6-17 см/с), малых размерах сферы и форме ее, близкой к случаю идеального обтекания, образующийся шум имеет малую интенсивность и находится в низкочастотной области спектра. Поэтому можно полагать, что для измерения параметров движения объектов дельфины используют не гидродинамические шумы, а зондирующие импульсы.

Результаты эксперимента

Программа экспериментов состояла из двух этапов. На первом этапе осуществлялось обучение дельфина локационному восприятию ускорения движущейся мишени. В процессе обучения ускоряемая мишень имела только одно значение ускорения, равное 1,5 см/с², при начальной скорости движения 2,6 см/с. Параметры «фоновой» мишени квантовались в диапазоне

$$R_0 = \frac{\Delta R}{K}; V_0 = \frac{\Delta V}{K}.$$

где R_0, V_0 – соответственно дальность и скорость «фонового» отражателя, $\Delta R = 1,6$ м; $\Delta V = 15$ см/с –

диапазон изменения дальности и скорости: $K = 1, 2, 3, \dots 7$. Размер обучающей выборки заранее не фиксировался, а определялся лишь сходимостью процесса обучения. Устойчивая условно-рефлекторная реакция дельфина на ускоренно движущуюся мишень была достигнута при обучающей выборке из 96 предъявлений. Статистическая оценка качества обучения показала, что вероятность правильных решений (выбор «положительной» мишени), принимаемых дельфином, равна 0,92.

Следующий этап экспериментов заключался в исследовании эффективности обнаружения дельфином ускоренно движущейся мишени в зависимости от параметра ускорения. Для этого ускорение квантовалось в соответствии с условием

$$\{\dot{V}_\beta\} = \beta \dot{V}_m, \quad \beta = 1, 2, 3, \dots$$

где \dot{V}_β – ускорение мишени; $V_m = 0,12$ см/с – шаг квантования.

Параметры «фоновой» мишени сохранялись аналогичными предыдущему эксперименту. На рис. 2 представлен график, характеризующий эффективность обнаружения дельфином движущейся цели в зависимости от ее ускорения. Экспериментальные данные были получены для семи значений ускорения, формируемых в случайной последовательности с равной вероятностью. Как следует из рисунка, вероятность обнаружения дельфином ускоренно движущейся мишени является монотонной функцией ускорения. В диапазоне от 0,12 до 0,84 см/с² эффективность обнаружения растет приблизительно по линейному закону. Значение ускорения, равное 0,6 см/с², при котором дельфин осуществляет правильный выбор ускоренно дви-

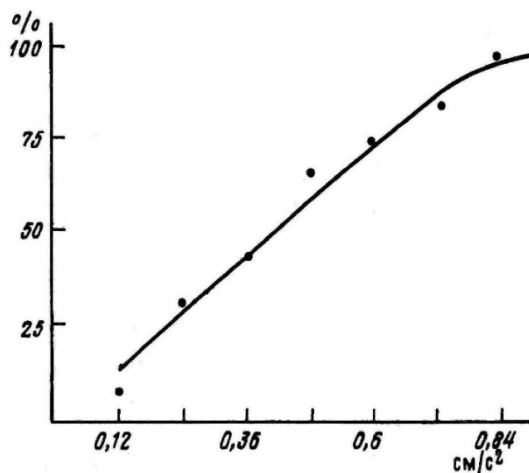


Рисунок 2 – Зависимость вероятности локационного обнаружения дельфином подвижной цели от величины ускорения. Абсцисса – ускорение, см/с², ордината – вероятность, %

жущейся мишени с вероятностью 0,75, принято за порог.

На основании результатов выполненного исследования можно сделать вывод, что эхолокационная система дельфина чувствительна к ускорению движущегося объекта. Это обеспечивает дополнительные возможности эхолокационного дифференцирования дельфином объектов на основе различия в их динамических характеристиках. Эффективное восприятие ускорения, лоцируемых дельфином объектов, лежит в области значений, превышающих $0,6 \text{ см/с}^2$.

В локационных системах морских млекопитающих оценка координат параметров движения цели в принципе возможна на основе одиночного зондирующего импульса. В этом случае эхосоставляющая принятого сигнала в общем виде будет отличаться от излученного по амплитуде, задержке по времени и сдвигу по частоте. Соответственно три параметра подлежат оценке: амплитуда сигнала, время запаздывания и сдвиг частоты отраженного сигнала по сравнению с излученным. Амплитуда сигнала может быть использована для определения размера цели (по крайней мере относительно), запаздывание во времени – для определения дальности цели и сдвиг частоты – для определения радиальной скорости цели. В наших экспериментах единственным параметром движения, подлежащим оценке слуховой системой дельфина, являлось ускорение. Обнаружив движущуюся цель, сонар дельфина, вероятнее всего, начинает работать как гидролокатор непрерывного сопровождения цели, постоянно получая данные о сопровождаемой цели. Причем в технике такая система по необходимости может осуществлять непрерывное сопровождение по дальности и по доплеровской частоте [9].

Ускорение по дальности, с которым движется объект, можно определять, используя получаемую системой информацию об изменении скорости. Измерение радиальной составляющей скорости объекта в локационных системах может производиться по доплеровскому сдвигу частоты отраженного сигнала по сравнению с излученным [9, 10, 11, 12]. Использование доплеровского эффекта для оценки динамических характеристик подвижных целей было обнаружено у некоторых видов летучих мышей [10, 11, 12]. При оценке скорости подвижной цели подковоносы могут не только восприни-

мать доплеровские изменения частоты эхосигнала, но и компенсировать их. В полете подковоносы снижают частоту излучаемых сигналов на величину, близкую к значению доплеровского сдвига, и таким способом поддерживают частоту воспринимаемого эха на постоянном уровне. Возможность использования летучими мышами подобного механизма для оценки величины ускорения была показана в работе [12].

Однако возможности использования афалиной доплеровского эффекта для измерения ускорения порядка $0,6-0,84 \text{ см/с}^2$ сомнительна. Расчет величины доплеровского сдвига частоты (F_d) для таких скоростей движения цели, как $2,6-17 \text{ см/с}$, показывает (рис. 1), что при частоте излучаемого сигнала 100 кГц и скорости звука в воде 1550 м/с приемная слуховая система должна быть способной оценивать изменения частоты излучаемого сигнала порядка $3,5-24 \text{ Гц}$. Поскольку, как показали экспериментальные исследования, на частоте 100 кГц чувствительность к изменению частоты у афалины составляет $900-1350 \text{ Гц}$ [13], становится очевидным, что дельфины для оценки динамических характеристик подвижных целей не могут использовать механизм слежения за доплеровским смещением частоты и должны использовать иной механизм.

Список литературы

1. Au W. W. L., Hastings M. C. Principles of Marine Bioacoustics. – Springer, New York, NY., 2008. – 680 p.
2. Ridgway S. H., Au W. W. L. Hearing and Echolocation in Dolphins // Encyclopedia of Neuroscience. – 2009. – V. 4. – P. 1031-1039.
3. Зайцева К. А., Королев В. И., Ахи А. В., Кривченко А. И., Бутырский Е. Ю. Дельфин *Tursiops truncatus* и его локационные возможности // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2018. – № 1(21). – С. 74-82.
4. Au W. W. L., Branstetter B. K., Benoit-Bird K. J., Kastelein R. A. Acoustic basis for fish prey discrimination by echolocating dolphins and porpoises // J. Acoust. Soc. Am. – 2009. – V. 126. – № 1. – P. 460-467.
5. Зайцева К. А., Королев В. И., Ахи А. В., Бутырский Е. Ю. Измерение дельфином *Tursiops truncatus* параметров движения подвижной цели

// Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2018. – № 23(3). – С. 67-73.

6. *Cahlander D. A.* Echolocation with wideband waveforms bat sonar signals // Techn. Rep. Lincoln Lab. MIT. – 1964. – № 271.

7. *Hickling R.* Analysis of echoes from a solid elastic sphere in water // J. Acoust. Soc. Amer. – 1962. – V. 34. – № 10. – P. 1582-1591.

8. *Poulter T.C.* The use of active sonar by the California Sea Lion // J. Auditory Res. – 1966. – № 6. – P. 165-173.

9. *Финкельштейн М.И.* Основы радиолокации. – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с.

10. *Константинов А. И., Макаров А. К., Соколов Б. В., Липманова Е. Э.* Доплеровские эхоло-

кационные системы животных // Проблемы нейрофизиологии: Нервная система. – Л.: Наука, 1978. – Вып. 20. – С.46-58.

11. *Альтман Я. А.* Слуховая система. – Л.: Наука, 1990. – 620 с.

12. *Макаров А. К., Соколов Б. В.* Компенсация доплеровских сдвигов эхолокационной системой подковоносых летучих мышей при движении с ускорением // Звуковая коммуникация, эхолокация, слух. – Л.: ЛГУ, 1980. – С. 65-72.

13. *Jacobs D.* Auditory frequency discrimination in the Atlantic bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus* Montague: A preliminary report // J. Acoust. Soc. Am. – 1972. – V. 52. – № 2. (Part 2). P. 696.

Статья поступила в редакцию 10 января 2019 г.

Принята к публикации 22 февраля 2019 г.