

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

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕЛЬФИНОМ *TURSIOPS TRUNCATUS* ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОДВИЖНОЙ ЦЕЛИ*

АННОТАЦИЯ

На черноморских дельфинах-афалинах исследована чувствительность эхолокационной системы к скорости движения цели. Получены зависимости вероятности обнаружения дельфином движущегося объекта от его скорости. Показано, что вероятность обнаружения прямо пропорционально зависит от параметра скорости в диапазоне 1,8-3,2 см/с. Пороговое значение скорости движения цели составляет 2,6 см/с. Обсуждается вопрос о возможных механизмах оценки сонаром дельфина скорости движения цели.

Ключевые слова: дельфин; обнаружение; расстояние; скорость; сигнал; движение.

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

MEASUREMENT OF DOLPHIN *TURSIOPS TRUNCATUS* MOVING TARGET MOVEMENT PARAMETERS

ABSTRACT

The speed sensitivity of Black Sea dolphins (*Tursiops truncatus*) echolocation system is investigated. The dependences of target detection probability by the dolphin on the speed of this target are obtained. Detection probability is shown to be directly proportional to speed in the range 1,8-3,2 cm/s. Target speed threshold is 2,6 cm/s. Possible mechanisms of target speed estimation by the dolphin are discussed.

Keywords: dolphin; detection; distance; speed; signal; traffic.

Введение

В настоящее время международная обстановка характеризуется жестким противостоянием России с Западом во главе с США. Противостояние идет по всем фронтам: политическом, экономическом, информационном, военном и т.д. В этих условиях стало совершенно ясно, что Россия должна мобилизовать все свои внутренние резервы, чтобы стать самодостаточной и независимой державой. И в этом плане все большую роль должен играть Военно-морской флот, который может засвидетельствовать и отстоять наше присутствие и наши интересы в любом районе Мирового Океана. При этом сам флот требует ближней охраны и защиты от различного рода диверсий. В США большая роль отводится различным морским животными, в частности дельфинам. Военные исследования, связанные с использованием дельфинов в военной

области, интенсивно развиваются. На сегодняшний день на семи специальных базах ВМС США работают по различным программам 250 животных. Одно из подразделений охраняет акваторию огромной военно-морской базы Бангор (штат Мериленд), где дислоцируется Атлантическая эскадра подводных ядерных ракетноносцев класса «Огайо».

Кроме этих суперсовременных технических средств, к охране Бангора привлечены подразделения дельфинов. В интервью газете «Дейли Ньюс» командир базы не скрыл своего восхищения безусловной надежностью этих живых подводных стражей. Учения показали, что все подводные диверсанты и водолазы были обнаружены сторожевыми дельфинами на расстоянии более 270 метров от входа в бухту. Дельфины не только обнаружили их, но и включили сигналы общей тревоги. Они точно сообщили направление движения и количество диверсантов и устремились на перехват.

* Работа выполнена в Институте эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченов РАН в рамках государственного задания ФАНО России на 2018 год. Тема ПФНИГАН-63 Рег. АААА-А18-118013090245-6

По сообщениям американских СМИ, кроме охраны Бангора одно из подразделений уже охраняет акваторию военно-морской базы Кингс-Бэй в штате Джорджия. Подразделение дельфинов несет боевую службу и в Персидском заливе, где базируется оперативная группировка американского военного флота. Здесь дельфины и сивучи, не только охраняют район дислокации флота от возможных атак диверсионных сил исламских экстремистов, но и обеспечивают боевые действия десантного плана, которые проводились еще в ходе Второй иракской войны.

Важнейшей составляющей эффективности дельфинов является его локационная система, которая по своим тактико-техническим характеристикам намного превосходит нынешние акустические гидролокаторы. Он способен обнаруживать и различать неживой объект от живого существа не только по форме и размеру, но и по внутреннему его строению. Полученную информацию дельфин обрабатывает мгновенно и передает при помощи сонара на расстояние до трех километров. Этот же сонар является и природным оружием – им дельфин может глушить рыбу, обороняться от акул и даже паразитировать боевого пловца.

Большое значение исследованию биолокатора дельфина придавалось и в СССР. В 1965 году в Севастополе, в Казачьей бухте, был основан Научно-исследовательский океанариум ВМФ СССР. Первым его руководителем стал капитан II ранга Виктор Калганов, герой войны, разведчик, один из основоположников прикладной гидробионики в СССР. Со временем был построен большой комплекс, занимавший площадь в 19 гектаров и включавший в себя большой гидротехнический комплекс, состоящий из трех вольеров, бассейнов, насосных и водозаборных станций, казарму, лабораторный корпус и много других вспомогательных зданий и сооружений. Для экспериментов отлавливали дельфинов вида афалина, также известных как большие или бутылконосые дельфины. Именно этот вид лучше других приспосабливается к жизни в неволе и поддается дрессировке.

После распада СССР Украина получила 60 боевых дельфинов. К моменту возвращения Севастополя и Крыма в состав России их оставалось не более шести. Учитывая высокую эффективность дельфина при обнаружении и классификации подводных объектов, необходимо восстанавливать

утраченные позиции по изучению биолокатора дельфина и более тесно взаимодействовать с академической наукой, у которой еще сохранились богатые наработки в этой области. Современные знания об основных механизмах работы эхолокационной системы этих животных остаются еще далеко не полными. Работы в этом направлении, безусловно, расширяют наши представления о функциональных особенностях природных биосонаров и дают возможность глубже проникнуть в существо проблемы.

Среди множества задач, решаемых дельфином в естественной среде обитания, локационное обнаружение подвижных целей и оценка их динамических характеристик являются весьма важными как для адекватного построения поведения животного, так и расчета траектории собственного движения при преследовании и захвате добычи. Данные о степени подвижности лоцируемых дельфином гидроакустических объектов и характере их перемещения в пространстве служат дельфину дополнительной информацией для их дифференцирования при обнаружении. До настоящего времени вопрос об оценке дельфином скоростей подвижных целей не подвергался экспериментальному анализу, поскольку основное внимание исследователей было направлено на изучение разрешающих способностей эхолокатора и механизмов эхолокационного распознавания неподвижных предметов [1, 2, 4].

Задачей настоящей работы было исследование чувствительности эхолокационной системы дельфина к скорости движения цели и определение вероятностных характеристик различения целей, движущихся с различными скоростями.

Материалы и методы

В основу методики проведения экспериментов было положено условно-рефлекторное обучение животного распознаванию двух геометрически и структурно тождественных целей (мишеней), отличающихся лишь своими динамическими свойствами. Задача распознавания сводилась к пространственному выбору дельфином движущейся цели на фоне неподвижной. Необходимость точной отработки заданной скорости при каждом ее предъявлении животному и необходимость изменения в процессе проведения опыта расстояния между исходной позицией животного и мишенью потребовали разработки и изготовления специ-

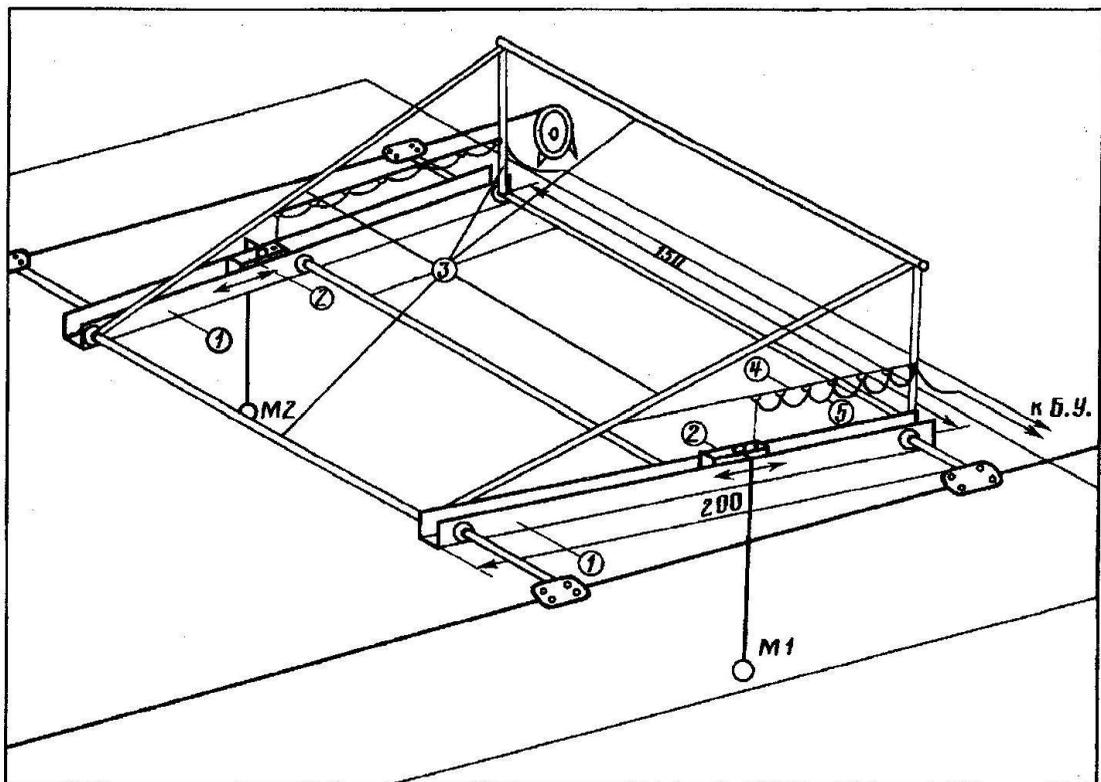
альной установки, которая затем монтировалась на вольере. Основой конструкции (рис. 1) являются направляющие рельсы, изготовленные из дюралюминия (1), в которых перемещаются под действием приводов тележки, выполненные из оргстекла (2).

С помощью дюралюминиевых труб (3) и оттяжек (4), выполненных из стального троса, обеспечивается необходимая жесткость конструкции. По проволочным направляющим (5) перемещаются кольца, в которых закреплены кабели питания тележек. Конструкция выполнена разборной. Размер её $205 \times 150 \times 100$ см. Масса не более 16 кг.

Устройство и работа составных частей. Тележка продольного перемещения мишени приводится в движение коллекторным электродвигателем постоянного тока типа ПД 0,75-8, который характеризуется следующими параметрами: напряжение питания – 27 В; номинальная скорость вращения – 2000 об/мин; мощность на валу – 8,0 Вт; потребляемая мощность – 19,0 Вт; размеры корпуса: длина – 72, диаметр – 30 мм; масса – 140 г.

Тележка получает вращающий момент на обе оси (переднюю и заднюю) с помощью резиновых ремешков. Для увеличения сцепления колес с поверхностью направляющих рельсов колеса снабжены резиновыми шинами. Размер тележки – $140 \times 80 \times 60$ мм. Диаметр колес – 50 мм. Электродвигатель получает питание по кабелю, подвешенному на стальной проволоке. Напряжение питания может изменяться с помощью органов регулировки, размещенных в блоке управления, от 2 до 28 В. При изменении питающего напряжения пропорционально меняется и скорость перемещения тележки. К тележке на дюралюминиевой штанге прикреплен на резьбе мишень.

Мишени представляли собой два отражателя шаровой формы диаметром 40 мм, выполненные из оргстекла. При таком выборе геометрии объектов лоцирования обеспечивается независимость энергии отраженного сигнала от угла облучения и точное знание акустических свойств мишеней, для которых имеется точное решение задачи дифракции [9]. Для



1 – направляющие рельсы; 2 – подвижные тележки; 3 – дюралюминиевые трубы, укрепляющие конструкцию; 4 – оттяжки из стального троса; 5 – проволочные направляющие, в кольцах которых закреплены кабели питания тележки; М1, М2 – подвижные мишени; БУ – блок управления

Рисунок 1 – Установка для исследования разрешающих способностей сонара афалины по измерению скорости подвижной цели

устранения погрешностей, связанных с отклонением мишени от вертикального положения при повышенных скоростях движения, а также вибраций, диаметр штанги, на которой крепится мишень, выбран равным 15 мм. Штанга изготовлена из дюралюминиевой трубки. Органам управления продольного перемещения мишени, расположенными в блоке управления, можно изменять направление движения мишеней (приближение, удаление). Блок управления собран в корпусе размером $300 \times 200 \times 110$ мм. Электроприводы, приводящие в движение мишени с заданной скоростью ($0 \div 13 \pm 0.2$ см/с), питаются от стабилизированного источника. Установка скорости движения мишени и ее контроль осуществляются по величине напряжения, считанного со шкалы вольтметра блока управления.

Пространственная неопределенность подвижной цели создавалась с помощью методики Т-образного лабиринта. Для этого вольер разделяли сетью на две зоны так, что в каждой из них находилась одна из мишеней. В процессе эксперимента экспериментатором задавалась зона нахождения подвижной цели путем переключения каналов управления параметрами цели в блоке управления. Последовательность выбора зон была равновероятной. Таким образом, у дельфина отсутствовала априорная информация о пространственном положении движущегося объекта и для его обнаружения необходимо было оценивать параметр скорости каждого из отражателей посредством активного зондирования. В исходной позиции мишени, разнесенные между собой на расстояние 1.5 м, располагались на расстоянии 15 м от стартовой позиции животного, что обеспечивало надежное пространственное разрешение целей дельфином со стартовой позиции. Подвижная цель перемещалась в радиальном направлении по отношению к стартовой позиции дельфина, т. е. приближалась или удалялась. В этом случае динамика движения цели определяется производной расстояния первого порядка, т. е. радиальной скоростью.

Результаты и обсуждение

Процедура выполнения экспериментов по восприятию дельфином подвижной цели была разбита на два этапа. На первом этапе осуществлялось обучение дельфина локационному обнаружению движущейся мишени. Процесс обучения заключался

в формировании условно-рефлекторной реакции на движущуюся цель. Для ускорения «сходимости» процесса обучения движущаяся мишень имела только одно значение скорости, равное $V = 3,5$ см/с. В каждом испытании от дельфина требовалось со стартовой позиции обнаружить движущуюся цель и выполнить подход в соответствующую зону вольера. Правильные решения, т. е. подходы в сторону движущейся цели подкреплялись рыбой. Для формирования устойчивой условно-рефлекторной связи потребовалась обучающая последовательность объемом из 106 предъявлений. Контрольный эксперимент, выполненный в конце процесса обучения, показал высокую надежность условно-рефлекторной реакции дельфина: вероятность правильных решений $P_{np} = 0.95$, а частота ложных тревог (уход дельфина со старта при неподвижных мишенях) не превышала $P_{tm} < 0.01$.

Задача следующего этапа экспериментов состояла в исследовании влияния скорости движения эхолокационной цели на эффективность ее обнаружения дельфином. В этих экспериментах скорость движущейся мишени квантовалась в диапазоне $V = 0 \div 13$ см/с. Максимальное значение скорости $V = 13$ см/с ограничивалось техническими возможностями используемой установки. Вероятность любого значения скорости в этом диапазоне была равной. Шаг приращения скорости составил 0.2 см/с. Как и в экспериментах по обучению, от дельфина требовалось в результате локационного зондирования обнаружить движущуюся мишень и выполнить подход в зону ее нахождения. Статистически объем этого эксперимента состоял из 846 предъявлений для каждого из дискретных значений скорости движения цели.

Как показали исследования, вероятность обнаружения является возрастающей функцией параметра скорости мишени в диапазоне $V = 1.8 \div 3.2$ см/с (рис. 2). С уменьшением скорости движения цели эффективность его обнаружения соответственно падает. Значение скорости $V = 2.6$ см/с, при которой эффективность обнаружения движущейся цели равна 75%, можно считать пороговой при локационном восприятии дельфином подвижной эхолокационной цели.

Эхолокационная система морских млекопитающих, как и любая локационная система, использует явление излучения и отражения сигнала для

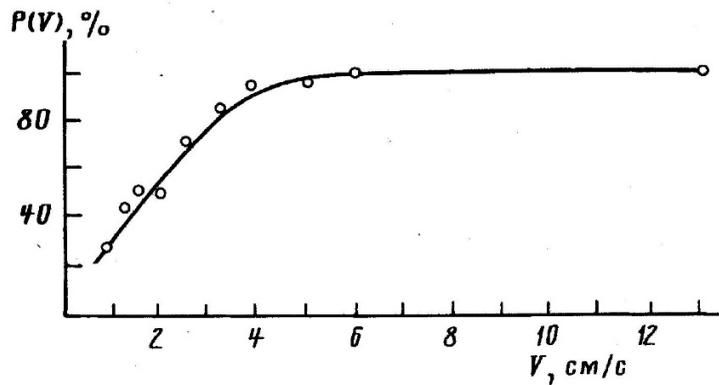


Рисунок 2 – Зависимость вероятности локационного обнаружения дельфином подвижной цели от скорости движения

обнаружения и измерения координат цели, а также для измерения параметров движения. К параметрам движения объектов по отношению к системе локации в первую очередь относится скорость. Скорость движения цели V_u определяется через её составляющие: радиальную V_p направленную по линии локационная система – цель, и тангенциальную V_T по следующей формуле $V_u = \sqrt{V_p^2 + V_T^2}$ [6].

Какие механизмы реализуются в деятельности живых сонаров при измерении параметров движения? Для того чтобы ответить на этот вопрос, очевидно, необходимо проанализировать возможность применимости уже известных в локации механизмов измерения скорости движения к живым сонарам. В настоящей работе для исключения возможного влияния производных расстояния различного порядка на результаты экспериментов была выбрана радиальная траектория перемещения подвижной цели относительно системы локации, т. е. цель приближалась или удалялась по линии локационная система-цель. В этих условиях происходит измерение лишь радиальной составляющей линейной скорости. Измерение радиальной составляющей скорости движения основано на использовании эффекта Доплера [6]. Как известно, эффект Доплера – физический эффект, сущность которого состоит в том, что при относительном движении источника и приемника звука частота излучаемой волны в системе отсчета, связанной приемником, изменяется. Это изменение частоты пропорционально скорости взаимного перемещения источника и приемника. Измеряя сдвиг частоты, принятой по отношению к частоте излученной, можно определить скорость движения цели. Для определения радиальной составляющей скорости движения цели следует измерить доплеровский

частотный сдвиг сигнала [6]:

$$V_p = \frac{F_d c}{2F_{изл}}$$

где F_d – доплеровский частотный сдвиг;

c – скорость звука в среде;

$F_{изл}$ – частота излученного зондирующего сигнала.

Для летучих мышей показано, что они могут эффективно использовать доплеровский режим работы. Для летучих мышей параметры, определяющие F_d таковы: $V_p = 5$ м/с, $F_{изл} = 81$ кГц, $c = 340$ м/с для воздуха. При этом $F_d = 2.38$ кГц. Кроме того, характеристики слуховой системы таковы, что они обеспечивают значительное понижение порогов (на 20–30 дБ) на частоте 83–83.5 кГц по сравнению с близлежащими частотами. Животное меняет частоту зондирующего сигнала в зависимости от того, находится он на месте или летит. У сидящего животного частота оказывается на 2–3 кГц выше, чем у летящего. В том и другом случае оно стремится получать отраженный сигнал одной и той же частоты. В полёте частота отраженного сигнала повышается за счет доплеровских приращений, и для сокращения ее величины в определенных пределах летучие мыши снижают частоту зондирующего сигнала пропорционально скорости полета [3]. Для летучих мышей показано, что они могут эффективно функционировать как в доплеровском, так и в импульсном режиме, т. е. по отношению к техническим системам представляют собой интересную комбинацию обоих режимов, превосходящую современные РЛС по многим параметрам [5]. Локационные сигналы летучих мышей представляют собой серию импульсов со средней длительностью 50 мс, частотой повторения

3-5 имп/с. При этом импульсы обладают специфической структурой, имеющей длительную часть с постоянной частотой заполнения или с незначительной частотной модуляцией [5]. Преимущество доплеровского лоатора над импульсным заключается в обеспечении лучшего различения по скорости движущейся цели на фоне подвижной.

Доказательства применения дельфинами доплеровских приращений частоты при измерении скорости объектов пока отсутствуют. Отсутствие в литературе экспериментальных данных о чувствительности эхолокационной системы к скорости движения цели дает нам возможность сослаться лишь на теоретические предположения и математические расчеты, произведенные в ряде работ [8 -10], в которых авторы рассматривали возможность участия доплеровского эффекта в определении дельфином скорости движения как одного из механизмов, обеспечивающих измерение скорости. Так, в работе [4] приводится теоретический, расчет разрешения по скорости с использованием доплеровского фактора и функции неопределенности. Величина разрешения для высокочастотной составляющей локационного сигнала оказалась равной 30 м/с, а для низкочастотной – 20 м/с. Такие большие величины говорят о недостаточной величине расчетной разрешающей способности дельфина по скорости.

В работе [3] высказывается предположение о возможности применения дельфином эффекта Доплера для восприятия и оценки скорости движения. При этом необходимым условием для этого авторы считают применение в целях локации высокочастотных тональных сигналов достаточной длительности и способность приемной системы проводить тонкий частотный анализ отраженных эхосигналов. Например, у морской свиньи (*Phocaena phocaena*), слуховая система которой имеет наименьший дифференциальный порог по частоте [7], потенциальная точность измерения скорости может составлять 1 м/с. При этом её локационные сигналы с частотой 140–150 кГц должны иметь длительность не менее 5 мс, что намного больше длительностей зарегистрированных у дельфинов сигналов.

По данным наших экспериментов дельфин способен различать скорость движения мишени 2,6 см/с с вероятностью 75% а скорости, превышающие 3,2 см/с различаются со 100%-ной вероятностью. Следует полагать, что дельфин при измерении ско-

рости не использует доплеровский сдвиг частоты, поскольку длительность локационного сигнала составляет доли миллисекунды, а 1 относительные скорости дельфина и окружающих его объектов намного меньше скорости звука в воде. Если рассчитать величину доплеровского сдвига для предельных скоростей, наблюдаемых у дельфина при свободном плавании, то для частоты 100 кГц, близкой к максимальной по энергии частоте зондирующего импульса получим величину равную 700 Гц. Если сопоставить эту величину с дифференциальным порогом слуха дельфина по частоте для 90 кГц (1038 Гц) то результат получится не в пользу возможности применения дельфином такого способа определения скорости подвижного объекта.

В табл.1 приведены расчетные данные, демонстрирующие потенциальные возможности сонара дельфина по определению скорости подвижной цели для минимальных значений дифференциального порога по частоте, рассчитанные по формуле:

$$V_{\text{объекта}} = \frac{F_{\delta} c}{2F_{\text{изл}}}$$

Таблица 1

$F_{\text{осн}}, \text{ кГц}$	0,9	2	5	9	20	50	90
$\Delta F, \text{ Гц}$	7,9	6,1	14,7	31,7	87	532	1038
$V_{\text{объекта}}, \text{ см/с}$	658	228	211	267	326	552	865

Приведенные данные свидетельствуют о возможностях измерения сонаром дельфина лишь больших скоростей движения цели.

Возможно, что дельфин при оценке скорости использует не один зондирующий импульс, а их последовательность. В эхолокационных системах импульсного возникают специфические особенности проявления эффекта Доплера. Зондирующий сигнал в этих системах имеет широкий спектр, и при отражении от движущейся цели смещение частоты приобретает каждая гармоническая составляющая спектра [6].

$$F_{kv} = F_k \left(1 + \frac{2V_p}{c} \right)$$

Спектр сигнала, отраженного от движущейся цели, расширяется и сдвигается в сторону больших частот. Выделение движущейся цели осуществляется по изменению периода следования отраженных импульсов, причем эта величина, имеющая порядок сотых и тысячных долей микросекунды,

регистрируется с помощью фазометрического метода. Если в каждом периоде фиксировать разность фаз между излучаемыми колебаниями и сигналом, отраженным от неподвижной цели в момент его прихода, то эта разность фаз от периода к периоду будет оставаться неизменной. Для сигналов движущихся целей эта разность фаз от периода к периоду будет изменяться вследствие изменения времени запаздывания сигнала на величину ΔT_n , т. е. пропорционально скорости цели. Использует ли дельфин подобный механизм для измерения скорости движения цели? Ответить на этот вопрос в настоящее время не представляется возможным.

Можно лишь утверждать, что характер структуры излучаемых дельфинами одиночных зондирующих сигналов, а также полученные в настоящей работе абсолютные значения величины разрешающей способности по скорости, свидетельствующие о возможности измерения очень малых скоростей движения цели, ставят под сомнение возможность использования дельфинами измерения частотного сдвига отраженного эха, как способа оценки радиальной скорости подвижной цели.

Необходимо отметить, что сигналы, излучаемые дельфином, являются широкополосными и сложными, поэтому рассмотрение влияния эффекта Доплера на сигнал как аддитивный сдвиг является не совсем корректным. Более адекватной моделью является сжатие спектра излучаемого сигнала и применение мощной теории теоретико-групповых представлений и теории инвариантов.

Изучение механизмов измерения скорости дельфином, несомненно, требует дальнейшего развития и представляется весьма перспективным как в теоретическом, так и в прикладном отношении.

Список литературы

1. Айрапетьянц Э. Ш., Константинов А. И. Эхолокация в природе. – Л.: Наука, 1974. – 511 с.
2. Белькович В. М., Дубровский Н. А. Сенсорные основы ориентации китообразных. – Л.: Наука, 1976. – 203 с.
3. Гриффитс Д. У. К теории сонарных систем применительно к биологическим организациям // Кибернетические проблемы бионики. – 1971. – Вып. 1. – С. 321-337.
4. Черноморская афалина. *Tursiops truncatus ponticus*. Морфология. Физиология. Акустика. Гидродинамика / Под ред. В. Е. Соколова, Е. В. Романенко. – М., 1997.
5. Константинов А. И., Макаров А. К., Соколов Б. В., Липманова Е. Э. Доплеровские эхолокационные системы животных // Проблемы нейрофизиологии: Нервная система. – 1978. – Вып. 20. – С. 46–58.
6. Радиолокационные устройства. Теория и принципы построения / Под ред. Григорина-Рябова В. В. – М.: Сов. радио, 1970. – С. 680.
7. Сухорученко М. Н. Различение частоты у дельфинов // Физиол. журн. СССР. – 1973. – № 8. – С. 1205-1210.
8. Cahlander D. A. Echolocation with wideband waveforms bat sonar signals // Techn. Rep. Lincoln Lab. MIT. – 1964. – No. 271.
9. Hikling R. Analysis of echoes from a solid elastic sphere in water // J. Acoust. Amer. – 1962. – V. 34. – No. 10. – P. 1582-1591.
10. Poulter T. C. The use of active sonar by the California Sea Lion // J. Audit. Res. – 1966. – No. 6. – P. 165-173.

Статья поступила в редакцию 20 августа 2018 г.
Принята к публикации 27 сентября 2018 г.