

УДК 681.883

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

АДАПТАЦИЯ КИНЕМАТИКИ ДЕЛЬФИНОВ (*TURSIOPS TRUNCATUS*) ПРИ ПОИСКЕ И ОБНАРУЖЕНИИ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ВАРИАТИВНОСТИ ИХ КООРДИНАТ *

АННОТАЦИЯ

Исследовалась кинематика дельфинов при локационном поиске объектов, находящихся в толще воды, на дне и скрытых морскими осадками. Разработана структурная схема и математическая модель сложности поставленных задач. Показана высокая вероятность обнаружения объектов независимо от их местоположения по сравнению с техническими гидролокационными системами.

Ключевые слова: дельфин; локация; обнаружение; кинематика; адаптация.

**ZAITSEVA K. A.,
KOROLEV V. I.,
AKHI A. V.,
KRIVCHENKO A. I.,
BUTYRSKIY E. YU.**

DOLPHIN`S (*TURSIOPS TRUNCATUS*) KINEMATICS ADAPTATION DURING LOCATION SEARCH AND DETECTION OF OBJECTS WITH VARIABILITY OF THEIR COORDINATES

ABSTRACT

We studied dolphin`s kinematics during location search and detection of the objects in water column, at the bottom and hidden by marine sediments. We developed structural schema and mathematical model for task complexity. Results show high probability of object detection regardless of its location as compared to technical sonar systems.

Keywords: dolphin; location; detection; kinematic; adaptation.

Введение

В процессе биологической эволюции живые организмы, приспособляясь к окружающей среде, смогли оптимально, в техническом смысле, разрешить проблемы аналогичные стоящим перед современной техникой. Интерес специалистов, занимающихся решением технических проблем, к тому, каким образом решены стоящие перед ними проблемы в живой природе, не ослабевает.

Одним из совершенных приспособлений в живой природе является эхолокация. Наиболее развитыми механизмами эхолокации обладают дельфины. При помощи эхолокатора эти животные решают комплекс жизненно важных задач. Эффективное функционирование эхолокационной системы в водной среде обеспечивается существенными морфо-функциональными перестройками в системе приёма и излучения акустических сигналов.

* Работа выполнена в Институте эволюционной физиологии и био-химии им. И.М. Сеченова РАН в рамках Государственного задания. Тема ПФНИГ АН-63. Per. АААА-А18-1180130902245-6

Наиболее качественные исследования последних лет существенно расширили сведения об основных характеристиках работы эхолотатора и показали, что эхолокационная система дельфина может служить полезным живым прототипом технических сонарных систем, которые потребуются человеку при широком освоении Мирового океана [1,2].

Однако целая группа важных вопросов экспериментального изучения и моделирования эхолотатора дельфина осталась вне поля зрения исследователей как в отечественной науке, так и за рубежом. В настоящее время имеются довольно ограниченные сведения по локационному поиску и обнаружению дельфинами объектов, местоположение которых может иметь различные координаты в объеме гидросферы (поверхность, толщина воды, дно) [3, 4, 5, 6]. Эта проблема важна как с теоретической, так и с практической точки зрения, т.к. тесно примыкает к проблеме исследования морского дна, обнаружения погруженных в толщу морских осадков предметов, поиске таких объектов, как «черные ящики» летательных аппаратов, затонувших ценных малогабаритных грузов, донных мин, торпед, емкостей с опасными веществами и т.п. Она может представлять интерес и при поисковых нефтегазовых работах, а также при разработке систем контроля за степенью загрязненности донных осадков. Одной из сложных гидролокационных задач, возникающих при поиске погруженных в толщу донных осадков объектов, на мелководье в прибрежной зоне является задача определения их координат [7]. Исследование свойств морских объектов по характеристикам акустических сиг-

налов экономично, т. к. при этом можно судить о свойствах морского дна и заиленных предметов без непосредственного технического измерения.

Структурная схема уровней моделей и ресурсов принятия решений

В настоящей работе была поставлена задача рассмотрения многомерности поиска и обнаружения подводных объектов дельфинами в зависимости от вариативности их пространственных координат. Была разработана структурная схема моделей сложности решаемых задач, которая требовала экспериментального подтверждения на животных (рис. 1).

Обозначения структуры:

q – отношение сигнал помеха (С/П)

q_1 – отношение С/П (помехоустойчивость)

при поиске в толще воды;

q_2 – отношение С/П при поиске (поверхность-толща воды);

q_3 – отношение С/П при поиске (поверхность-толща воды-дно);

$$q_2 = K_\alpha q_1, \quad q_3 = K_\beta q_2, \quad q_3 = K_\beta K_\alpha q_1,$$

K_α, K_β – факторы уровней сложности принятия решений дельфином при наблюдении.

Простая математическая модель поиска-обнаружения, представленная на рис.2, имеет выражение

$$P_2 = P_1 \cdot P(T),$$

где $\tau = \frac{2r}{c}, T = n\tau, P(T) = F(q, T), P_1 = \frac{\alpha}{L}$.

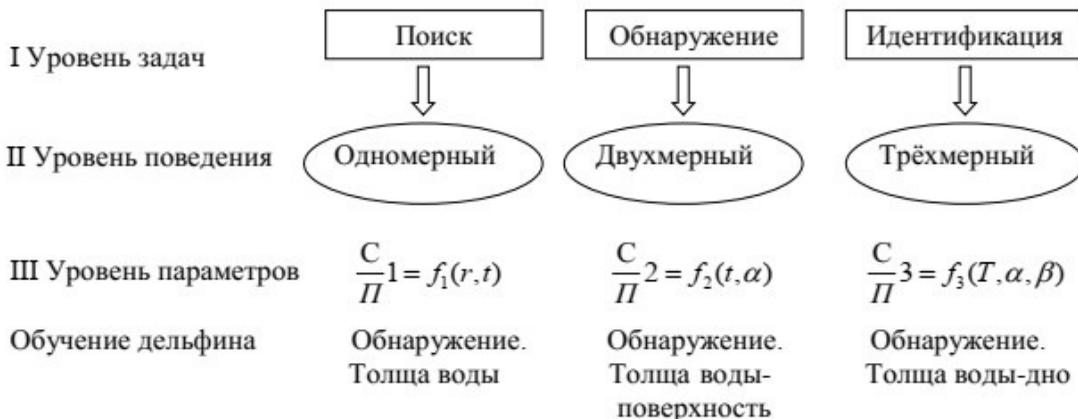


Рисунок 1 – Структурная схема уровней моделей

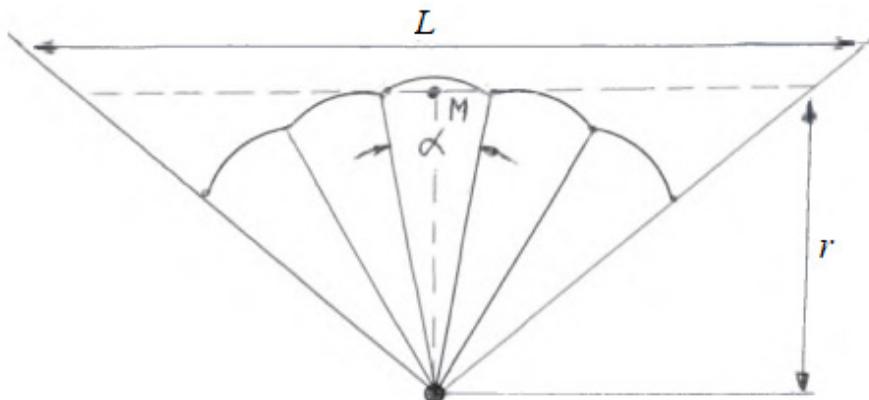


Рисунок 2 – Пространственный спектр наблюдения L объекта–мишени M

Кинематическая схема поведения дельфина при адаптивном наблюдении при их различном пространственном положении

В соответствии со структурной схемой уровень поведения дельфина в зависимости от решаемой задачи

- одномерный (поиск);
- двумерный (обнаружение);
- трехмерный (идентификация).

Кинематическая схема одномерного поиска

представлена на рис. 3.

Кинематическая схема двумерного обнаружения дельфином мишени M в вертикальной плоскости представлена на рис. 4. Двухмерность поиска обеспечивается шаговым вертикальным сканированием дельфина лучами $XH_1 \div XH_4$.

Кинематическая схема трёхмерного обнаружения донной и заиленной мишени M_3 и мишени находящейся на грунте $M_{дн}$ представлена на рис. 5.

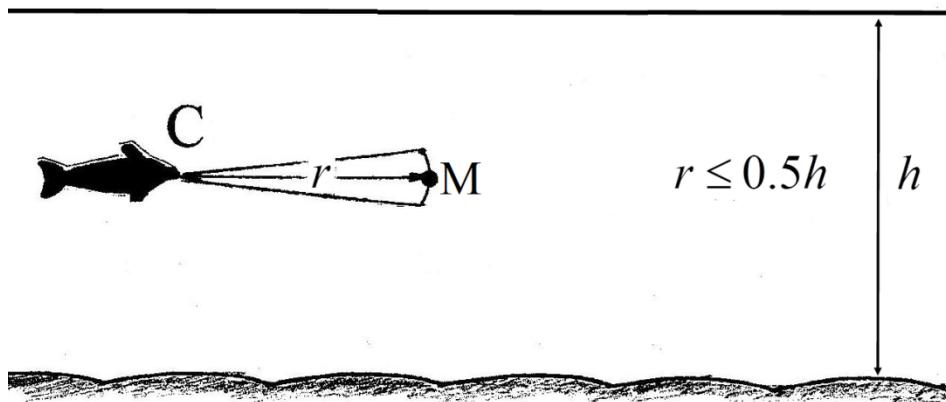


Рисунок 3 – Одномерный поиск и обнаружение мишени M дельфином. C – стартовая позиция дельфина, r – расстояние от старта до мишени, h – глубина акватории

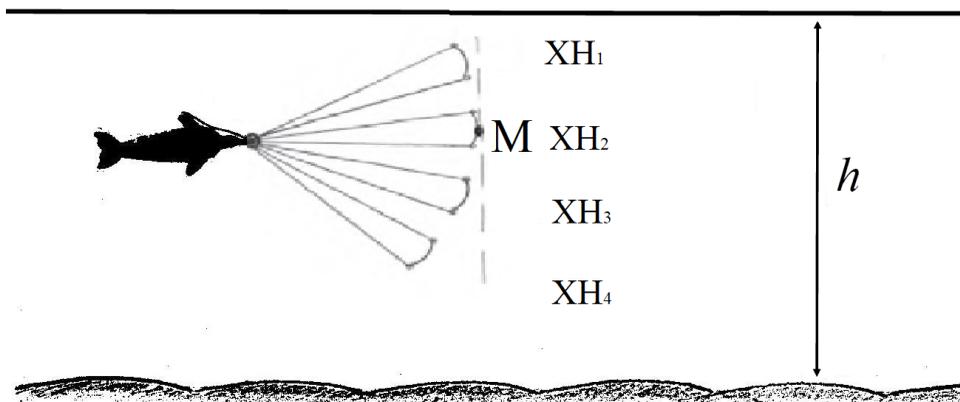


Рисунок 4 – Вертикальный поиск и обнаружение мишени M в объёме гидросферы. XH_{1-4} – характеристика направленности дельфина

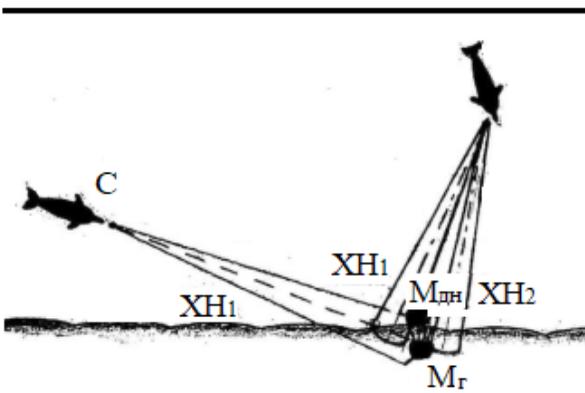


Рисунок 5 – Поиск и обнаружение донной и заиленной мишеней

$M_{дн}$ – мишень на дне, $M_г$ – мишень в грунте, XH_{1-2} характеристики направленности

Донный объект обнаруживается дельфином на дистанции меньшей благоприятного расстояния (рис. 5). При этом дельфин сближается с мишенью и совершает сложное кинематическое маневрирование над объектом, чтобы не потерять контакт с ним и увеличивает время локации.

Вероятностные оценки адаптивного наблюдения дельфина

Наблюдение дельфином объекта при поиске-обнаружении-идентификации производится в условиях сильных реверберационных помех. При обнаружении в толще воды помехой является объемная реверберация. Стандартная мишень обнаруживается животным с вероятностью $P = 0,9$ для отношения сигнал-помеха $q = 7 \div 8$. Для суммарной полной условной вероятности $P(X)$, где X – векторный аргумент размерности матрицы наблюдения M_{ij} . Полная вероятность поверхностного обнаружения имеет вид

$$P(x)^j = \sum_i P^j(x)P\left(\frac{x}{H_i}\right),$$

где $P^j(x)$ – размерность наблюдения этапа j ,

$P\left(\frac{x}{H_i}\right)$ – условная вероятность i -го уровня.

Уравнение полной вероятности, учитывающее эффективность наблюдения всего вертикального сектора, $C = U(XH_1, XH_2, XH_3, XH_4)$.

$$P(x) = P^1(x)P\left(\frac{x}{H_1}\right) + P^2(x)P\left(\frac{x}{H_2}\right) + P^3(x)P\left(\frac{x}{H_3}\right) + P^4(x)P\left(\frac{x}{H_4}\right)$$

где $P\left(\frac{x}{H_i}\right) = 0,5$ – поверхностная реверберация;

$P\left(\frac{x}{H_4}\right) = 0,25$ – донная реверберация;

$P\left(\frac{x}{H_2}\right), P\left(\frac{x}{H_3}\right) = 1$ – объемная реверберация;

$P^j(x) = 0,25$ – априорные вероятности наблюдения каждой ХН;

$$P_{пов}(x) = 0,25 \cdot 0,5 + 0,25 \cdot 1 + 0,25 \cdot 1 + 0,25 \cdot 0,25 = 0,6875 \approx 0,7.$$

Для этапа наблюдения идентификации $j = 4$ формула полной вероятности имеет следующий вид:

$$P(x) = P^4(x) = 0,25 \cdot 0,25 = 0,0625.$$

Дельфин мишень в грунте не видит, он переходит от линейного вида плавания на сложное кинематическое маневрирование, выполняя пеленгование ХН1 и ХН2 последовательно. Время пеленгования увеличивается до 1 минуты. Формула полной вероятности:

$$P_{дно}(x) = 0,5 \cdot 0,9 + 0,5 \cdot 0,7 = 0,8,$$

где $P\left(\frac{x}{H_i}\right) = 0,9$ – идентификация грунта;

$P\left(\frac{x}{H_2}\right) = 0,7$ – идентификация мишени.

Теоретические разработки закреплены экспериментами с дельфинами. В вольере морской бухты проведены опыты по исследованию кинематических моделей поведения животных при решении задач трёх уровней сложности, проверке математических моделей наблюдения (обнаружения, идентификации).

Опыты проводили на двух дельфинах-афалинах в свайно-сетевом вольере размером $10 \times 10 \times 6$ м, расположенном в морской бухте. Применялась методика двигательного-пищевых условных рефлексов. Положительным условным раздражителем служил полый латунный цилиндр высотой 120 мм, в диаметре 100 мм, с толщиной стенки 5 мм. Отрицательным раздражителем был стальной цилиндр тех же размеров. Мишени окрашивали цветом морской волны. Процедура эксперимента была такова. По сигналу 5 кГц, излучаемому в воду, дель-

фин был обучен помещать роstrum в специальное устройство (станок) таким образом, что зажимал деревянную конструкцию, имеющую выдолбленную в форме нижней челюсти выемку, и находился в таком положении несколько минут. Пространственное положение дельфина ориентировано было таким образом, что его тело было обращено хвостовым плавником внутрь вольера, что позволяло исключить зрительное и акустическое наблюдение животного за манипуляциями по установке мишени водолазом. После установки мишени по акустическому сигналу дельфин покидал станок и начинал поиск мишени. Показателем правильной реакции служил удар роstrumом по поплавку из пенопласта, расположенному в определенном месте вольера. Местоположение мишени менялось в случайном порядке. Морские осадки представляли собой смесь песка и ракушечника. Глубина погружения мишени в морское дно составляла 10 см. Предварительно дельфина обучали обнаруживать мишень в толще воды на глубине 1÷3 м и 5÷10 см от поверхности воды. Для идентификации мишеней было проведено 100 предъявлений на каждую ситуацию.

На рис. 6 представлены результаты опытов на дельфинах, теоретически рассчитанные данные и возможности технического локатора.

Результаты свидетельствуют о том, что эффективность обнаружения и различения объектов дель-

фином совпадают с теоретической оценкой полной условной вероятности. У технического локатора высокие результаты получены только при обнаружении объектов у поверхности и в толще воды.

Сплошная линия – поведенческая вероятность обнаружения дельфином.

Штрих-пунктирная линия – теоретические вероятностные оценки эффективности распознавания объекта.

Пунктирная линия – техническим локатором.

Современная штатная гидроакустическая техника обнаружения взрывоопасных морских объектов, находящихся на поверхности дна или скрытых морскими осадками, не эффективна (морской тральщик проект 226МЭ). Опыт минных войн (Египетско-Израильская война 1973 года в Суэцком канале, Средиземном и Красном морях; в 1985 году между Ираном и Ираком; Сомалийское пиратство с минными поставками в районе Аденского залива и Африканского рога в 2012÷2013 годах) показал необходимость её усовершенствования.

Выводы

1. Полученные на дельфинах результаты свидетельствуют о том, что способность к обнаружению донных объектов и принципы ее работы у биологических и технических локационных систем оказалась разной.

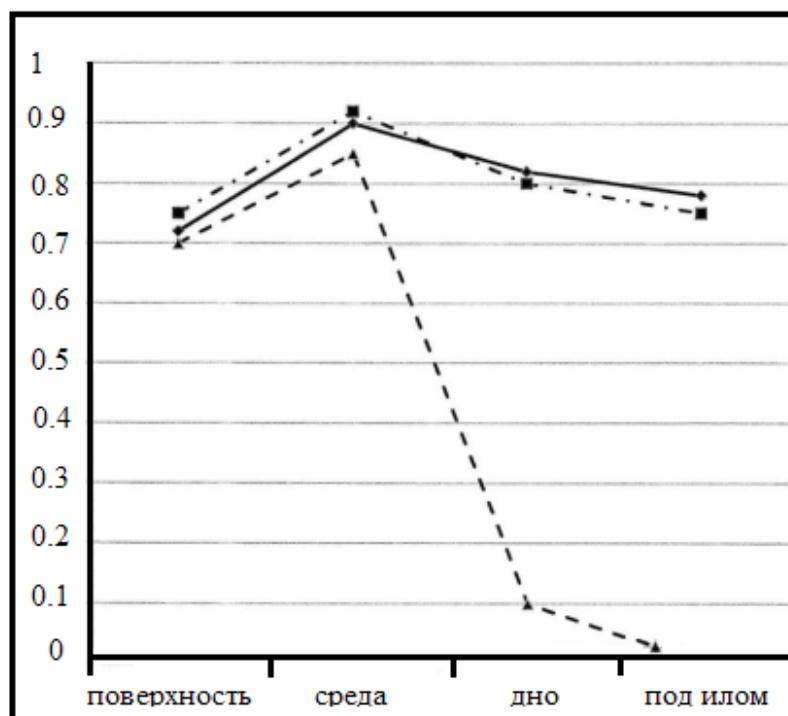


Рисунок 6 – Вероятностные оценки эффективности обнаружения объектов

2. Технический локатор при изменении обстановки не способен адаптивно менять параметры своей системы, тогда как дельфин может оперативно изменять траекторию движения, переходя от простого к сложному, обеспечивая таким образом характеристиками направленности оптимальные условия для работы локатора.

3. В условиях сильных реверберационных помех дельфин при поиске-обнаружении-идентификации стандартной мишени обнаруживает ее с вероятностью $P = 0,9$ для отношения сигнал-помеха $q = 7 \div 8$.

4. При поиске в грунте дельфин мишень не видит, поэтому он переходит от линейного вида плавания на сложное кинематическое маневрирование, выполняя пеленгование ХН1 и ХН2 последовательно. Время пеленгования при этом увеличивается до 1 минуты.

5. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что эффективность обнаружения и различения объектов дельфином совпадают с теоретической оценкой полной условной вероятности. У технического локатора высокие результаты получены только при обнаружении объектов у поверхности и в толще воды.

Целью дальнейших исследований является поиск принципа и механизма работы живого сонара по обнаружению и распознаванию объектов, скрытых морскими осадками. В результате, бионический патент природы можно рекомендовать для проектируемых ГАС кораблей.

Список литературы

1. Черноморская афалина *Tursiops truncatus ponticus* / Под ред. акад. В. Е. Соколов. – М.: Изд-во «Наука». 1997. – 672 с.
2. Au W. W. L. Dolphin Acoustics and Echolocation // *Acoust. Bull., Inst. of Acoust.* – 1994. – V. 19. – № 4. – P. 19–26.
3. Martin S. W., Phillips M., Bauer E. J., Moore P. W., Houser D. S. Instrumenting free-swimming dolphins echolocating in open water // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 2005. – № 117(4). Pt. 1. – P. 2301–2307.
4. Dahl S. Target detection in coral sand by bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) // M. Sc. thesis. Biology Department. Institute of Physics, Chemistry and Biology. Linchiping University. Sweeden, 2007.
5. Au W. W. L., Martin S. W. Dynamics of biosonar signals of free swimming dolphins searching for bottom targets // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 2014. – 135. – P. 2206.
6. Зайцева К. А., Королев В. И., Кривченко А. И., Ахи А. В., Бутырский Е. Ю. Вероятность локационного обнаружения дельфином (*Tursiops truncatus*) подводных целей в зависимости от их пространственных координат // *Ж. эвол. биохим. физиол.* – 2018. – № 54(2). – С. 133–135.
7. Покровский Ю. О., Федосов В. П., Черниковская Г. Л. К вопросу измерения координат объектов, погруженных в осадки // *Известия ТРТУ.* – 2006. – № 9. – С. 3–9.

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2020 г.

Принята к публикации 24 марта 2020 г.

Ссылка для цитирования: Зайцева К. А., Королев В. И., Ахи А. В., Кривченко А. И., Бутырский Е. Ю. Адаптация кинематики дельфинов (*tursiops truncatus*) при поиске и обнаружении объектов в условиях вариативности их координат // *Национальная безопасность и стратегическое планирование.* 2020. № 1(29). С. 47-52. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2020-1-47-52>