

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭХОЛОКАЦИОННОГО АППАРАТА ДЕЛЬФИНА С ПОМОЩЬЮ РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Е. В. Романенко, В. Г. Янов, А. И. Акопиан

За последние годы радиотелеметрия получила широкое применение как в технических науках и промышленности, так и в области биологических исследований. Первые телеметрические системы при изучении животных были использованы с целью проследивания. Получение же информации о физиологических параметрах животных стало возможным лишь в последнее десятилетие в связи с развитием микроэлектронной техники.

Телеметрия может быть осуществлена двумя принципиально различными способами: посредством проводной связи между исследуемым объектом и исследовательской аппаратурой и путем беспроводной связи.

Первый способ является более простым, он преобладает при лабораторных исследованиях. Нередко, однако, применение проводной линии, соединяющей исследуемое животное с регистрирующей аппаратурой, приводит к довольно громоздким условиям наблюдения, особенно когда регистрируют те или иные процессы во время двигательной активности.

Беспроводную связь в большинстве случаев осуществляют с помощью радиоволн, реже используют акустическую связь и еще реже — оптическую. Наиболее совершенным и перспективным является способ радиотелеметрии. Он обеспечивает весьма широкие возможности, в частности, исследователь может получать данные наблюдений непосредственно по ходу эксперимента. Разумеется, с технической стороны этот путь достаточно сложен, особенно если учесть необходимость специальных мер по устранению помех и искажений информации, которые могут возникать в связи с введением радиоканала.

В области биоакустики телеметрия делает свои первые шаги. Существуют буквально единицы работ, в которых в той или иной мере применяется телеметрическая техника.

Основная причина того, что в биоакустике телеметрия пока еще не нашла широкого применения, заключается, по-видимому, в том, что биоакустическая информация является значительно более широкополосной, чем все другие виды биологической информации. Для передачи биоакустической информации требуется канал связи с пропускной способностью на 2—3 порядка более высокой, чем для передачи физиологической информации. По Шеннону (1963), пропускная способность канала связи определяется соотношением

$$C = F_k \cdot \log_2(1 + P_c/P_n) \text{ дв. ед./сек.},$$

где F_k — полоса пропускания канала связи; P_c — средняя мощность сигнала; P_n — средняя мощность помехи.

В большинстве случаев физиологическая информация (пульс, ЭКГ и др.) укладывается в полосу частот до 500 гц, тогда как биоакустическая информация значительно более широкополосна ($10 \div 100$ кгц).

По-видимому, раньше всего телеметрию стали применять при шумопеленгации рыбы (Maniva, 1960). Манива сообщает, что в Японии, используя систему автономных акустических буев, осуществляют контроль за миграцией некоторых рыб. Установка состоит из двух буев. В каждом бую смонтировано приемо-передающее устройство: гидрофон, усилитель, радиопередатчик и аккумуляторная батарея. Принятые гидрофоном звуки рыб усиливаются, модулируют радиочастоту в несколько десятков мгц и передаются в эфир. Прием сигналов осуществляют на стационарные приемные устройства.

Это скорее промысловое использование телеметрии, чем исследовательское.

Есть попытки применения телеметрии и в научных исследованиях по биоакустике.

Ивенс и Сазерланд (1964) использовали радиотелеметрию для регистрации звуков афалин непосредственно на голове дельфина. Они изучали информационное значение производимых дельфинами звуков в группе. Телеметрия помогла им определить очередность звучания дельфинов при обмене сигналами. Радиопередача информации с дельфина осуществлялась из воды в воздух. Несущая частота составляла 27 мгц. Возможности прибора были весьма ограничены, так как звукоприемником служил контактный микрофон низкого качества (узкий диапазон рабочих частот).

У Болдуина (Baldwin, 1965) кратко описан ЧМ-передатчик размером около 13 см, который закрепляли с помощью присоски на голове дельфина. Он передавал биоакустическую информацию по радио также из воды в воздух. Гидрофоном служила пьезокерамическая сфера, находившаяся в механическом контакте с тем участком тела дельфина, на котором изучался характер звуковых сигналов. Глубина, с которой еще была возможна радиосвязь, составляла в морской воде всего 30 см, в пресной воде — около 2,5 м.

Дельфины являются одним из наиболее интересных объектов исследования в биоакустическом плане. Их хорошо развитая система эхолокации и коммуникации привлекает к себе внимание многих ученых. Поэтому понятны попытки, неоднократно предпринимавшиеся к тому, чтобы изучить их биоакустические механизмы.

Недавно появилась работа Диркса и др. (Diercks, Trochta, Greenlaw, Evans, 1971), в которой осуществлена многоканальная регистрация эхолокационных сигналов дельфина непосредственно на голове с помощью системы гидрофонов с присосками. Отведение полезной информации от гидрофонов осуществляли с помощью проводной связи. Этот простейший вид телеметрии серьезно затруднял эксперимент, но тем не менее оказалось, что можно получить некоторое представление о форме эхолокационных импульсов непосредственно у источника.

Результаты, представленные в работе, весьма немногочисленны и не позволяют сделать сколько-нибудь существенные выводы о механизме локации. Тем не менее метод регистрации звуков непосредственно у источника представляется весьма перспективным.

В настоящей работе дано описание двухканальной радиотелеметрической системы для регистрации звуков непосредственно на голове дельфина, разработанной совместными усилиями лаборатории биоакустики ИЭМЭЖ и группы биоакустики Института эволюционной физиологии и биохимии им. Сеченова Академии наук СССР.

Разработанная радиотелеметрическая система включает в себя два миниатюрных пьезоэлектрических цилиндрических гидро-

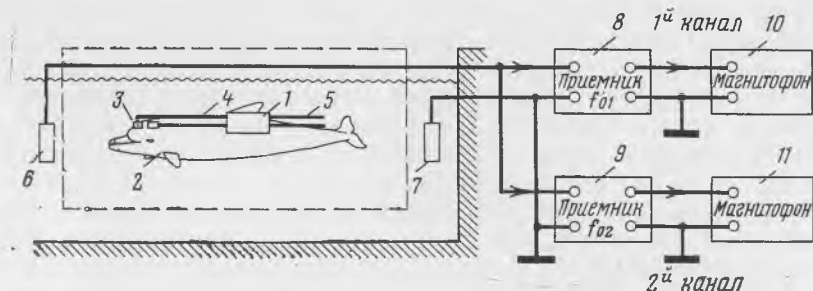
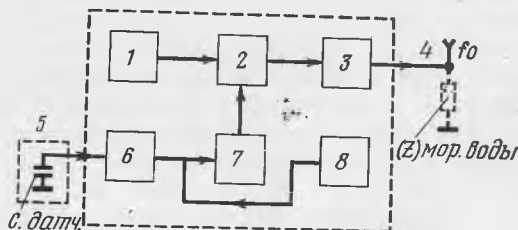


Рис. 1. Блок-схема проведения эксперимента

Рис. 2. Функциональная блок-схема канала автономного передатчика

1 — автогенератор; 2 — модулятор; 3 — усилитель мощности; 4 — излучающая антенна; 5 — гидрофон; 6 — предусилитель; 7 — усилитель; 8 — генератор сигнала калибровки



фона, два радиопередатчика, закрепляемых на дельфине и передающих полезную информацию, и приемных устройств, регистрирующих информацию. Передачу информации осуществляют по радиоканалу под водой на несущих частотах 1,55 и 1,87 мГц, амплитудно модулированных полезным сигналом. Полоса пропускания канала связи составляет 3,5—65 кГц. Разделение каналов частотное. Мощность каждого из передатчиков 30 мвт.

На рис. 1 показана схема эксперимента с применением описываемой радиотелеметрической системы. Радиопередатчики 1 в процессе эксперимента закреплены на спинном плавнике дельфина 2. Миниатюрные гидрофоны 3 располагаются на голове в области локационного аппарата и закрепляются с помощью присосок. Гидрофоны присоединены к передатчикам экранированными проводами 4. Две излучающие антенны 5 (в каждом канале своя антенна) в виде отрезков гибкого провода длиной 1,5 м при движении дельфина вытягиваются вдоль его тела. Свободные концы проводов-антенн оголены на участке 3÷5 см и находятся в электрическом контакте с водой. В контакте с водой находится

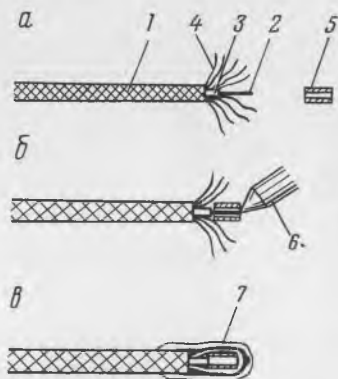


Рис. 5. Миниатюрный гидрофон

- 1 — экранированный провод;
- 2 — центральная жила;
- 3 — изоляция;
- 4 — экран;
- 5 — пьезоэлемент;
- 6 — паяльник;
- 7 — изоляция

также металлический корпус передатчика, являющийся вторым полюсом излучающей антенны.

Приемной антенной служат две металлические пластины 6 и 7, из которых одна 7 заземлена, а другая 6 присоединена ко входам двух радиоприемников 8 и 9 типа «Волна» с расширенными полосами по промежуточной частоте. Каждый из приемников настроен на свою несущую частоту. Выходы приемников подключены к ультразвуковым магнитофонам 10 и 11.

Телеметрическая система вполне надежно работала при свободном плавании дельфина в сетевой вольере размером $100 \times 3 \times 3$ м.

Функциональная блок-система передающей части одного канала телеметрической системы показана на рис. 2.

Несущая генерируется автогенератором 1, модулируется полезным сигналом в модуляторе 2 и после усиления по мощности (усилитель 3) излучается антенной типа «несимметричный диполь» 4 в морскую воду.

Полезная информация с миниатюрного гидрофона 6 поступает на предусилитель 7, суммируется с сигналом калибровки, поступающим с автогенератора 9, и после усиления 8 поступает на модулятор. Блок-схема другого канала аналогична. По существу используются два одинаковых и независимых передатчика с различными несущими частотами.

Калибровочный сигнал с частотой 568 гц в первом канале и 708 гц во втором составляет по величине 3% от максимально допустимого полезного сигнала и служит для контроля исправности системы и отсутствия перегрузок полезным сигналом (перемодуляции).

Принципиальная схема одного канала передатчика приведена на рис. 3. Питание автономной части системы осуществляется от

двух аккумуляторных батарей типа 7Д-01. Емкости батарей хватает на 1 час непрерывной работы.

На рис. 4 показана фотография передающей части (крышка снята).

Общий вес передатчиков вместе с гидрофонами в воздухе составляет 320 г.

В качестве звукоприемников в описываемой телеметрической аппаратуре использованы миниатюрные цилиндрические гидрофоны, конструкция одного из которых и схема монтажа показаны на рис. 5, а, б, в.

Чувствительный цилиндрический пьезоэлемент такого гидрофона из керамики ЦТС диаметром $2 \div 2,5$ мм монтируют непосредственно на конце тонкого экранированного провода без специального держателя. Экранированный провод (рис. 5, а) с наружным диаметром $1 \div 2$ мм разделяют на конце так, чтобы оголенная центральная жила 2 выступала на $7 \div 10$ мм, изоляция 3 — на $1 \div 2$ мм, а экран расплетают настолько, чтобы отдельные проволоочки 4 экрана имели длину $10 \div 12$ мм. После этого центральную жилу провода облуживают низкотемпературным припоем, чтобы ее диаметр увеличился до внутреннего диаметра пьезоцилиндра 5. Затем пьезоцилиндр надвигают (рис. 5, б) на центральную жилу до упора в изоляцию и выступающий конец центральной жилы нагревают жалом электропаяльника 6 настолько, чтобы внутренний серебряный электрод пьезоцилиндра припаялся к центральной жиле. Выступающий из пьезоцилиндра конец центральной жилы отрезают, а проволоочки расплетенного экрана загибают около пьезоцилиндра так, как показано на рис. 5, в; концы их сводят вместе и пропаивают паяльником.

Готовый гидрофон опускают в пробирку с расплавом воска и канифоли (в пропорции 1:1), который пропитывает конструкцию и заполняет все полости 7. Такой гидрофон прочен, хорошо гидроизолирован и экранирован от электрических помех. Прогревание пьезоцилиндра при монтаже практически не уменьшает его чувствительности, так как керамика ЦТС имеет высокотемпературную точку Кюри.

Размеры пьезоцилиндра: диаметр 2 мм, высота 2 мм. Чувствительность гидрофона около 0,1 мкв/бар.

В процессе пробного эксперимента гидрофоны укрепляли на голове дельфина с помощью двух миниатюрных присосок. Располагали их впереди дыхания по осевой линии черепа животного на расстоянии $8 \div 10$ см друг от друга.

С помощью описанной телеметрической системы была произведена запись эхолокационной активности дельфина на два ультразвуковых магнитофона типа МУЗ-М. При этом дельфин свободно плавал в вольере, и его акустическая активность стимулировалась подкормом рыбой.

Записанные по двум каналам сигналы были сфотографированы на киноплёнку с помощью шлейфового осциллографа типа

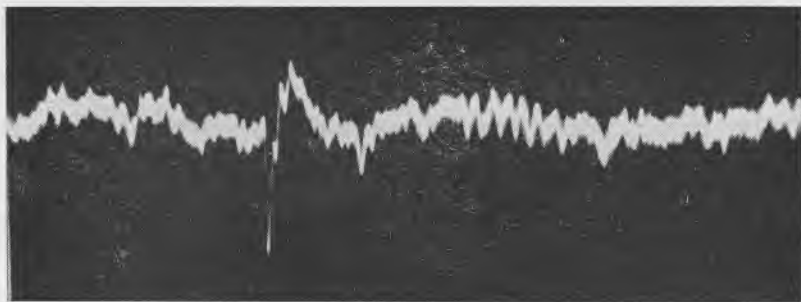


Рис. 6. Эхолокационный импульс дельфина

МПО-2. На рис. 6 приведена фотография звукового импульса дельфина, зарегистрированного с помощью описанной аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

- Ивенец У., Сазерланд У.* 1965. Возможности использования телеметрии при изучении сигнализации морских животных.— В сб.: Биотелеметрия. Пер. с англ. под ред. Н. А. Бернштейна. М., «Мир».
- Шеннон Ч. Е.* 1963. Математическая теория связи. В сб.: Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. М., ИЛ.
- Baldwin M. A.* 1965. Some Experiments in Marine Biotelemetry.— *Naval Research Reviews*, 18, No 2.
- Diercks K. J., Trochta R. A., Greenlaw C. F., Evans W. E.* 1971. Recording and Analysis of Dolphin Echolocation Signals.— *JASA*, 49, No 6, part 1.
- Maniva V.* 1960. Detection of Fish by Soundbo.— *Bull. Japan. Soc. Scient. Fisheries*, 26, No 3.