

Библиотека инженера – гидроакустика



А. Г. Голубков

ГИДРО –
ЛОКАТОР

ДЕЛЬФИНА

Библиотека
инженера-
гидроакустика

А. Г. Голубков

ГИДРО- ЛОКАТОР ДЕЛЬФИНА



Издательство «Судостроение»
Ленинград, 1977

Д-р техн. наук А. Е. КОЛЕСНИКОВ,
канд. военно-морских наук А. Л. ПРОСТАКОВ,
канд. техн. наук Г. М. СВЕРДЛИН,
канд. техн. наук М. Д. СМАРЫШЕВ,
канд. техн. наук Ю. Ф. ТАРАСЮК (ответствен-
ный редактор),
Л. Ф. ШТЕЙНМАН

Гидролокатор дельфина — один из наиболее интересных в бионике объектов исследования. Его разрешающая способность, помехозащищенность, адаптивность превосходят аналогичные характеристики технических гидролокаторов.

В предлагаемой книге, построенной на основе исследований, проводимых группой научных сотрудников под руководством автора, приведены сведения об основных характеристиках гидролокатора дельфина и его технических моделей, сравниваются результаты решения задач оптимизации вондирующих сигналов для технического гидролокатора и реальные сигналы дельфинов, рассмотрены особенности построения трактов регистрации сигналов дельфинов и других биологических объектов.

Книга предназначена для широкого круга специалистов, интересующихся вопросами гидроакустики, геофизики, подводной геологии, биологии, гидробионики, а также может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

Рецензент канд. техн. наук Тарасюк Ю. Ф.

Г 21004—053
048 (01)—77 58—77

© Издательство «Судостроение», 1977 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время получено большое количество экспериментальных и теоретических данных по локации дельфина, представляющих значительный интерес для развития гидроакустических устройств. Однако литература, посвященная бионике морских животных, содержит в основном материалы о биологических или физических их особенностях. Вопросы, представляющие интерес для проектирования технических систем на базе биологических исследований — основная задача бионики, — мало освещены в этих публикациях.

В книге приведены современные данные о локаторе дельфина, который сравнивается с техническим локатором. Показаны некоторые возможности использования гидролокационной способности дельфина для совершенствования технических систем.

Ввиду того что получено еще сравнительно мало данных по электрофизиологии, в книге рассмотрены в основном внешние характеристики локатора дельфина, т. е. дельфин представляется в виде «черного ящика».

Во введении дан обзор работ по гидробионической акустике дельфинов. Приведена многократно опробованная методика регистрации сигналов на многоканальной аппаратуре.

В главе I рассмотрены основные характеристики вондирующих сигналов дельфинов, их частотно-временные характеристики. Существенное отличие сигналов дельфинов от обычных сигналов гидролокации определяет и особые требования к трактам регистрации. Приведено решение задачи оптимизации связи между амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками, минимизирующее среднеквадратичную ошибку. Рассмотрены два способа построения тракта регистрации: магнитофонный и осциллографический.

Проанализирована возможность классификации сигналов локаций по виду решаемой задачи — обнаружению или измерению параметров. Произведен расчет оптимальных сигналов технического гидролокатора малых дальностей при условии ограничений, накладываемых дисперсией среды, шумами и характеристиками гидрофонов. Дан расчет оптимальных частот при условии равенства внешних параметров технического гидролокатора и биолокаатора дельфина.

В главе II приведены основные параметры гидролокатора дельфина: дальность действия, чувствительность, энергетические параметры, разрешение по углам и дальности. Показано, что помехозащищенность гидролокатора дельфина адаптивна к изменению гидролокационной обстановки, решаемой задачи и виду цели. Отмечена высокая акустическая совместимость гидролокатора дельфина — решение одной задачи одновременно несколькими животными.

Вопросы моделирования гидролокатора дельфина рассмотрены в главе III. Сформулированы основные требования к аппаратуре и условиям моделирования. Основная трудность в реализации этих требований заключается в создании широкополосных зондирующих сигналов. Приведены схемы моделирования и эхо-сигналы от объектов простой геометрической формы и сложных мишеней. Проанализированы результаты моделирования для простейших мишеней с точки зрения возможностей классификации.

В заключении приведены полученные результаты, намечены пути дальнейших исследований по адаптивности, классификации и помехозащищенности.

В основу материала книги положены бионические исследования, проведенные коллективом научных сотрудников под руководством автора. Большая помощь при написании и подготовке книги оказана автору ведущими инженерами Абрамовым А. П. и Григорьевым В. П. Параграфы 7 и 8 написаны Опаринным В. В., § 11 — Токаревым В. С.

Все замечания и пожелания по содержанию книги просьба направлять в адрес издательства «Судостроение»: 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8.

Одним из важнейших направлений бионики является исследование принципов построения и механизмов действия рецепторов и анализаторов в биологических системах, обеспечивающих высокую чувствительность, оптимальность, адаптивность, акустическую совместимость и надежность при малых габаритах, малой потребляемой мощности и большом ресурсе. Развитие данного направления способствует совершенствованию гидроакустических устройств. Значительные успехи в этом достигнуты при исследовании эхолокационного аппарата животных, в особенности дельфинов. В настоящее время эхолокационная способность установлена более чем у десяти видов дельфинов и некоторых видов кашалотов [2, 4, 75].

Уже в результате первых опытов [67, 72], проводимых с конца 40-х годов, установлено, что в условиях отсутствия или ограничения видимости дельфины способны обнаруживать различные препятствия, успешно избегать их при плавании и отыскивать бесшумно погруженную в воду рыбу. Тем самым неопровержимо доказано наличие локационного аппарата у дельфинов и его совершенство. Были получены предварительные данные о характере локационных сигналов дельфина (в частности, установлена их широкополосность), о направленности излучения этих сигналов и т. д.

Вначале исследования гидролокатора дельфина проводились физиологами, которых интересовала лишь качественная сторона вопроса [37, 69, 70]. Инженеров, разрабатывающих гидроакустическую аппаратуру, интересовали количественные характеристики локационного аппарата, а также вид и количественные параметры локационных сигналов. В большинстве случаев исследователи не анализировали погрешности регистрации сигналов

животных, связанные с ограниченным частотным диапазоном используемой аппаратуры, условиями проведения испытаний и несовершенством методики. Ряд записей был сделан с помощью аппаратуры, работающей в звуковом диапазоне частот [69, 70], в то время как по современным данным в спектре сигналов дельфинов имеются составляющие с частотой 250—350 кГц [3]. Все это привело к получению разными авторами мало достоверных количественных данных и противоречивых результатов. Например, величина ширины диаграммы направленности излучения дельфина по измерениям разных исследователей колебалась от 12 до 70° (по современным данным составляет около 4°).

Использование узкополосной аппаратуры приводило иногда не только к количественным, но и к качественным ошибкам. В литературе появились сведения о неизменности формы сигналов дельфинов, записанных в различных условиях аппаратурой с верхней граничной частотой 20—30 кГц. Поскольку эхолокационный сигнал дельфина является коротким импульсом, ширина спектра которого достигает 250—300 кГц, то в проводимых экспериментах на выходе регистрирующего устройства фиксировались не сигналы дельфинов, а импульсная характеристика записывающего тракта, не зависящая от изменений условий опыта.

Современные исследования гидролокатора дельфина проводятся в основном по двум направлениям. Одно из них заключается в изучении анатомических и физиологических механизмов, обеспечивающих работу отдельных частей локационного аппарата (излучателя, приемника и т. д.). Остановимся на некоторых примерах.

Несмотря на большое число опубликованных работ (см., например, [2, 18, 37, 43, 60]), достоверных сведений о механизме генерации звука дельфинами мало. По словам Эванса, «теория излучения звука дельфинами почти столько же, сколько и исследований». Методика изучения звукоизлучающего аппарата дельфина, кроме морфофункциональных исследований, включает анализ звукового поля дельфина (особенно в ближней зоне, зоне Френеля) с помощью гидрофонов, укрепленных на голове животного [43, 63]. Используется при этом анализ тонкой структуры сигналов во временной и частотной областях [18, 43].

Более разработанным, хотя также до конца не выясненным, является вопрос о физических процессах, обеспечивающих направленность акустического излучателя дельфина. С целью получения количественных характеристик были предприняты прямые измерения на полых черепах и на непрепарированных черепах мертвых животных [42, 57], применяемых в качестве рефлекторов для малогабаритных ненаправленных акустических излучателей, помещаемых в различные области носогортанной системы живого дельфина или его черепа. Результаты этих опытов, как и более позднего оптического модельного эксперимента, проведенного на черепах афалин и белобочек [18], показали, что голова дель-

фина несомненно обладает фокусирующими свойствами, обусловливаемыми отражением звука от костей черепа и воздушных мешков. Однако полученная диаграмма направленности оказалась шире, чем у живых дельфинов. Роль мягких тканей в этих экспериментах осталась невыясненной из-за недостатков методики проведения экспериментов, а также неодинаковых акустических свойств живых и мертвых тканей.

Из мягких тканей дельфина особое внимание исследователей привлек лобный выступ — дынеподобное образование, состоящее из специфической жировой ткани и снабженное особыми нервами и мускулами. Было высказано предположение [37], что лобный

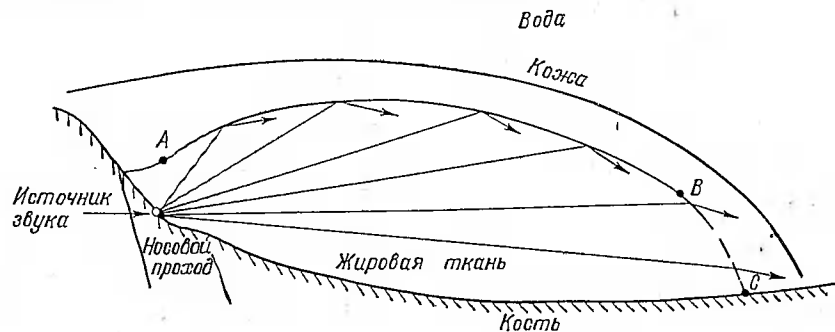


Рис. 1. Профиль лобного выступа дельфина.

выступ является своеобразной акустической линзой, фокусирующей излучаемые дельфином локационные сигналы. В необходимых случаях дельфин может менять кривизну этой линзы с помощью специальных мускулов, изменяя тем самым ширину диаграммы направленности и вид сигналов. Результаты, полученные при изучении анатомии головы дельфина и физиологические эксперименты по блокаде нервной регуляции соответствующих мускулов [54] свидетельствуют в пользу данной гипотезы.

Наиболее подробно анализ свойств лобного выступа проведен Фитцджеральдом. Изучая анатомию дельфина, он нашел, что профиль лобного выступа на большей части длины (на участке АВ, рис. 1) является логарифмической спиралью.

С учетом акустических свойств морской воды и жировой ткани, из которой состоит лобный выступ, был рассчитан показатель преломления звука на границе морская вода — лобный выступ. Кроме того, было установлено, что звук, исходящий из фокуса логарифмической спирали (где должен быть расположен первичный источник звука у дельфина), испытывает полное внутреннее отражение на всем протяжении того участка лобного выступа, форма которого соответствует логарифмической спирали. На конце же лобного выступа (его форма отличается от спиральной, на рис. 1 обозначен пунктиром), звук беспрепятственно проходит в воду, образуя узкий луч, направленный вперед.

Следуя бионическому принципу, Фитцджеральд предложил новые типы акустического излучателя и радиолокационной антенны, форма которых в точности повторяет форму лобного выступа дельфина. По его мнению, эти антенны должны обладать узконаправленными свойствами. Так можно характеризовать направленность только тех частот, длина волны которых будет меньше размера лобного выступа. Для более низких частот поверхность раздела морская вода — лобный выступ не будет представлять заметного препятствия и, следовательно, в этом случае лобный выступ теряет свое фокусирующее свойство. Граничная частота перехода от направленного режима работы к ненаправленному по вычислениям Фитцджеральда и экспериментальным данным равна приблизительно 30 кГц.

Имеющиеся в литературе экспериментальные данные по измерению ширины диаграммы направленности дельфина на различных частотах [41] подтверждают выводы Фитцджеральда, но окончательно данный вопрос еще не решен.

Высокая информативность эхолокатора дельфина требует изучения возможностей физических и физиологических механизмов его анализирующего аппарата.

По мнению Чапмена [61], дельфин использует базово-частотный метод, позволяющий составить полное представление о лоцируемом объекте на основании угловых и спектральных характеристик отраженного сигнала. Экспериментальным путем было показано, что базово-частотный метод приводит к ухудшению разрешающей способности эхолокатора дельфина в вертикальной плоскости по сравнению с горизонтальной. В ряде опытов наблюдалось, что дельфин, дифференцируя цели по углу в вертикальной плоскости, поворачивался на бок и, активно лоцируя, решал поставленную задачу [4]. Эти наблюдения подтверждают базово-частотную гипотезу.

А. Е. Резников выдвинул предположение о том, что дельфин обладает «акустическим» глазом, позволяющим ему осуществить «звуковидение» окружающей обстановки [41]. Аналогом хрусталика служит жировая подушка лобного выступа, которая фокусирует акустическое изображение предметов на стенки воздушных мешков, где оно считывается с помощью осязательных, а возможно, и других рецепторов. Проведенные А. Е. Резниковым расчеты показали, что такой механизм восприятия согласуется с экспериментальными данными о зонах четкого и нечеткого обнаружения эхолокатором дельфина. Эта гипотеза объясняет высокую помехоустойчивость эхолокатора дельфина, поскольку при звуковидении сигналы от цели и источников помех фокусируются на различные участки поля изображения. Данное предположение подтверждают и наблюдения над быстротой и точностью обнаружения мертвой рыбы на дне дельфинами различных размеров (с увеличением размеров жировой подушки разрешающая способность акустического глаза должна повышаться).

Однако точность проведенных расчетов невелика из-за незнания акустических параметров живых тканей дельфина.

Исследователем Дреером [62] была высказана гипотеза о голографическом характере обработки акустической информации дельфином. Это предположение основано на том, что на наружной поверхности лобного выступа дельфина имеется решетка из трубчатых дермальных сосочков, размеры и расстояние между которыми составляют примерно 10^{-3} см.

Подводя итог морфофункциональным работам, можно отметить, что на современном этапе исследований по этому направлению накоплено достаточно экспериментальных данных и разработаны частные гипотезы и модели для отдельных механизмов гидролокатора дельфина, причем многие из них недостаточно аргументированы.

Другое направление исследования гидролокатора дельфина заключается в изучении его в целом. Локатор дельфина в процессе длительной эволюции приобрел оптимальные свойства, поэтому его можно использовать в качестве модели для модернизации технических систем. Интересно при этом определить параметры гидролокатора, характерные как для отдельных видов дельфинов, так и для всех видов.

При изучении гидролокатора дельфина широко применяется кибернетический метод «черного ящика», когда рассматриваются только внешние характеристики эхолокатора без какой-либо связи с его внутренним устройством. Такой метод позволяет получить информацию о работе гидролокатора морских животных без полного исследования всех физиологических вопросов локации.

Современный подход к изучению гидролокационного аппарата морских животных заключается в проведении над животными целенаправленных опытов с одновременной регистрацией локационных сигналов, обработка которых позволяет установить объективные характеристики эхолокатора.

Методика проведения экспериментов должна учитывать как биологические, так и инженерно-физические аспекты. С биологической точки зрения необходимо помнить, что дельфины являются животными с высокоразвитой центральной нервной системой, которая позволяет им быстро приспосабливаться к манере работы конкретного экспериментатора, его жестам, способам смены мишеней, характеру погружения мишеней в воду и т. д. Это следует учитывать, чтобы избежать искажения результатов эксперимента. Необходимо также помнить о возможности неадекватности поставленной и решаемой в естественных условиях задач, физическом и психическом состоянии дельфина, особенностях методики его обучения и т. д. [50].

К инженерно-физическим аспектам в первую очередь следует отнести тип водоема, в котором проводятся опыты. Первоначально исследования проводились в закрытых (обычно бетонных)

бассейнах. Однако такие бассейны имеют очень высокий уровень реверберации. Наличие многочисленных отраженных сигналов приводит к интерференции между ними и исследуемым сигналом, к искажению формы последнего при регистрации. Кроме того, дельфин изменяет свои зондирующие сигналы и свое поведение в подобных условиях — явление, аналогичное действию зеркальной комнаты. Заглушить все отражения от стенок и дна очень трудно и дорого, учитывая широкополосность сигналов дельфинов и величину бассейна. Из распространенных экспериментальных

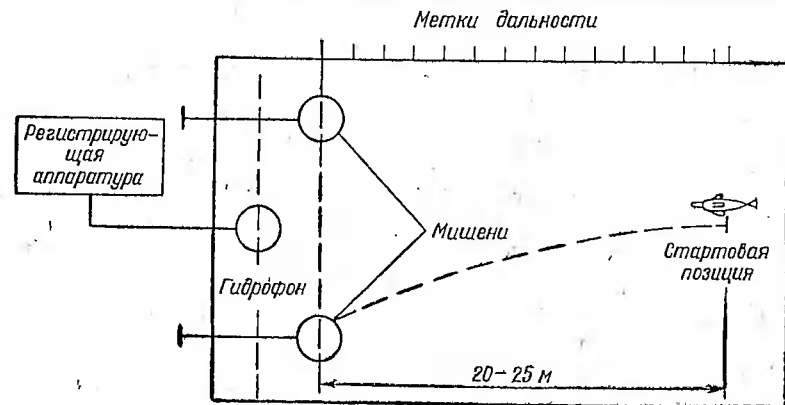


Рис. 2. Схема проведения экспериментов по различению мишеней.

водоемов наименьшим уровнем реверберации обладает свайно-сетевой вольер, представляющий собой мостки, положенные над поверхностью воды на сваи, между которыми натянуты капроновые сети. При достаточной глубине вольера и илисто-песчаном дне, хорошо поглощающем звук, уровень реверберации становится приемлемым.

О влиянии реверберации на результаты экспериментов с дельфинами можно судить по работам [62, 67], посвященным исследованиям двоярных импульсов дельфина. В них предложена гипотеза генерации эхолокационных сигналов, а также указано [67], что второй импульс в зондирующем сигнале дельфина является информативным при определении животным расстояния до цели. Обработка зарегистрированных сигналов показала наличие как одиночных, так и двоярных сигналов у всех животных. Отсутствие закономерностей в появлении двоярных импульсных сигналов, изменении междуимпульсного интервала, в амплитудных и фазовых соотношениях между отдельными импульсами пары позволило предположить, что двоярные сигналы возникают из-за прихода одиночного импульса вместо расположения регистрирующего гидрофона по двум различным путям. Результаты расчетов и опытов подтвердили предположение о возможности

возникновения двойных импульсов вследствие влияния поверхности воды.

При проведении экспериментов с дельфинами важно правильно выбрать мишени. В первые годы исследований гидролокатора дельфина этому вопросу не придавалось должного внимания. Выбор мишеней был произвольным: рыба (живая и мертвая), модели рыб из различных материалов, проволока, дробь и т. д. При этом акустические свойства мишеней, кроме прозрачности, как правило, не изучались. Это приводило к серьезным трудностям при сравнении результатов, полученных разными исследователями, а иногда и к ошибкам. Однако только по акустическим свойствам мишеней возможен целенаправленный поиск информативных характеристик эхо-сигналов, используемых дельфином при распознавании объектов. В настоящее время в качестве мишеней наиболее часто применяются шары и цилиндры, акустические характеристики которых поддаются точному расчету. Кроме того, эти фигуры обладают осями симметрии бесконечного порядка, в результате чего отсутствует зависимость отраженного сигнала от угла поворота мишени по отношению к дельфину.

Рассмотрим один из вариантов методики проведения экспериментов с дельфинами, разработанный в литературе [12], с целью изучения их способности различать объекты по размерам и материалу.

Для получения возможно более точных характеристик зондирующих сигналов опыты с дельфинами проводились в открытых свайно-сетевых вольерах глубиной 5—8 м, устанавливаемых вблизи берега. Акватория вольера имела илисто-песчаное дно, хорошо поглощающее звуки. На рис. 2 показана схема проведения опыта. Мишени в случайной последовательности опускались в воду с одного конца вольера, стартовая позиция находилась на другом его конце, в 20 м от мишени. Гидрофон подвешивался за мишенями, на расстоянии 1 м от них.

В опытах применялась методика двигательных условных рефлексов, основанных на пищевом подкреплении. Условным раздражителем являлось излучение в воду сигнала от специального генератора (генератора сигнала вызова) частотой 5—6 кГц и длительностью 1—3 с. По сигналу животное начинало движение к мишени. В процессе обучения одна мишень считалась положительной и животное училось толкать ее или контрольный рычаг, получая за это рыбу. Через 2—3 с дельфин возвращался на стартовую позицию.

При неправильном решении задачи животное возвращалось на старт, не получив подкрепления. После окончания обучения при предъявлении дельфину отрицательной мишени, он, как правило, даже не двигался со стартовой позиции.

Начиная движение со старта, дельфин непрерывно излучал ультразвуковые импульсы, которые принимались гидрофоном и поступали в тракт регистрации. Вдоль вольера укреплялись

метки дальности, и экспериментатор при помощи генератора меток мог подавать сигнал на регистрирующее устройство в момент прохода животного около определенных меток (например, 5, 3 и 1 м).

Применялась и другая схема опыта. Волкер разделял сеть так, что первая мишень располагалась по одну сторону сети, а вторая — по другую, т. е. образовывались два коридора. Длина сети могла регулироваться экспериментатором. Начиная движение со старта, дельфин должен был интенсивно лоцировать объекты, чтобы правильно выбрать коридор до разделительной сети. Гидрофон был помещен у начала разделительной сети.

Особое внимание следует уделить электронной регистрирующей аппаратуре. Специфика аппаратуры, используемой при исследованиях, направленных на раскрытие физиологических механизмов гидролокационного аппарата дельфина, подробно рассмотрена в работе [43]. Там же описаны регистрирующие устройства, используемые при исследовании внешних характеристик эхолокатора дельфина в ближней зоне его излучения. Поэтому в настоящей работе будет рассмотрена только аппаратура, применяемая при бионических исследованиях, когда излучение дельфина регистрируется в дальней зоне. Аппаратура тракта регистрации должна иметь специфические частотные характеристики, обусловленные видом сигналов дельфинов и отличные, например, от характеристик трактов регистрации технического локатора.

По сравнению с существующими техническими системами гидролокатор дельфина имеет ряд особенностей, связанных с его биологической природой:

1. Положение дельфина и его головы относительно мишени и приемного гидрофона в момент излучения различных зондирующих импульсов неодинаково и изменяется случайным образом, так как траектория движения дельфина от стартовой позиции к мишени различна и криволинейна. Отсюда вытекает необходимость применения в регистрирующей аппаратуре ненаправленных гидрофонов. В связи с тем что гидролокатор дельфина обладает резко выраженной направленностью и сигналом, соизмеримым по протяженности в воде с габаритами излучателя, для получения неискаженного сигнала необходима многоканальная система регистрации с разнесением гидрофонов отдельных каналов в плоскости, перпендикулярной общему направлению движения дельфина [42]. Многоканальная регистрация требуется также при поиске информативных параметров в отраженном от мишени сигнале.

2. Локационные сигналы излучаются дельфином в случайные и неуправляемые со стороны экспериментатора моменты времени. Из-за большой скважности эхолокатора дельфина это создает значительные трудности при использовании медленно действующей аппаратуры записи и анализа отдельных импульсов, по-

скольку такая аппаратура (фотокамеры, осциллографы, анализаторы спектра и т. д.) обычно работает в ждущем режиме. Для запуска этой аппаратуры требуются синхронизующий, опережающий во времени анализирующий сигнал, и специальный синхронизирующий тракт, сигнал на выходе которого должен появляться до поступления сигнала на вход анализирующей аппаратуры [42].

3. Излучаемые дельфином сигналы широкополосны. По современным данным мгновенная частота сигналов дельфина достигает 100 кГц и, следовательно, аппаратура их записи должна иметь полосу пропускания не менее 250—300 кГц [21, 43].

Аппаратура регистрации должна обеспечить запись принятых сигналов с возможностью их последующего воспроизведения. Эту запись в настоящее время предпочтительнее осуществлять в аналоговой, а не в цифровой форме. При цифровой регистрации широкополосных сигналов требуется частота отсчетов (до 500 кГц) и высокое быстродействие АЦП, а широкий динамический диапазон сигналов влечет за собой большое число разрядов АЦП. Все это усложняет аппаратуру записи и увеличивает ее стоимость.

При аналоговой регистрации основной проблемой является выбор оконечного устройства. Запись на магнитную ленту позволяет осуществить непрерывную регистрацию всех сигналов, создает возможность частотно-временного транспонирования записанных сигналов в результате изменения скорости протяжки ленты при воспроизведении. Однако полоса пропускания современных ультразвуковых магнитофонов (порядка 100—200 кГц) недостаточна для регистрации с малыми искажениями.

Регистрация сигнала с помощью осциллографа и фото- или кинокамеры не накладывает принципиальных ограничений на полосу пропускания тракта, так как при этом возможна регистрация с полосой до 300 кГц. Однако запись сигнала при непрерывной работе развертки осциллографа и кинокамеры потребует огромного расхода киноплёнки сверхвысокой чувствительности и не исключает потери сигналов, проходящих во время обратного хода луча осциллографа. Кроме того, кинокамеры, которые могут осуществлять покадровую съемку в ждущем режиме, обладают низким быстродействием (единицы герц и менее), в результате чего большая часть сигналов зарегистрирована не будет. При регистрации сигналов в ждущем режиме теряется также информация о частоте повторения и изменении сигнала. Представление сигнала в оптической форме накладывает некоторые ограничения на способы его вторичной обработки: затрудняет анализ с помощью электронных приборов (анализаторов спектра и т. д.), но облегчает ввод информации в ЦВМ.

Выбор оконечного устройства регистрации определяется в каждом конкретном случае. Иногда имеет смысл и одновременное применение обоих способов записи.

§ 1. Основные характеристики сигналов дельфинов

Записи акустических сигналов дельфинов были сделаны впервые в 1951 г. Ф. Вудом. Многочисленные работы, проведенные после него, позволили обнаружить большое разнообразие звуков, издаваемых дельфинами под водой. Эти звуки первоначально описывались субъективно.

К началу 60-х годов появились первые данные о структуре и параметрах сигналов дельфинов. Накопился значительный материал по сопоставлению излучаемых дельфинами сигналов с их поведением в океанариумах. Это позволило в 1961 г. Лилли и Миллеру [70] классифицировать сигналы дельфинов по их биологическому значению и параметрам.

К первой группе были отнесены коммуникационные сигналы. Это модулированные по амплитуде и частоте импульсы, называемые свистами. Длительность таких сигналов находится от десятых долей до нескольких секунд. Основная энергия сосредоточена в диапазоне звуковых частот.

Вторая группа — локационные сигналы, называемые щелчками. Длительность таких сигналов изменяется от сотых долей до нескольких миллисекунд. Энергия сигналов сосредоточена в широком диапазоне ультразвуковых частот.

Третья группа — эмоциональные и раздражительные сигналы. Структура и параметры таких сигналов менее всего изучены и интересуют исключительно биологов, которые характеризуют их только качественно: лай, вой, трели и т. д. Опыты, проведенные Бастианом по обмену информацией между двумя дельфинами, показали, что наряду с частотно-модулированными сигналами используются серии сигналов, сходные с локационными [72].

Кашалоты [74] излучают только короткие широкополосные импульсы независимо от ситуации, морские свиньи [60] — ши-

рокополосные импульсы различных видов. Это позволило предположить, что локационные сигналы могут применяться животными для коммуникации и наоборот, коммуникационные сигналы — для локации.

Норрис [73] делит локационные сигналы на сигналы ориентации и сигналы распознавания. Такое деление основывалось на соответствии между поведением дельфинов и характеристиками излучаемых ими сигналов. В отличие от сигналов распознавания сигналы ориентации имеют большую амплитуду, значительную длительность и более низкочастотный спектр.

В работе [35] показано, что наряду с коммуникационными и локационными сигналами дельфины излучают шумоподобные импульсные сигналы длительностью до нескольких миллисекунд.

Коммуникационные сигналы [70] издаются группами по 1—9 свистов, причем каждый свист отделен от другого интервалом молчания у группы животных или низкоамплитудными звуками у одного животного. Длительность одного свиста 0,1—0,4 с. Наиболее часто встречаются свисты длительностью 0,25 с. Дельфины одной группы имеют сходные частотно-временные характеристики свистов, у дельфинов разных групп эти характеристики существенно различаются. Диапазон изменения частоты в свисте составляет 4—18 кГц. У одиночного животного свисты наблюдаются реже и довольно стереотипные, у пары — более частые и разнообразные. Для большинства свистов характерно постоянное увеличение амплитуды до максимальной и спад амплитуды во время последующего свиста.

Авторами работы [26] свисты были разделены на короткие до 0,45 с и длинные — 0,7—1,4 с. При этом было установлено, что длинные сигналы излучаются дельфинами преимущественно в состоянии тревоги, в то время как при «беседе» дельфины обмениваются короткими свистами. Средняя частота коммуникационных сигналов дельфина сосредоточена в области 6—10 кГц, причем частота обычно возрастает от начала сигнала к концу при скорости изменения частоты 5—15 кГц/с. Наряду с такими сигналами встречаются, хотя и редко, сигналы, в которых наблюдается область спада частоты к концу свиста. Диапазон изменения частоты в свисте — от 4 до 23 кГц. Для большинства свистов характерна амплитудная модуляция при почти постоянной частоте и частотная модуляция при постоянной амплитуде (рис. 3).

Анализ сигналов, записанных от двух видов дельфина (афалин и белобочек), не показал сколько-нибудь значительного отличия. Было сделано предположение, что решающую роль в кодировании сигналов играет амплитудная модуляция, необходимая, по мнению авторов [26], для устранения прямых и отраженных сигналов от дна и поверхности моря. Высказывается мнение, что основное значение в кодировании сигналов может играть фазовая модуляция сигналов.

При исследовании способности дельфинов дифференцировать различные объекты по линейным размерам было обнаружено, что наряду с локационными сигналами они излучают свисты [10]. Длительность этих сигналов колеблется от 0,5 до 2 с. На рис. 4 приведена огибающая одного из свистов. Для исследования внутренней структуры свиста был применен параллельный анализ,

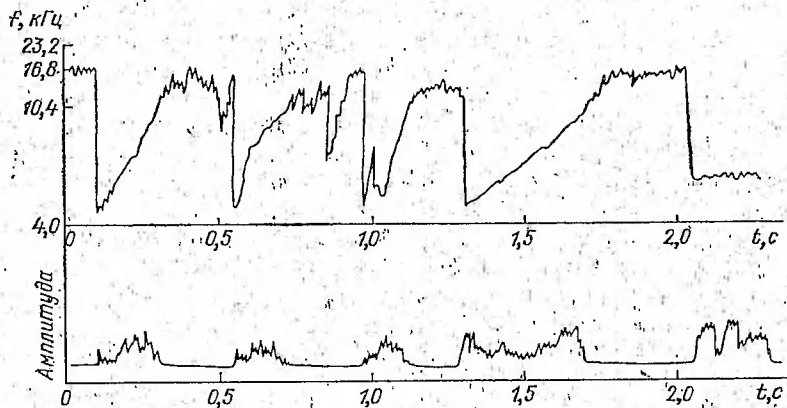


Рис. 3. Изменение мгновенной частоты и амплитуды для коммуникационных сигналов дельфинов.

при котором использовался блок трехоктавных фильтров от анализатора звуковых частот типа СЗЧ. Так как верхняя частота анализатора составляла 20 кГц, то было применено замедление записи свиста в 8 раз. При этом спектр свиста линейно трансформировался в звуковой диапазон.

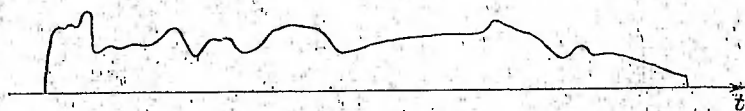


Рис. 4. Огибающая типичного коммуникационного сигнала.

На рис. 5 приведена структурная схема применения аппаратуры для анализа. Напряжение свиста с магнитофона типа «Тембр» подавалось на 12 третьооктавных фильтров анализатора СЗЧ. Для записи напряжения с выхода фильтров использовался 12-канальный шлейфовый осциллограф типа Н105. Чтобы иметь возможность регулировать начальный ток шлейфов для установки лучей каналов в исходное положение, использовалось буферное устройство, согласующее низкое выходное сопротивление фильтров анализатора со входом осциллографа. Форма напряжений на каждом из 12 каналов показана на рис. 6, откуда видно,

что свист имеет внутримпульсную частотную девиацию. Статистически усредненная зависимость мгновенной частоты от времени в свисте показана на рис. 7. Основные характеристики



Рис. 5. Структурная схема для анализа коммуникационных сигналов.

коммуникационных сигналов по рассмотренным работам сведены в табл. 1.

Одновременно со свистами дельфины излучают сигналы, связанные, по-видимому, с локацией. Так, например, были записаны сигналы, напоминающие «блеяние». Эти сигналы издавались двумя

только что отловленными животными в бассейне. В начале эти сигналы издавались в быстром темпе (несколько сигналов в минуту), затем их количество снижалось до нескольких сигналов в час. Длительность сигнала составляет 0,4—1,55 с.

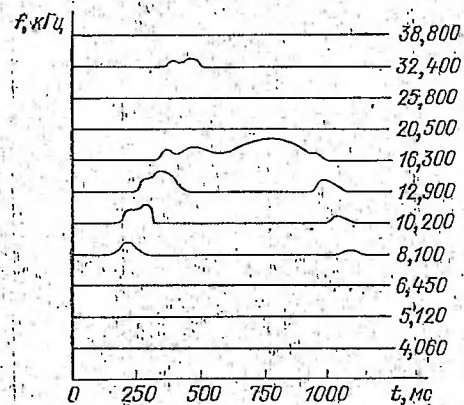


Рис. 6. Сигналы на выходе параллельных фильтров анализатора коммуникационных сигналов.

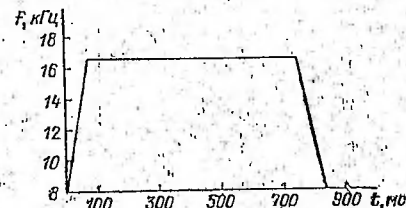


Рис. 7. Изменение мгновенной частоты в коммуникационном сигнале.

Во время кормления был замечен доминирующий сигнал, напоминающий хлопок в ладоши. Этот сигнал состоит из 2—3 последовательно издаваемых звуков с интервалом 0,2 с.

Наибольший интерес представляют локационные сигналы дельфинов. Уже первые исследования по выявлению гидролокационной

Вид дельфина	Длительность сигнала, с	Средняя частота, кГц	Пределы изменений частоты, кГц	Вид модуляции	Амбатория	Диапазон записывающей аппаратуры, кГц	Автор и год публикации
Афалина	0,1—0,4 Наиболее распространена 0,25	—	4—18	Частотная и амплитудная	Бассейн	1—33	Lilly J. 1961 г.
То же	0,1—3,6	—	4—20	Частотная	То же	Звуковой диапазон	Evans W. E. Prescott J. H. 1962 г.
Белобочка	0,12—1,1	6—16	4—23	То же	Открытое море	Верхний частотный предел 30	Visuel R. G. Dziedzic A. 1966 г.
То же	0,4—1,4 Наиболее распространена 0,2	6—10	—	Амплитудная и частотная	Бассейн	1—100	Резник А. М. 1969 г.
Афалина	0,1—1,4	6—10	4—23	То же	То же	1—100	Резник А. М. 1968 г.

способности дельфинов показали, что при свободном плавании в воде и отсутствии внешних раздражителей издаются серии сигналов. Число и длительность этих серий различны в зависимости от ситуаций.

Из анализа магнитных записей было также установлено, что как в процессе укрепления рефлекса, так и при установившейся дифференцировке (обычно применяемый в бионике термин, обозначающий распознавание) дельфин издает серии импульсов [10]. Существенная разница в частоте следования импульсов в сериях при дифференцировке животным мишеней позволяет разделить

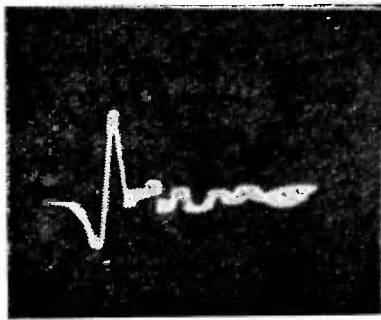


Рис. 8. Импульсный сигнал дельфина для серии с большой частотой следования.

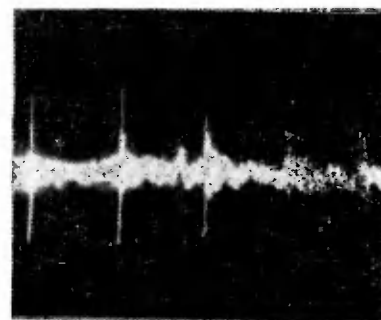


Рис. 9. Серия импульсов с большой частотой следования.

их на серии с малой частотой следования 20—40 Гц и серии с большой частотой следования 100—400 Гц [35, 58]. Серии с большой частотой следования характерны для начальных опытов, когда только вырабатывался условный рефлекс у животного. При устойчивой дифференцировке такие серии встречаются значительно реже, обычно в начале или в конце выпуска. Можно предположить, что такие серии используются животными с целью ориентации. Их длительность составляет 0,2—10 с. Начинается серия с частоты следования импульсов 100 Гц, к концу увеличивается до 400 Гц. Осциллограмма характерного импульса серии с большой частотой следования представлена на рис. 8, а часть этой серии, снятая на киноплёнку, — на рис. 9. Длительность сигналов этих серий лежит в пределах от 20 до 40 мкс, а их форма близка к форме одного периода синусоиды. Нормированная спектральная плотность таких импульсов представлена на рис. 10.

В сериях с малой частотой следования наблюдается немонотонное увеличение частоты примерно с 20 до 40 Гц. Число импульсов в серии меняется от 50 до 140 в зависимости от расстояния до цели. Длительность серий составляет соответственно 1,8—3,7 с. Часть серии представлена на рис. 11.

Сигналы серий с малой частотой следования представляют собой в первом приближении импульсы в виде «обрывка» затухающих гармонических колебаний [58]. Они состоят, как правило, из нескольких периодов, а их длительность изменяется в пределах от 50 до 150 мкс. На рис. 12 приведен типичный импульс. Как показывают результаты измерений, эффективная ширина спектра локационных сигналов дельфинов лежит в диапазоне 15—230 кГц [3].

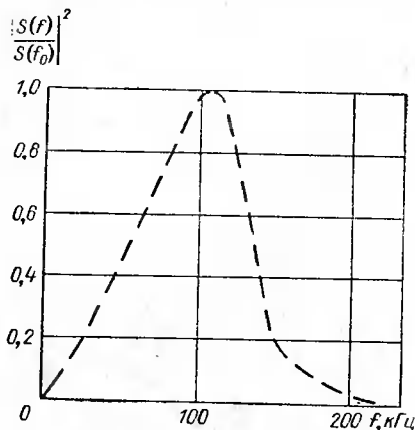


Рис. 10. Нормированная спектральная плотность импульсного сигнала.

Джеймс В. Фитджеральд, исследуя гидролокатор дельфина, разделил его на четыре основные части:

1) высокочастотный широкополосный (30—150 кГц) излучатель с узкой диаграммой направленности, обладающий малой дальностью действия и предназначенный для распознавания цели;

2) низкочастотный широкополосный (<30 кГц) излучатель с широкой диаграммой направленности и большой дальностью действия, предназначенный для ориентации, обнаружения опасности и дальнего поиска;

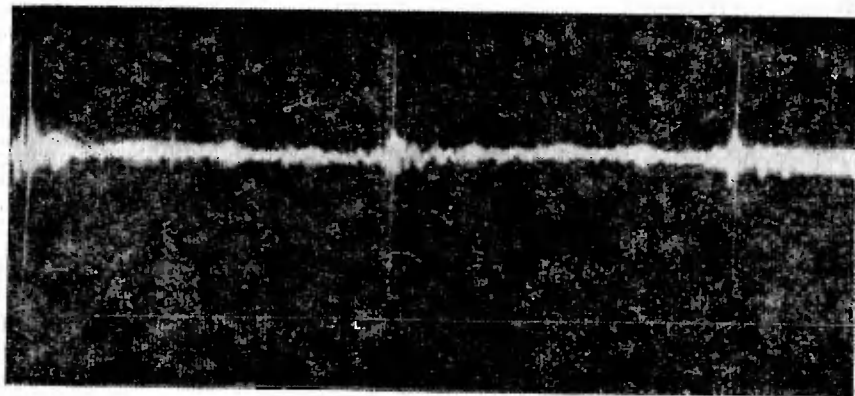


Рис. 11. Серия импульсов с малой частотой следования.

3) частотно-модулированный коммуникационный (0,2—20 кГц) излучатель с ненаправленным лучом, предназначенный для связи между дельфинами;

4) широкополосный приемник.

Из сказанного следует, что наиболее целесообразно сигналы дельфинов классифицировать на сигналы распознавания, ориентации и связи.

Анализ большого количества локационных сигналов зарегистрированных широкополосной аппаратурой, показал, что они представляют собой импульсы, содержащие от 1 до 6 периодов гармонических колебаний с некоторой весовой функцией $y(t)$. Вид весовой функции зависит от большого числа факторов [3].

Зондирующие сигналы можно аппроксимировать следующей формулой:

$$x(t) = \begin{cases} y(t) \sin 2\pi f_0 t & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{n}{f_0}; \\ 0 & \text{при } t < 0, t > \frac{n}{f_0}, \end{cases}$$

где $y(t)$ — весовая функция; f_0 — частота, равная координате центра тяжести функции спектральной плотности сигнала; n — число периодов частоты f_0 в импульсе.

Данная аппроксимация удобна для математического описания сигналов дельфина и может служить моделью зондирующего сигнала при теоретических расчетах.

Активная ширина спектра сигнала существенным образом зависит от числа периодов колебаний в импульсе и вида функции $y(t)$. В качестве аппроксимирующих были выбраны функции

$$y_1(t) = 1; \quad y_2(t) = e^{-\frac{t f_0}{n}}; \quad y_3(t) = e^{-\frac{g t^2 f_0^2}{n^2}},$$

а затем рассчитаны графики нормированных спектральных плотностей. По этим графикам определялась активная ширина спектра для различных видов $y(t)$. Из графика, приведенного на рис. 13, видно, что вид весовой функции существенно влияет на нормированную активную ширину спектра сигналов $f(n) = \Delta f / f_0$. Изменение активной ширины спектра составляет от 1,07 при $n = 1$ до 0,17 при $n = 8$. Наибольшая активная ширина спектра сигнала получается при $n = 1$. Такой сигнал наиболее удобен для математической модели локационного сигнала дельфина. Частота f_0 в излученных сигналах изменяется от 30 до 130 кГц.

В современной гидроакустике наряду с простыми сигналами, у которых база сигнала (произведение активной ширины спектра на длительность) составляет примерно единицу, используются и сложные сигналы с базой 30—100.

На основании графиков, приведенных на рис. 13, база локационных сигналов дельфина может быть определена как

$$B = \frac{\Delta f}{f_0} n,$$

где n — число периодов в импульсе.

База зондирующих сигналов дельфинов достигает 3, что значительно меньше базы сложных сигналов, применяемых в технике. Однако относительная активная ширина спектра зондиру-



Рис. 12. Импульсный сигнал дельфина для серии с малой частотой следования.

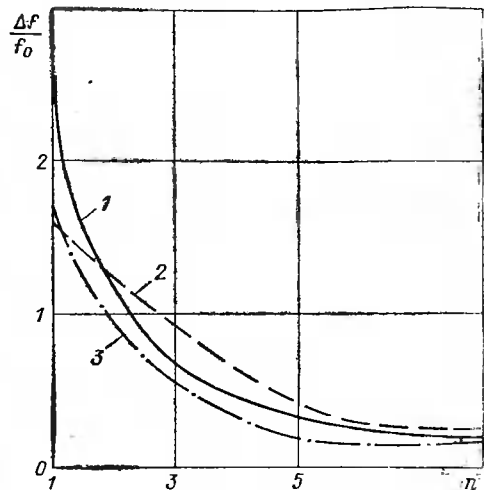


Рис. 13. Расчетная активная ширина спектра для различных форм огибающей и количества синусоид.

1 — прямоугольная огибающая; 2 — экспонента; 3 — колокольчатая огибающая.

ющих сигналов дельфинов ($\approx 100\%$) намного превышает относительную активную ширину спектра сигналов, применяемых в технике ($\approx 10-15\%$).

§ 2. Особенности трактов регистрации

При проектировании измерительных трактов бионических систем наряду с обеспечением достаточно широкой полосы пропускания важно определить оптимальное соотношение между амплитудно-частотной и фазовой характеристиками тракта, обеспечивающее минимум среднеквадратичной погрешности. Критерий такой погрешности следует применять для измерительных усилителей [53], так как использование критериев оценки погрешностей в виде отдельных параметров переходной характеристики (времени установления, переколебательности и т. д.) оценивает погрешность только отдельных частей, а не всего сигнала в целом.

При отсутствии ограничений на параметры элементов тракта решение этой задачи приводит к условию, полученному для искажающей цепи, т. е. цепи, имеющей постоянную амплитудную и линейную фазовую характеристику. Однако это условие для

практически выполнимого тракта нереализуемо. При учете ограничений, возникающих при изготовлении активных и пассивных элементов тракта, задача может быть сформулирована следующим образом: требуется найти условный минимум функционала нормированной среднеквадратичной погрешности передачи сигнала

$$I_0 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} L_0 d\omega \quad (1)$$

при условии, что имеют место ограничения по площади усиления тракта регистрации

$$I_1 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} L_1 d\omega \leq C_1 \quad (2)$$

и по предельному качеству тракта регистрации

$$I_2 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} L_2 d\omega \leq \theta_{\text{нр}} (\omega_2 - \omega_1), \quad (3)$$

где

$$L_0 = |F(\omega)|^2 |1 - K(\omega) e^{i\psi(\omega)}|^2;$$

$F(\omega)$ — энергетический спектр сигнала; $K(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика тракта; $\varphi(\omega)$ — фазочастотная характеристика тракта; α — групповая задержка тракта; $\psi(\omega) = \varphi(\omega) - \alpha\omega$ — отклонение фазочастотной характеристики тракта от линейной; $L_1 = |K(\omega)|^2$; $L_2 = \omega d\varphi(\omega)/d\omega$; ω_1, ω_2 — граничные частоты полосы тракта. В частном случае при $\omega_1 = 0$ — тракт низкочастотный.

Определим физический смысл уравнений связи (2) и (3). Условие (2) определяет энергетическое ограничение для тракта регистрации. Вместо этого условия можно использовать и более жесткое условие устойчивости

$$I_3 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} K(\omega) d\omega \leq C_2,$$

где C_2 — постоянная.

Условие (2) определяет ограничение на точность реализации частотных характеристик.

Таким образом, решение задачи оптимизации характеристик тракта регистрации сводится к определению стационарных точек функционала

$$I = I_0 + \lambda_1 I_1 + \lambda_2 I_2,$$

где λ_1 и λ_2 — постоянные множители Лагранжа.

Рассмотрим три возможные вариации частотных характеристик: а) вариацию амплитудно-частотной характеристики; б) ва-

риацию фазочастотной характеристики; в) совместную вариацию обеих характеристик.

При вариации амплитудно-частотной характеристики $K(\omega)$ стационарные точки функционала I определяются из уравнения Эйлера

$$\frac{\partial}{\partial \omega} \frac{\partial \sum_{i=0}^2 \lambda_i L_i}{\partial K'} - \frac{\partial \sum_{i=0}^2 \lambda_i L_i}{\partial K} = 0, \quad (4)$$

где λ_0 полагаем равным 1.

Из этого выражения с учетом условий (1), (2) и (3), получим

$$|F|^2 [-\cos \psi + K] + \lambda_1 K = 0. \quad (5)$$

В данном случае, а также далее функции записаны без значения аргумента.

Из выражения (5) следует

$$K_0 = \frac{|F|^2 \cos \psi}{|F|^2 + \lambda_1}.$$

При малом λ_1 слабое ограничение по площади усиления, т. е. при $|F|^2 \gg \lambda_1$,

$$K_0 \approx \cos \psi.$$

При большом λ_1

$$K_0 = \frac{|F|^2 \cos \psi}{\lambda_1},$$

т. е. оптимальный коэффициент передачи четырехполосника зависит от $|F|^2$ при учете ограничений на полосу усиления. Среднеквадратичная погрешность в этом случае определится как

$$I_0 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} |F(\omega)|^2 (1 - \cos^2 \psi + \cos^2 \psi \sin^2 \psi) d\psi.$$

Производя элементарные тригонометрические преобразования, получаем

$$I_0 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} |F(\omega)|^2 \sin^2 \psi d\omega.$$

При вариации фазочастотной характеристики $\varphi(\omega)$ стационарные точки функционала I_0 определяются из уравнения Эйлера:

$$\frac{\partial}{\partial \omega} \frac{\partial \sum_{i=0}^2 \lambda_i L_i}{\partial \varphi'} - \frac{\partial \sum_{i=0}^2 \lambda_i L_i}{\partial \varphi} = 0. \quad (6)$$

Из этого выражения с учетом (1), (2) и (3) получим

$$2|F|^2 K \sin \psi - \lambda_2 = 0$$

или

$$\psi_0 = \arcsin \frac{\lambda_2}{2|F|^2 K}.$$

При $\lambda_2 \rightarrow 0$ (большом качестве пассивных элементов), ψ_0 также стремится к нулю, а $\varphi_0(\omega) - \alpha\omega$.

При вариации обеих частотных характеристик стационарные точки функционала I_0 определяются из решения системы уравнений Эйлера:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \omega} \frac{\partial \sum_{i=0}^2 \lambda_i L_i}{\partial K'} - \frac{\partial \sum_{i=0}^2 \lambda_i L_i}{\partial K} = 0; \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \frac{\partial \sum_{i=0}^2 \lambda_i L_i}{\partial \varphi'} - \frac{\partial \sum_{i=0}^2 \lambda_i L_i}{\partial \varphi} = 0 \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} |F|^2 \cos \psi + K(|F|^2 + \lambda_1) = 0; \\ 2|F|^2 K \sin \psi - \lambda_2 = 0. \end{cases}$$

После простейших преобразований можно определить оптимальные амплитудно-частотные характеристики

$$\varphi_{0,0} = \alpha\omega + \frac{1}{2} \arcsin \frac{\lambda_2 |F|^2 + \lambda_1}{|F|^4}; \quad (7)$$

$$K_{0,0} = \sqrt{\frac{2|F|^4 \pm \sqrt{4|F|^8 - 4\lambda_2^2(|F|^4 + 4|F|^2\lambda_1 + \lambda_1^2)}}{4|F|^4 + 2|F|^2\lambda_1 + \lambda_1^2}}. \quad (8)$$

Множители Лагранжа определяются из решения системы интегральных уравнений, полученных из выражения (2) и (3) с подстановкой уравнения (7) и (8)

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{4|F|^4 + \sqrt{4|F|^8 - 4\lambda_2^2(|F|^4 + 4|F|^2\lambda_1 + \lambda_1^2)}}{4|F|^4 + 2|F|^2\lambda_1 + \lambda_1^2} d\omega = C_1;$$

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega \frac{\lambda_2(|F|^2 + 2\lambda_1)|F|}{[|F|^8 - \lambda_2^2(|F|^2 + \lambda_1^2)]|F|} d\omega = \theta_{пр}(\omega_2 - \omega_1);$$

Рассмотрим некоторые частные случаи полученного решения.

1. Отсутствуют ограничения на площадь усиления $\lambda_1 = 0$.

При этом

$$\varphi_{0,0} = \alpha\omega + \frac{1}{2} \arcsin \frac{\lambda_2}{|F|^2};$$

$$K_{0,0} = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda_2^2}{|F|^4}}}{2}}$$

Если дополнительно $\lambda_2 = 0$ (отсутствуют ограничения на точность реализации частотных характеристик), то $\varphi_{o.o} = \alpha\omega$, $K_{o.o} = 1$, т. е. переходим к неискажающей цепи, имеющей нулевую среднеквадратичную погрешность $I_0 = 0$. Графики, представленные на рис. 14, иллюстрируют этот случай.

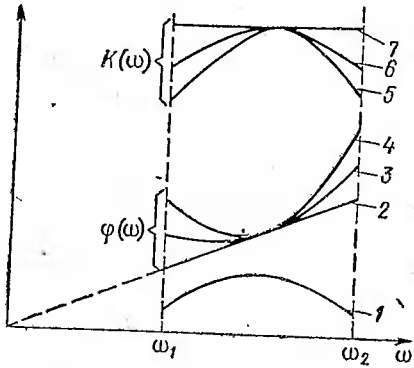


Рис. 14. Оптимальные частотные характеристики для $\lambda_1 = 0$.

1 — энергетический спектр сигнала; 2, 3, 4 — фазочастотные характеристики; 5, 6, 7 — амплитудно-частотные характеристики; кривым 4, 5 соответствует λ_2' ; кривым 2, 3, 6 — λ_2'' , $\lambda_2' > \lambda_2'' > \lambda_2''' = 0$, кривым 2, 7 — λ_2''' .

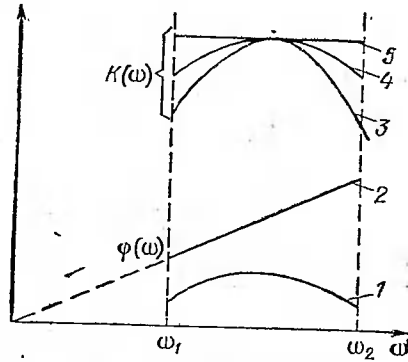


Рис. 15. Оптимальные частотные характеристики для $\lambda_2 = 0$.

1 — энергетический спектр сигнала; 2 — оптимальная фазовая характеристика, не зависящая от энергетических ограничений; 3, 4, 5 — оптимальные амплитудно-частотные характеристики, соответствующие различным λ_1 . Кривой 3 соответствует λ_1' , кривой 4 — λ_1'' , кривой 5 — $\lambda_1''' = 0$, $\lambda_1' > \lambda_1'' > \lambda_1'''$.

2. При $\lambda_2 = 0$ фазочастотная характеристика линейна.

$$\varphi_{o.o} = 0; \quad \varphi_{o.o}(\omega) = \alpha\omega,$$

а амплитудно-частотная

$$K_{o.o} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\lambda_1}{2|F|^2} + \frac{\lambda_1^2}{4|F|^4}}}$$

При малом λ_1 , т. е. при $1 > \lambda_1/2 |F|^2 \gg \lambda_1^2/4 |F|^4$:

$$K_{o.o} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{2|F|^2}} \approx 1 - \frac{\lambda_1}{4|F|^2}.$$

При большом λ_1

$$K_{o.o} \approx \frac{2|F|^2}{\lambda_1}.$$

Графики, приведенные на рис. 15, иллюстрируют полученные решения. Используя их, можно определить минимальные среднеквадратичные погрешности при наложенных ограничениях.

В общем случае среднеквадратичная погрешность при оптимальных частотных характеристиках определится как

$$\Delta = I_0(K_{o.o}, \varphi_{o.o}) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \|F(\omega)\|^2 |1 - K_{o.o} e^{j\varphi_{o.o}}|^2 d\omega. \quad (9)$$

Расчет частотных характеристик тракта регистрации обычно производят при заданном спектре сигнала $|F|(\omega)$, среднеквадратичной погрешности Δ и коэффициенте усиления при заданной полосе $K_m \pm \Delta K$ для полосы (ω_1, ω_2) . Требования к коэффициенту усиления и полосе позволяют определить значение C_1 из формулы (2). Задаваясь набором значений $\theta_{пр}$, можно определить из выражения (9) по $F(\omega)$, C_1 и $\theta_{пр}$ набор значений Δ . Условие

$$I_0(\theta_{пр}) \leq \Delta$$

определяет минимально допустимое качество пассивных элементов, обеспечивающее достаточно малую среднеквадратичную ошибку.

Таким образом, при учете ограничений на реализацию оптимальных частотных характеристик тракта регистрации определяются не условиями неискаженной передачи, а условиями компенсации взаимных нелинейностей частотных характеристик.

В настоящее время регистрация сигналов дельфина осуществляется в основном двумя методами: запись сигналов на экран осциллографа с памятью; запись сигналов на магнитную ленту с помощью ультразвукового магнитофона.

Рассмотрим осциллографический метод регистрации. Устройство имеет полосу пропускания 10—280 кГц с неравномерностью АЧХ 4 дБ. В устройстве применены непосредственная регистрация сигнала, принятого широкополосным гидрофоном, на экране электронно-лучевого осциллографа с памятью и фотографирование его с экрана с помощью скоростной электрической фотокамеры.

Для неискаженного воспроизведения формы сигнала на экране осциллографа, в частности переднего фронта, необходимо опережать момент запуска горизонтальной развертки по отношению к моменту появления сигнала.

Для этого устройство выполняется двухканальным. Первый канал (синхронизирующий) служит для формирования сигнала развертки; второй (регистрирующий) — для регистрации сигнала. Синхроимпульс, опережающий регистрируемый сигнал, снимается с дополнительного гидрофона при непосредственной регистрации [51] или дополнительной магнитной головки воспроизведения при регистрации на осциллограф с магнитофона. Синхронизирующие гидрофон или головка воспроизведения расположены перед регистрирующим гидрофоном или основной магнитной головкой воспроизведения. В результате такого взаимного расположения и образуется временной сдвиг. Синхронизирующий канал может быть и узкополосным.

При необходимости в устройстве может быть применен один гидрофон. В этом случае принятый сигнал осуществляет запуск горизонтальной развертки и через электромагнитную линию задержки поступает на осциллограф с памятью. Неравномерность АЧХ линии при задержке сигнала на 30—40 мкс в диапазоне частот 10—200 кГц не превышает 4 дБ. Искажением принимаемого сигнала в этом случае можно пренебречь.

Применение осциллографа с памятью необходимо для удовлетворительного фотографирования сигнала. Обычно осциллографы с послесвечением экрана (например, С1-30) не могут использоваться, так как время нахождения сигнала на экране осциллографа при регистрации в реальном масштабе времени составляет десятки микросекунд. Это вызывает слабое свечение люминофора, и применение даже высокочувствительной фотопленки для фотографирования не дает положительных результатов.

Выше было показано, что дельфины излучают гидроакустические сигналы сериями. Длительность серии изменяется от сотен микросекунд до единиц секунд в зависимости от сложности опыта. Частота излучений в серии колеблется от 20 до 200 Гц. Быстродействие камеры ограничено 5 Гц, поэтому она не позволяет регистрировать каждый импульс в серии.

Для согласования быстродействия камеры с частотой появления сигнала на экране осциллографа в устройстве имеется синхронизатор, выделяющий из серии импульсов животного 32, 64, 128, 256-й импульсы в зависимости от изменения их частоты излучения. Так как изображение на экране осциллографа появляется с частотой срабатывания синхронизатора, то фотокамера будет регистрировать только импульсы, кратные вышеприведенной последовательности чисел. Это приводит к потере информации.

Однако, как показали результаты работы [10], параметры импульса мало изменяются от импульса к импульсу и имеют значительную корреляцию в различных участках серии. Так как между моментом появления импульса на экране осциллографа и открыванием объектива фотокамеры проходит время, определяемое электронной схемой, то следует на это время запоминать регистрируемый сигнал. Это подтверждает необходимость применения электронно-лучевой трубки с памятью.

Структурная схема двухканального устройства приведена на рис. 16. Сигналы, излучаемые животными, принимаются гидрофоном первого канала и через усилитель поступают на вход синхронизатора. Синхронизатор выделяет из поступающих сигналов каждый 2-й импульс и осуществляет формирование импульса, запускающего горизонтальную развертку осциллографа. Второй канал является регистрирующим. По нему задержанный сигнал поступает на осциллограф и запоминается на экране электронно-лучевой трубки, что позволяет без искажения воспроизводить передний фронт сигнала. После записи сигнала изображение фотографируется и затем стирается с экрана осциллографа. Уст-

ройство стирания предусмотрено в схеме осциллографа. Управление работой фотокамеры и устройством для стирания производится синхронизатором.

Описанная схема позволяет повысить помехозащищенность приемного канала от окружающих источников сигналов, что важно, например, при одновременном излучении сигналов несколькими животными. Если животное, излучающее сигналы которого записываются, находится на линии расположения гидрофонов, то фронт падающей волны вначале достигает синхронизирующего

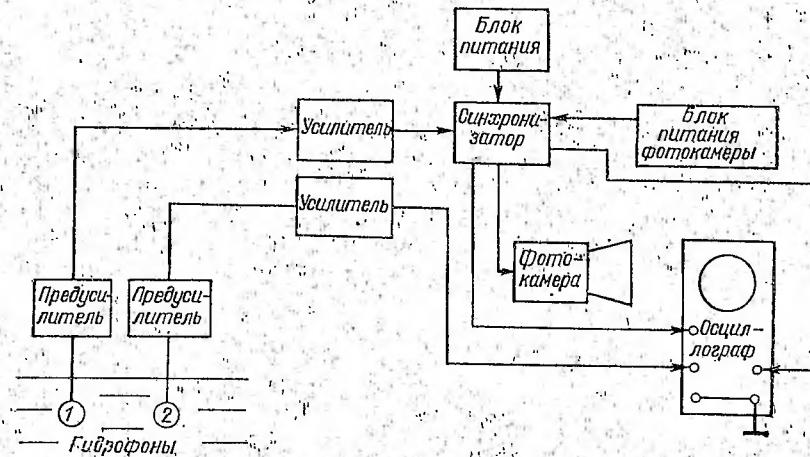


Рис. 16. Схема двухканального устройства регистрации.

канала, затем регистрирующего. На экране осциллографа регистрируемый импульс будет смещен относительно начала развертки. При расположении источника сигнала сбоку от линии гидрофонов фронт волны может одновременно достигать гидрофонов обоих каналов или даже гидрофона регистрирующего канала раньше, чем синхронизирующего. В этом случае сигнал не будет наблюдаться на экране осциллографа.

В синхронизирующем канале может использоваться узкополосный направленный гидрофон. В регистрирующем канале гидрофон должен быть широкополосным. Амплитудно-частотная характеристика регистрирующего тракта показана на рис. 17. В качестве индикатора использован осциллограф с памятью типа С1-29. Регистрация сигналов осуществлена фотокамерой типа РФК-1М.

Управление работой отдельных элементов устройства регистрации выполнялось синхронизатором, функциональная схема которого приведена на рис. 18.

Импульсный сигнал с выхода усилителя поступает на ограничитель-формирователь, который представляет собой пороговое

устройство с регулируемым уровнем. При превышении входным напряжением выбранного порога схема срабатывает, выдавая стандартный импульс прямоугольной формы. Проведенный анализ последовательностей, отснятых на кинолентку импульсов,

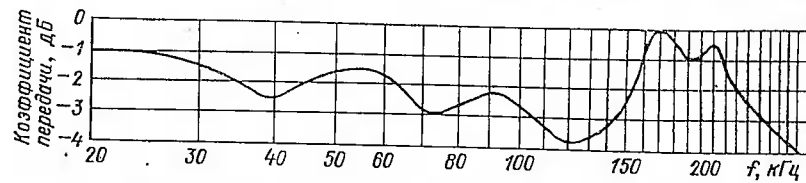


Рис. 17. Частотная характеристика регистрирующего тракта.

показывает, что отношение сигнал/шум по напряжению при работе животного в открытом вольере составляет не менее 8—10. Поэтому пороговая схема позволяет достаточно четко выделять гидролокационные импульсы из шумов.

После приема основного импульсного сигнала гидрофон принимает многочисленные отражения этого сигнала от поверхности

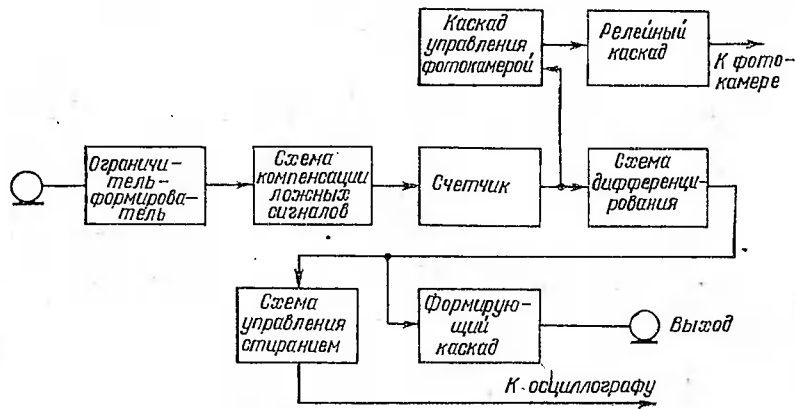


Рис. 18. Схема синхронизатора.

воды (возможно отражение от ближайших объектов). Эти мешающие сигналы расположены вблизи регистрируемого импульса. Для исключения влияния таких помех на работу последующего каскада синхронизатора импульс формирователя запускает схему компенсации ложных сигналов. Схема, формируя импульс длительностью 1,5 мс, на это время становится нечувствительной ко всем запускающим импульсам, присутствующим на ее входе.

Зондирующий сигнал животного поступает на приемный гидрофон первым и, даже если ложные отражения формируют сигнал на выходе ограничителя, не проходит к последующему

каскаду. Длительность 1,5 мс установлена экспериментально и является достаточной, чтобы избавиться от указанных помех.

Импульсы считаются восьмиразрядным двоичным счетчиком, работающим до заполнения. Изменение (уменьшение) емкости счетчика (и тем самым изменение номера выбранного импульса) осуществляется переключением количества разрядов. После заполнения счетчик выдает сигнал в виде положительного перепада напряжения, который дифференцируется, усиливается и запускает схему формирующего каскада.

Формирующий каскад вырабатывает импульс запуска развертки осциллографа. Одновременно сигнал с выхода счетчика

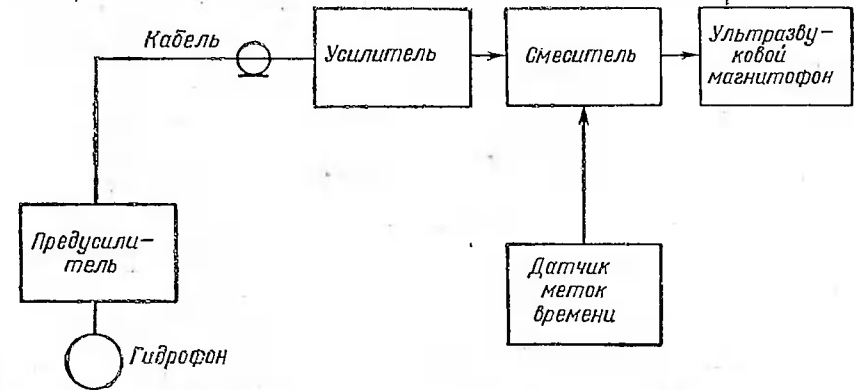


Рис. 19. Схема тракта регистрации на магнитофон.

подается на первый вход канала (каскада управления фотокамерой). На второй вход канала сигнал с третьего разряда счетчика поступает через 8 периодов повторения сигналов в серии. Релейный каскад схемы управления подает управляющее напряжение +27 В на электродвигатель фотокамеры. Камера осуществляет съемку и перемотку последующего кадра. Сигнал с выхода формирующего каскада задерживается в схеме управления стиранием на время, большее цикла работы фотокамеры (съемка и перемотка кадра), и затем поступает в осциллограф на схему стирания.

Рассмотрим магнитофонный метод регистрации. Структурная схема устройства представлена на рис. 19. Она состоит из следующих основных элементов: гидрофона, согласующего устройства (предусилителя), соединительного кабеля, оконечного усилительного устройства, магнитофона и контрольного устройства, состоящего из наушников и осциллографа.

Инвариантность регистрируемых сигналов по направлению обеспечивалась применением сферического (ненаправленного) гидрофона, изготовленного из титаната бария.

Согласование гидрофона с кабелем и предварительное усиление сигнала осуществлялись с помощью предусилителя, смонтированного в отдельном корпусе.

Для регулировки коэффициента усиления тракта и согласования кабеля с входным сопротивлением магнитофона включался оконечный усилитель со ступенчатой регулировкой усиления (14—62 дБ).

Запись сигналов производилась с помощью ультразвукового магнитофона типа МУЗ-М25 с полосой пропускания 100 кГц и неравномерностью АЧХ 5 дБ.

Одновременно с записью сигналов на магнитную ленту подавались с помощью специального датчика метки дальности, определяющие расстояние дельфина до исследуемого объекта.

Сравнивая оба вышеописанных метода регистрации сигналов дельфина, следует отметить их достоинства и недостатки.

Метод магнитофонной записи позволяет производить регистрацию сигналов дельфинов в полосе до 100 кГц непрерывно в течение длительного интервала времени — до 10—13 мин. При осциллографическом методе возможна регистрация лишь отдельных сигналов, но в полосе до 280 кГц. Непрерывная регистрация необходима для получения данных об изменении сигналов в зависимости от условий работы во времени. Для увеличения точности воспроизведения сигналов при магнитофонной записи можно применить коррекцию.

Основные соотношения для расчета корректора получаются при следующих условиях. Пусть на вход корректора подается сигнал, искаженный трактом регистрации, в смеси с аддитивным шумом. Пусть также корректор обладает ограниченной площадью усиления, что необходимо для обеспечения устойчивости схемы. Тогда коэффициент передачи устройства, минимизирующего среднеквадратичную погрешность на выходе компенсатора, определяется как

$$K(f) = \frac{K_c(f) K_{\tau}^*(f) e^{-2j\pi T f}}{|K_{\tau}(f)|^2 K_c(f) + K_{\text{ш}}(f) + \lambda}, \quad (10)$$

где

$$K_c(f) = \Phi \{K_c(t)\}; \quad K_{\tau}(f) = \Phi \{K_{\perp \tau}(t)\};$$

$$K_{\text{ш}}(f) = \Phi \{K_{\text{ш}}(t)\};$$

$K_c(f)$, $K_{\text{ш}}(f)$ — спектральные плотности сигнала и шума; $K_c(t)$ и $K_{\text{ш}}(t)$ — автокорреляционные функции сигнала и шума; $K_{\perp \tau}(t)$ — импульсная характеристика тракта регистрации; $\Phi \{ \cdot \}$ — символ преобразования Фурье; T — задержка; λ — множитель Лагранжа, определяемый из решения нелинейного интегрального уравнения связи.

Условия ограничения площади усиления

$$\int_{-\infty}^{\infty} |K(f)|^2 df = C_0 = \text{const.}$$

С уменьшением C_0 при прочих равных условиях множитель λ возрастает. При малом шуме и отсутствии ограничений на площадь усиления корректора, т. е. при

$$|K_{\tau}(f)|^2 K_c(f) \gg |K_{\text{ш}}(f) + \lambda|$$

из формулы (10) получим

$$K_o(f) \approx \frac{e^{-2j\pi T f}}{K_{\tau}(f)}$$

Таким образом, коэффициент передачи оптимального корректора в этом случае обратно пропорционален коэффициенту передачи тракта.

При учете ограничений на площадь усиления значения λ может быть велико. Когда $\lambda \gg |K_{\tau}(f)|^2 K_c(f) + K_{\text{ш}}(f)$

$$K_o(f) \approx \frac{K_c(f)}{\lambda} K_{\tau}^*(f) e^{-2j\pi T f}$$

В этом случае коэффициент передачи оптимального корректора будет зависеть как от коэффициента передачи тракта регистрации, так и от спектра сигнала. При характеристике тракта регистрации в виде дробно-рациональной функции оптимальный корректор может быть реализован разветвленной цепью (см. приложение).

Кроме решения в частотной плоскости можно получить решение и во временной плоскости. Так формула (10) во временной плоскости соответствует

$$U_1(t) = \int_0^t g_{\perp}(\tau) U_2(t-\tau) d\tau, \quad (11)$$

где $g_{\perp}(\tau) = L^{-1} \{K_o(f)\}$ — импульсная характеристика корректора; $U_1(t)$ — сигнал на выходе корректора; $U_2(t)$ — сигнал на входе корректора.

Метод точного аналитического решения может быть применен только в отдельных случаях [12]. Более общим является приближенный метод непрерывной кусочно-линейной аппроксимации

$$g_{\perp}(t) = \sum_{i=0}^N R(t - i\tau_0)$$

В частном случае кусочно-линейной аппроксимации

$$g_{\perp}(t) = \sum_{i=0}^N a_i \sigma(t - i\tau_0), \quad (12)$$

$$a_i = \int \delta(t) dt,$$

где δ — функция Дирака.

Подставляя $g_{\perp}(t)$ из формулы (12) в (11) и произведя преобразования, получаем

$$U_2^*(t) = \sum_{i=0}^N a_i U_1(t - i\tau_0). \quad (13)$$

Полагая $a_0 = 1$, из уравнения (13) получаем

$$U_1(t) = U_2^*(t) - \sum_{i=1}^N a_i e^{-p i \tau_0}. \quad (14)$$

После преобразования этого выражения в комплексную плоскость для нулевых начальных условий имеем

$$U_2(p) p^2 = U_1(p) \sum_{i=0}^N a_i e^{-p i \tau_0}.$$

Полагая $a_0 = 1$, получаем

$$U_1(p) = \frac{U_2(p) p^2}{1 + \sum_{i=1}^N a_i e^{-p i \tau_0}}. \quad (15)$$

Этому решению, а также решению (14) соответствует схема разветвленной цепи общего вида (рис. 20). Если

$$1 \gg \left| \sum_{i=1}^N a_i e^{-p i \tau_0} \right|, \text{ т. е. } p \rightarrow \infty, t \rightarrow 0,$$

из выражения (15) можно получить приближенное

$$U_1(p) \approx U_2(p) p^2 \left(1 - \sum_{i=1}^N a_i e^{-p i \tau_0} \right) \quad (16)$$

или во временной плоскости при нулевых начальных условиях

$$U_1(t) \approx U_2^*(t) - \sum_{i=1}^N a_i U_2(t - i\tau_0). \quad (17)$$

Выражения (16) и (17) соответствуют схеме трансверсального фильтра (рис. 21) — частного случая разветвленной цепи.

Преимуществом схемы, приведенной на рис. 21, по сравнению со схемой, представленной на рис. 20, является ее большая устойчивость. В качестве дифференцирующих устройств ввиду небольшой частоты были применены RC -ячейки. Для больших частот рациональнее применять разветвленные дифференцирующие цепи. На рис. 22 приведен сигнал на выходе магнитофона — на входе корректора, на рис. 23 — на выходе корректора.

Как показывает эксперимент, погрешность регистрации сигналов дельфинов с корректором после магнитофона МУЗ-М25 составляет меньше 5%, что соответствует расширению эквивалентной полосы пропускания до 250 кГц.

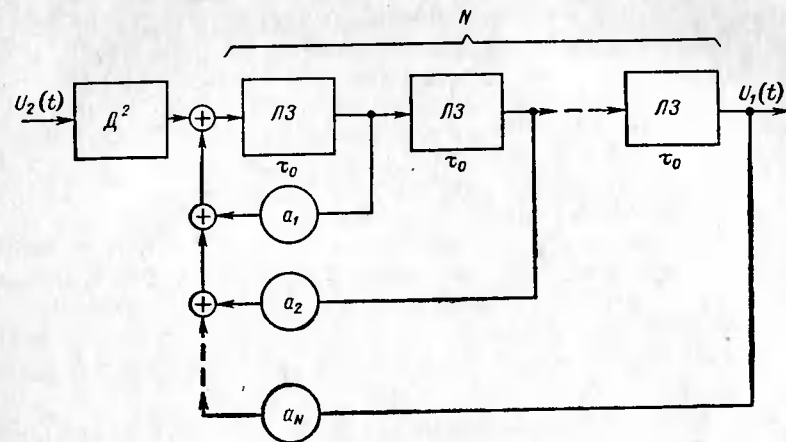


Рис. 20. Схема корректора на разветвленной цепи.

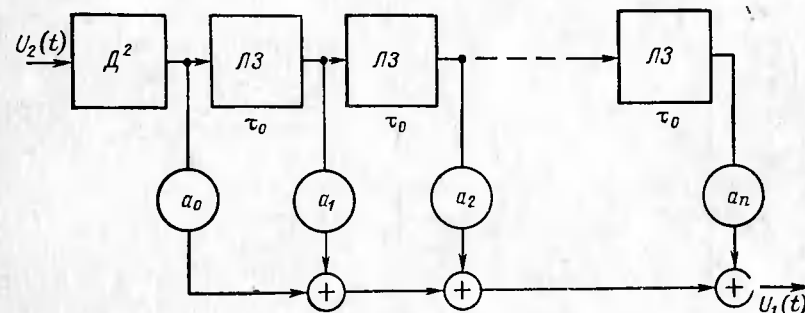


Рис. 21. Схема корректора на трансверсальном фильтре.
 D^2 — блок двойного дифференцирования; ЛЗ — блок задержки на время τ_0 .

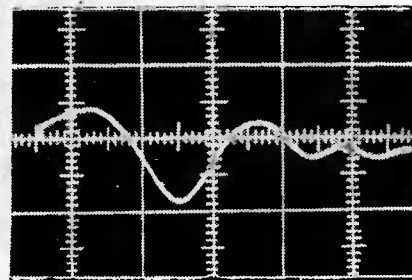


Рис. 22. Сигнал на входе корректора.
Масштаб развертки 10 мкс/дел.

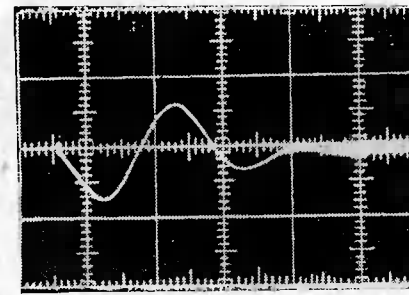


Рис. 23. Сигнал на выходе корректора.
Масштаб развертки 10 мкс/дел.

Таким образом, применение корректора позволяет приблизить по точности магнитофонный метод регистрации к осциллографическому при сохранении возможности непрерывной регистрации. Как видно из вышеизложенного, при регистрации сигналов дельфинов (как и других биологических сигналов) требования к регистрирующему тракту являются совершенно иными, чем, например, для телевизионных или импульсных локационных трактов. В данном случае существенна погрешность регистрации не на отдельных участках регистрируемого сигнала, а для всего сигнала. Это и определяет особенности частотных характеристик тракта регистрации, и требует проверки по вышеизложенной методике даже для традиционно применяемых схем усилительных каскадов, как, например, для усилителей с коррекцией m .

§ 3. Классификация сигналов по задачам локации

В результате эволюции локационный аппарат морских животных получил существенное развитие [60]. В частности, дельфин приобрел способность использовать различные

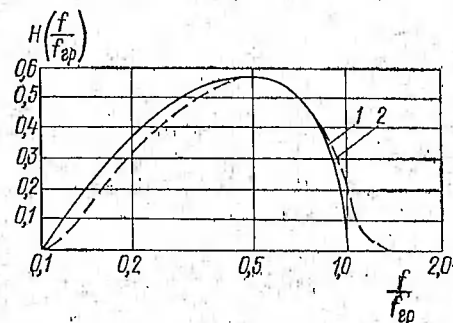


Рис. 24. Частотные характеристики приемника гидролокатора дельфина. 1 — аппроксимированная характеристика; 2 — истинная характеристика.

Регистрация сигналов производилась на магнитофон МП-3 с полосой пропускания 1—200 кГц. Рассматривались задачи локации точечных объектов — «светящихся» точек — с целью их обнаружения и разрешения [52, 64]. При этом полагали, что характеристика чувствительности приемника дельфина неизменна.

Комплексный спектр сигнала, оптимального для обнаружения, определяется с точностью до постоянного множителя без учета неискаженного запаздывания как [46]

$$\Phi_0(f) = H^*(f) K_B(f), \quad (18)$$

где $\Phi_0(f)$ — спектры сигнала, оптимального для обнаружения; $H(f)$ — частотная характеристика приемника дельфина, полу-

ченная из характеристик чувствительности (рис. 24); $K(f)$ — частотная характеристика акустического канала в воде.

Частотную характеристику приемника дельфина считаем оптимальной для шумов моря [46], дисперсию фазовой скорости — пренебрежимо малой [12]. Другие ограничения полагаем отсутствующими.

Аппроксимирующая функция $H\left(\frac{f}{f_{гр}}\right)$ приведена на рис. 24 (кривая 1), где $f_{гр}$ принята равной 100 кГц. Для малых фиксированных расстояний $K_B(f)$ можно принять постоянной

$$K_B(f) = c = \text{const}, \quad (19)$$

т. е. спектр сигнала определяется из выражения (18) при аппроксимации (19) как

$$\Phi_0(f) \approx \Phi_{0.a}(f) = cH_a(f). \quad (20)$$

Акустический сигнал, распространяющийся в воде, $\Phi_{0.a}(t)$, состоит из четной и нечетной компонент и, следовательно, может быть определен [46] через синус- и косинус-преобразования Фурье

$$\Phi_0(-t) \approx \Phi_{0.a}(-t) = S\{\Phi_0(f)\} + C\{\Phi_{0.a}(f)\}. \quad (21)$$

Из выражения (21) с учетом (18) и (20) получим

$$\Phi_{0.a}(-t) \approx \frac{\pi c}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{S_0(\omega_{гр}t)}{\omega_{гр}t} + \frac{J_0(\omega_{гр}t) - 1}{\omega_{гр}t} \right), \quad (22)$$

где $\omega_{гр} = 2\pi f_{гр}$; $S_0(t)$ — функция Струве; $J_0(t)$ — функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка.

График $\Phi_{0.a}(t)$ приведен на рис. 25 (кривая 1); кривая 2 обозначает сигнал дельфина, полученный во время физиологических экспериментов. Расчеты показали, что с увеличением дальности до цели оптимальные сигналы обнаружения становятся более низкочастотными в результате увеличения затухания в среде. Форма же сигналов изменяется мало [12].

Комплексный спектр оптимального сигнала для задачи разрешения при достаточно большом отношении сигнал/шум на входе приемника определяется [46] при тех же условиях, что и для (18):

$$\Phi_H(f) = \frac{1}{H(f) K_B(f)}. \quad (23)$$

Полагая вондирующий сигнал однополосным, можно применить аппроксимацию высокочастотной части спектра сигнала

$$\Phi_H(f) \approx \Phi_{H.a}(f) = \begin{cases} \left(\frac{f}{f_{гр}}\right)^3 \arccos \frac{f}{f_{гр}} & \text{при } 0 < f < f_{гр}; \\ 0 & \text{при } f > f_{гр}. \end{cases} \quad (24)$$

Из выражений (23) и (24) можно определить оптимальный сигнал разрешения

$$\Phi_H(t) \approx \Phi_{H.a}(t) = \frac{\pi c}{2} \frac{d^3}{dt^3} \left[\frac{S_0(\omega_{гр}t)}{\omega_{гр}t} + \frac{J_0(\omega_{гр}t) - 1}{\omega_{гр}t} \right].$$

Зависимость $\varphi_{0.а}(t)$ приведена на рис. 26 (кривая 1); кривая 2 обозначает реальный сигнал дельфина.

Значения среднеквадратичных отклонений расчетного сигнала от реального сигнала дельфина определялись по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon^2}{n}},$$

где ε — отклонение расчетного сигнала от реального по амплитуде; n — число отсчетов.

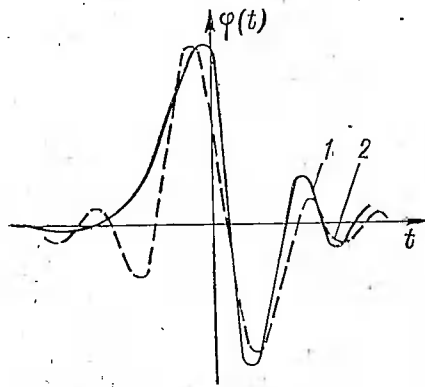


Рис. 25. Оптимальный сигнал для обнаружения.

1 — реальный сигнал дельфина; 2 — расчетный сигнал.

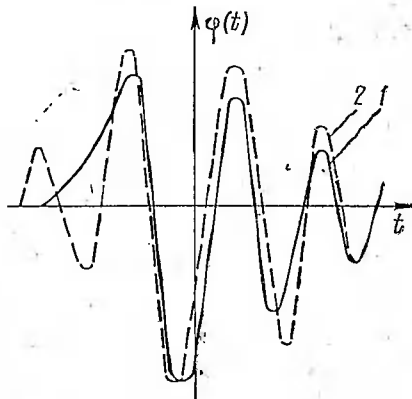


Рис. 26. Оптимальный сигнал для измерения параметров цели.

1 — реальный сигнал дельфина; 2 — расчетный сигнал.

При сравнении сигналов обнаружения (см. рис. 25) среднеквадратичное отклонение составляет 17%, при сравнении сигналов разрешения (см. рис. 26) — 21%. Эти величины лежат в пределах погрешности, определяемой ограничениями полосы пропускания магнитофона и искажениями в осциллографе.

Таким образом, можно утверждать, что выбранные сигналы дельфинов относятся к двум различным классам — задачам локации: обнаружению и разрешению. Это позволяет сделать выводы о возможности классификации сигналов дельфинов с точки зрения технических задач гидроакустики.

Полученные данные являются предварительными, но они могут служить исходным материалом для оптимизации зондирующих сигналов и гидроакустического канала в целом.

§ 4. Адаптивность сигналов

Понятие адаптации в биологии имеет двойственное значение. Иногда под адаптацией подразумевается наличие выработанных в результате эволюции благоприятных приспособлений

для условий обитания. В этом случае понятие адаптации оказывается эквивалентным понятию целесообразности или согласованности структуры и образца действия биологического объекта в условиях его существования. В других случаях, как, например, по мнению Лабутина В. К., адаптация определяется как автоматическое изменение характеристик или способа функционирования системы, направленное на повышение ее эффективности.

Ниже рассматривается изменение параметров зондирующих сигналов при изменении дальности до цели и виде предъявляемых мишеней. Например, при увеличении внешнего шума для малых уровней шума дельфин производит только увеличение интенсивности сигнала, т. е. действует методом «силового пробы»; при больших уровнях шума происходит изменение вида сигнала.

Большинство исследователей считает, что для дельфинов всех видов характерно увеличение частоты следования локационных сигналов по мере приближения животного к цели. У белухи, например, частота следования увеличивается с 15 до 250 Гц. В опытах Норриса [72] отмечалось изменение частоты следования от 16 до 190 Гц. Однако позднее Норрис [37] изменил свое мнение о строгом увеличении частоты при приближении дельфинов к цели. Он писал, что частота следования сигналов не увеличивается строго монотонно. Когда дельфин приближается к цели, частота изменяется обычно немонотонно и, по-видимому, связана с точностью различения. При малой точности различения излучается незначительное число сигналов, в то время как задачи точного различения (трудные задачи) вызывают увеличение частоты следования до 1200 Гц. Частота следования увеличивается животным иногда и в начале пути, возможны случаи увеличения частоты следования и в произвольном месте на дистанции. Это происходит, по-видимому, потому, что дельфин во время движения производит облучение и побочных целей.

В результате большого числа экспериментов, проводимых по методике двигательно-пищевых условных рефлексов, было показано, что при четком различии мишеней период повторения зондирующих импульсов дельфинов оказывается всегда больше времени, необходимого для распространения звука в прямом и обратном направлениях до цели.

Средняя разность между периодом повторения сигналов и временем прохождения звуком двойной дальности до цели в опытах, проводимых по методу поочередного предъявления мишеней, составляет 30 мс на расстояниях между дельфином и мишенью не менее 2,5 м, тогда как в опытах с одновременным предъявлением мишеней, эта разность составляла 10 мс при расстоянии между дельфином и мишенью не менее 4 м.

На рис. 27 приведены графики зависимости среднего периода повторения импульсов от расстояния до мишени. Вертикальными отрезками обозначен разброс в периоде повторения сигналов.

На рис. 28 представлены зависимости средней разности указанных временных промежутков от расстояния до мишени. Зависимости периода повторения сигналов дельфинов были получены

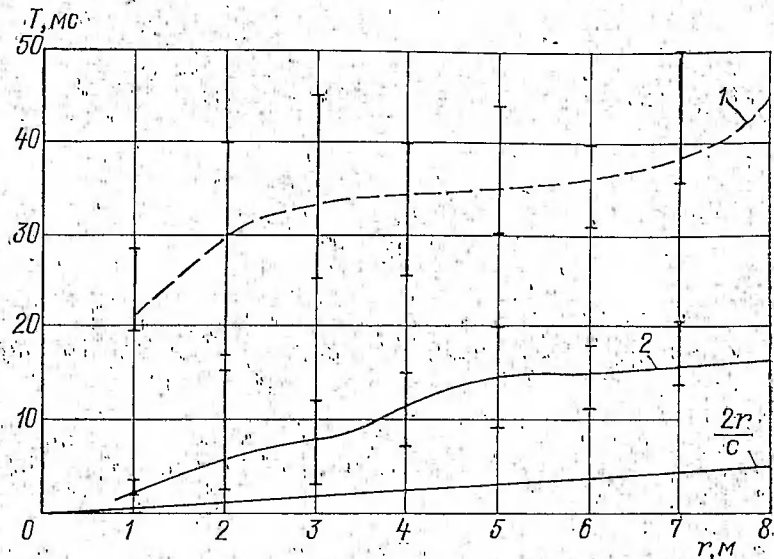


Рис. 27. Зависимость среднего периода повторения импульсов от расстояния до мишени.

1 — последовательное предъявление; 2 — одновременное предъявление.

при решении задачи распознавания мишеней, когда дельфин проходил всю дистанцию. Длина дистанции была порядка 10 м.

Представляет интерес исследовать этот вопрос в условиях, когда дельфин обнаруживал или различал мишени, не проходя всю дистанцию.

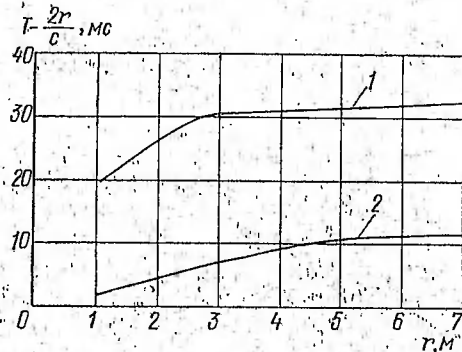


Рис. 28. Зависимость разности между периодом повторения сигналов дельфинов и временем прохождения звуком двойного расстояния до мишени.

1 — последовательное предъявление; 2 — одновременное предъявление.

шал задачу ее обнаружения. Дельфин, обнаруживший мишень, получал пищевое подкрепление.

Регистрация сигналов производилась широкополосной измерительной аппаратурой с записью на магнитофонную ленту. Ультразвуковой магнитофон МП-3 обеспечивал регистрацию сигналов в полосе до 200 кГц. Гидрофон размещался вне вольера

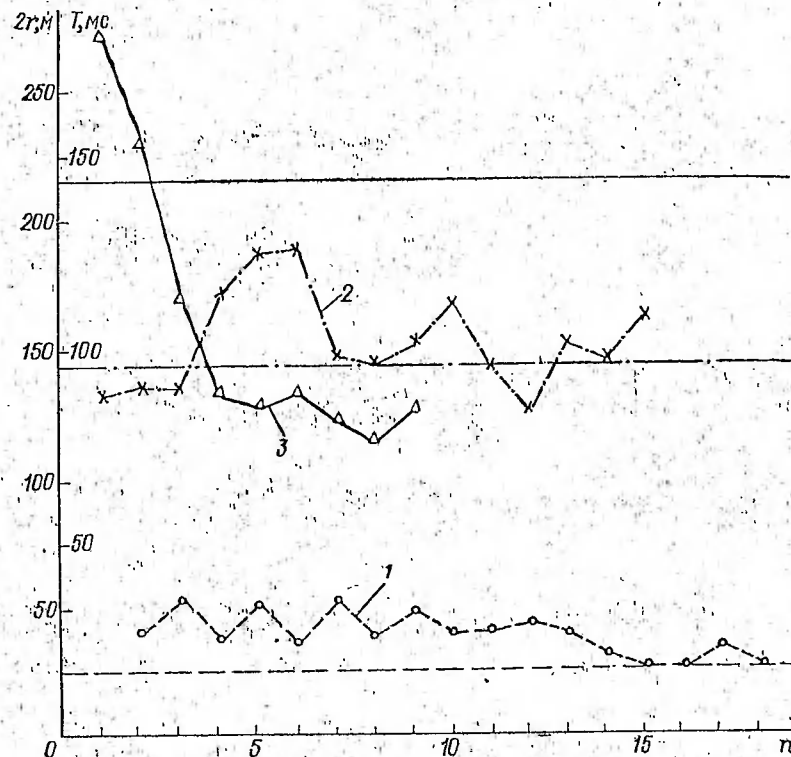


Рис. 29. Изменение периода повторения импульсов при обнаружении дельфином шара.

1 — дальность до мишени 13 м; 2 — 72 м; 3 — 108 м.

на расстоянии 2 м от сети так, чтобы стартовая позиция, гидрофон и мишень были расположены на одной линии. Записанные на магнитофон локационные сигналы дельфинов ватем воспроизводились с замедлением на магнитофоне «Астра-4». При обработке сигналов, зарегистрированных в этом опыте, исследовалось изменение периода повторения локационных сигналов в серии. На рис. 29 приведены зависимости периода повторения от номера импульса в серии. Для сравнения с периодом повторения импульсов на этом рисунке показано время прохождения звуком двойной дальности до цели.

В результате обработки всех выпусков сигналов, в которых была зафиксирована положительная реакция дельфина на раздражитель, установлено:

1. Дельфин увеличивает период повторения импульсов при увеличении дальности до цели.

2. Изменение периода повторения от импульса к импульсу происходит не систематически.

3. При расстояниях до мишени, превышающих 70 м, в последовательности сигналов встречаются периоды между сигналами, меньшие, чем время прохождения звуком локационной дистанции. Реакция животного в этих случаях оставалась по-прежнему положительной. Возможно, что дельфин часть времени использует для облучения близко расположенных целей.

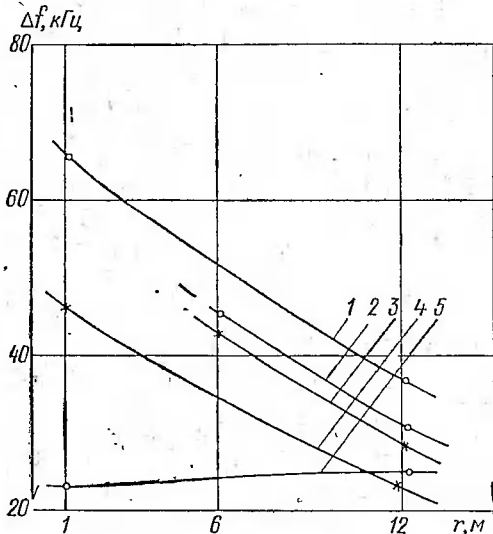


Рис. 30. Зависимость ширины главного лепестка спектра зондирующего сигнала дельфина от расстояния до мишени.

1, 2 — дифференцировка латунных шаров диаметром 50 и 80 мм; 3, 4 — дифференцировка латунных шаров диаметром 10 и 20 мм; 5 — дифференцировка алюминиевого и латунного шаров диаметром 80 мм.

Адаптивный характер гидролокационного аппарата дельфина при изменении расстояния до лоцируемого объекта обнаруживается не только в изменении периода повторения сигналов. Изучение спектров зондирующих локационных сигналов дельфинов позволило установить, что спектр сигналов расширяется по мере приближения дельфина к мишени. На рис. 30 представлены графики зависимости ширины амплитудного спектра сигналов на уровне 0,7 от расстояния до лоцируемого объекта.

Из рисунка видно, что по мере приближения животного к лоцируемому объекту ширина модуля амплитудного спектра увеличивается. Это увеличение можно объяснить тем, что имеет место

При расстояниях до мишени, больших, чем 90—100 м, дельфин не обнаруживал предъявляемую мишень. Реакция была отрицательной. Периоды повторения сигналов в этих выпусках были меньше, чем время прохождения звуком локационной дистанции. Опыты, аналогичные вышерассмотренным, были проведены Уитлоу и др. Период следования сигналов дельфинов при обнаружении шара на дистанции 80—90 м были всегда больше времени прохождения звуком локационной дистанции.

Адаптивный характер гидролокационного аппарата дельфина при изменении расстояния до лоцируемого объекта обнаруживается не только в изменении периода повторения сигналов.

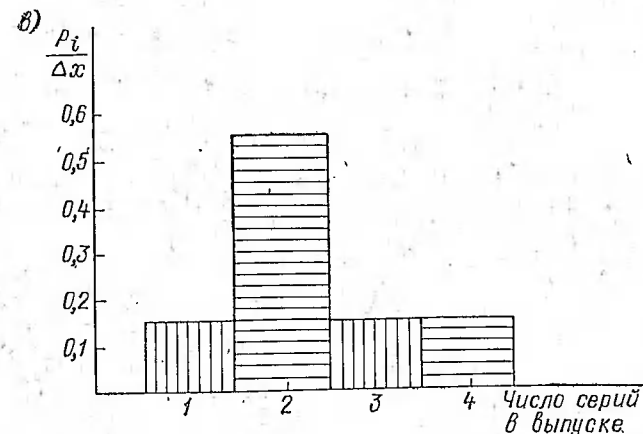
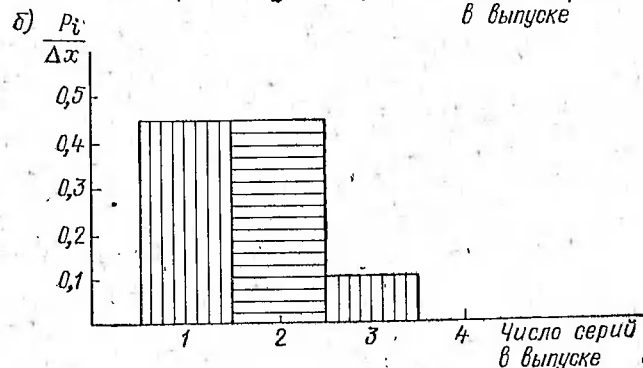
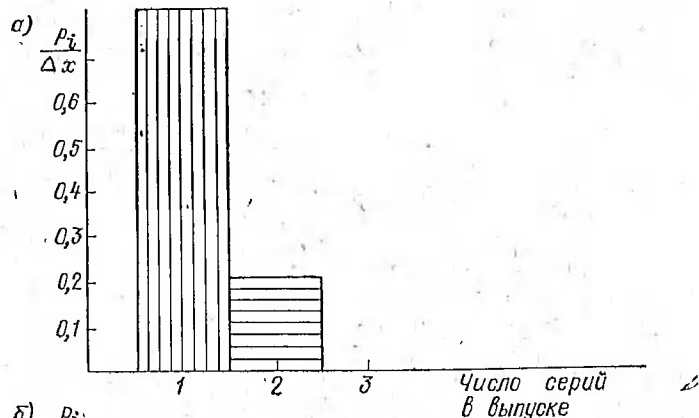


Рис. 31. Зависимость числа серий импульсов в выпуске от различия в мишенях: а — различие в мишенях 19 мм; б — 14 мм; в — 9 мм.

адаптация гидролокатора дельфина к расстоянию до обнаруживаемого объекта. Если со стартовой позиции дельфин решает задачу обнаружения, то, приближаясь к мишени, он должен решить задачу классификации. Использование более широкополосных сигналов позволяет дельфину получить информацию не только о расстоянии до мишени и ее местоположении, но и ее параметрах (материале и размерах).

По мере приближения дельфина к мишени наблюдается тенденция к уменьшению длительности локационных импульсов, что, естественно, согласуется с предыдущим утверждением. Хотя изменение зондирующего сигнала, посылаемого дельфином на цель, при изменении условий локации в настоящее время можно считать установленным фактом, однако неизвестно, в результате чего происходит это изменение: из-за самого зондирующего сигнала или поворота головы, так как зондирующий сигнал дельфина имеет ракурсную зависимость.

При изменении вида мишени и усложнении опыта изменяются некоторые другие параметры зондирующих сигналов дельфинов. Так, в выше рассмотренных экспериментах обнаружено увеличение числа серий зондирующих импульсов в зависимости от сложности задачи. Это иллюстрирует рис. 31. Адаптивные свойства гидролокатора дельфина проявлялись также в изменении среднего числа сигналов в серии в зависимости от метода проведения опыта. При одновременном предъявлении мишеней среднее число сигналов в серии было значительно больше, чем при одной.

В работе [22] описаны опыты с дельфином афалиной, которые позволили авторам заключить, что дельфин изменяет параметры зондирующих сигналов в зависимости от характеристик шаров, предъявляемых ему для различения. Изменение параметров сигнала состоит в увеличении активной ширины и средней частоты спектра зондирующих сигналов при решении дельфином более трудной задачи.

В работе [47] также отмечена адаптация сигналов дельфинов к параметрам дифференцируемых объектов. При усложнении условий дифференцировки (увеличении расстояния до мишеней, предъявлении для различения более близких по изменяемому параметру мишеней) доминирующая частота в спектре увеличилась. Подобный характер изменения локационных сигналов в одинаковой степени характерен для задач по опознаванию шаров и цилиндров. Разница состоит лишь в том, что при опознавании сферических тел энергетический максимум спектра находился на частоте 69 кГц, тогда как при опознавании цилиндров — на 60 кГц.

§ 5. Оптимальные частоты

Одним из важных вопросов в активной и пассивной гидролокации является вопрос об оптимальной частоте.

Процесс формирования эхо-сигнала в гидролокации можно

рассматривать как кодирование зондирующего сигнала. В работе Фридмана [64] подробно разработана теория формирования эхо-сигнала в идеальной жидкости при отражении от жесткого тела узкополосного импульса. Эхо-сигнал состоит из ряда дискретных импульсов, каждый из которых представляет собой повторение зондирующего импульса и называется зеркальным импульсом. Зеркальный импульс создается всякий раз, когда существует разрыв непрерывности по дальности.

Работы по исследованию зондирующих импульсов дельфина показывают, что на формирование эхо-сигналов существенное

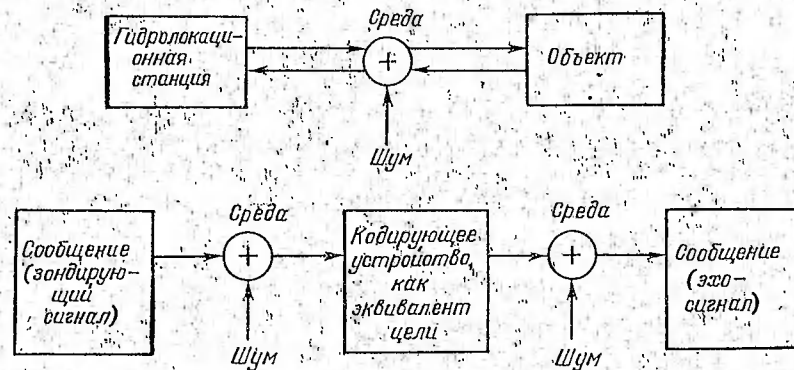


Рис. 32. Система связи как эквивалент гидролокатора.

влияние оказывают широкополосность зондирующих сигналов и упругость облучаемых объектов [42].

Работы по моделированию широкополосных импульсов в воде показывают, что эхо-сигнал от упругого тела простейшей формы (шар) представляет собой последовательность импульсов, параметры которых зависят от типа зондирующего сигнала и свойств объекта [42]. Поэтому сигнал, отраженный от объектов в воде, можно рассматривать как формирование некоторого кодового сочетания импульсов, а активный гидролокатор — как систему связи, в которой отражающий объект заменяется кодирующим устройством (рис. 32).

Для системы связи существует понятие оптимальной частоты, когда критерием оптимальности является максимальная скорость передачи информации [50]. Этим критерием оптимальности рабочей частоты воспользуемся для активной гидролокации, предполагая, что при отражении зондирующего импульса от облучаемого объекта происходит его кодирование по критерию распознаваемости или классификации. Такое кодирование связано со скоростью передачи информации об объекте.

Исходным для получения оптимальной рабочей частоты является уравнение гидролокации

$$\frac{S}{N} = (L - 2Z + T) - (N - D), \quad (25)$$

где S — отношение сигнал/шум; L — уровень излучаемого сигнала; Z — потери при распространении сигнала; T — сила цели; N — уровень шумов; D — коэффициент концентрации преобразователя.

Для упрощения расчетов были сделаны следующие допущения: шумы в среде ненаправлены; уровень шума зависит от степени волнения морской поверхности и рабочей частоты; реверберационные помехи не учитываются; цель по общей отражательной способности эквивалентна сфере.

Выражение для уровня излучаемого сигнала имеет вид [6]

$$L = 10 \lg K + 10 \lg \frac{A}{A_0} + D, \quad (26)$$

где K — удельная мощность, излучаемая 1 см² поверхности преобразователя; A_0 — площадь поверхности сферы с радиусом 1 м; A — действительная площадь поверхности излучателя.

Коэффициент концентрации преобразователя (преобразователь поршневого типа) определяется из выражения

$$D = 11 + 10 \lg \frac{A}{\lambda^2}, \quad (27)$$

где λ — длина волны.

Потери при распространении, обусловленные расширением волнового фронта и поглощением звука в воде, представляются в виде

$$Z = 20 \lg R + 60 + 0,36 f^{3/2} R, \quad (28)$$

где R — расстояние до цели.

Так как в качестве эквивалента цели по результирующей отражательной способности выбрана идеальная жесткая сфера, то сила цели определяется из выражения

$$T = 20 \lg \frac{r}{2}, \quad (29)$$

где r — радиус сферы.

Выражение для уровня шума имеет вид

$$N = N_0 - \frac{50}{3} \lg \frac{f}{f_0} + 10 \lg \gamma f + 30, \quad (30)$$

где N_0 — уровень шума на фиксированной частоте f_0 , определяемый по кривым Кнудсена; γ — коэффициент широкополосности; γf — ширина полосы частот гидролокатора.

Подставляя выражения (26)–(30) в (25), получим

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} = & 10 \lg K + 10 \lg \frac{A}{A_0} + 11 + 10 \lg \frac{A}{\lambda^2} - 40 \lg R - 120 - \\ & - 0,072 f^{3/2} R + 20 \lg \frac{r}{2} - N_0 + \frac{50}{3} \lg \frac{f}{f_0} - 10 \lg \gamma f - 30 + \\ & + 11 + 10 \lg \frac{A}{\lambda^2}. \end{aligned} \quad (31)$$

Максимальная скорость передачи информации по каналу определяется формулой Шеннона [53]:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (32)$$

где S — средняя мощность сигнала; N — средняя мощность шума.

Подставив в уравнение (32) отношение мощностей (31), получим C как функцию частоты и расстояния. Оптимальная частота находится из уравнения $dC/df = 0$. При максимальной скорости передачи информации можно получить наибольшую информацию о цели и, следовательно, наибольшие возможности для ее опознавания и классификации. Используя алгебраические преобразования, аналогичные преобразования, проведенным в работе [40], получим следующее трансцендентное уравнение:

$$\frac{x(f) \log_2 x(f)}{x(f) - 1} = 6,72 [0,0053 f^{3/2} - 1], \quad (33)$$

где

$$x(f) = 1 + \frac{S}{N};$$

$$y(f) = 1 + 10^{y(f)} K_0 A^3 f^{14/3} r^2 (R^4 \gamma A_0 f_0^{5/3} 150^4 \cdot 2^2)^{-1};$$

$$y(f) = -12,8 - 0,1 N_0 - 0,0072 f^{3/2} R.$$

Уравнение (33) решено графическим методом при следующих значениях постоянных: $K = 1/3$ Вт/см² — порог кавитации для преобразователя, расположенного вблизи свободной поверхности [6]; $N_0 = 168$ дБ относительно 1 Вт/см² при волнении моря 3 балла и $f_0 = 3$ кГц; $\gamma = 0,1; 0,3; 1,0$; $A_0 = 12,57 \cdot 10^4$ см² — площадь поверхности сферы радиусом 100 см; $A = 16,61 \cdot 10^2$ см² — площадь поверхности преобразователя; $r = 0,125$ м — эквивалентный радиус цели.

Результаты решения уравнения (32) при различных коэффициентах широкополосности приведены на рис. 33 сплошными линиями, а уравнений (31), т. е. зависимость отношения сигнал/шум от расстояния до облучаемого объекта на оптимальных частотах при различных коэффициентах широкополосности — на рис. 34. Как следует из графика, изображенного на рис. 34, оптимальные частоты для классификации цели получаются при большом изменении отношения сигнал/шум. Если же полагать, что это отношение на предельной дальности будет постоянным, то из уравнения (33) для $S/N = 12$ и $\gamma = 1,0$ при прочих условиях, совпадающих для предыдущего вывода, можно получить значение оптимальной частоты классификации как

$$f_{\text{опт}} = \frac{45,2}{\sqrt{R^2}}.$$

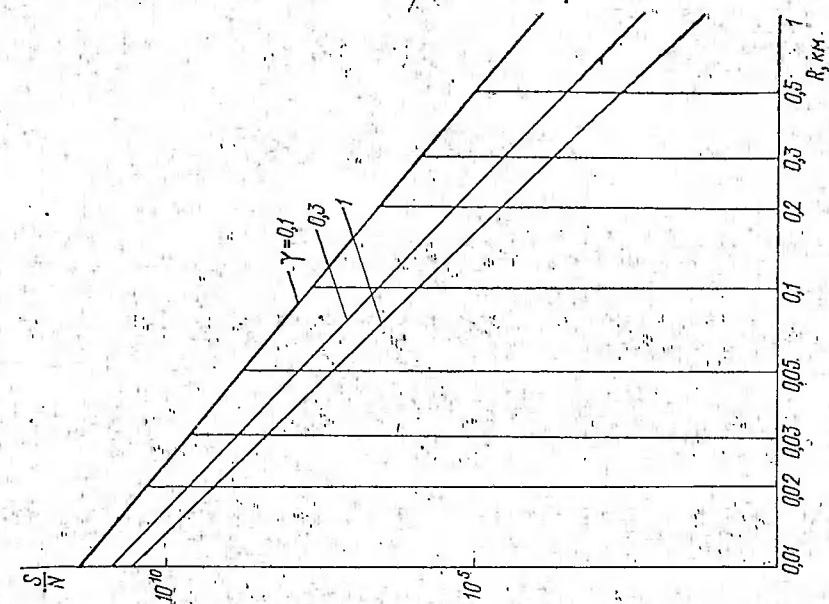


Рис. 34. Отношение сигнал/шум.

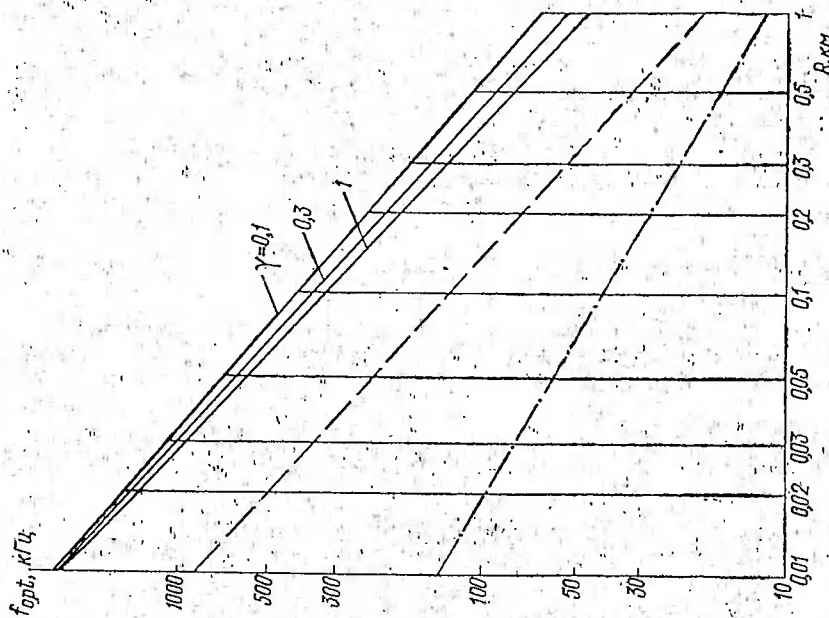


Рис. 33. Оптимальные частоты обнаружения и классификации.

График этой функции приведен на рис. 33 пунктирной линией. Оптимальные частоты обнаружения могут быть найдены из максимума отношения сигнал/шум, т. е. максимума выражения (31). Производя необходимые преобразования, получаем

$$f_{\text{опт}} = \frac{8,97}{\sqrt[3]{R^2}}$$

График для этой функции приведен на рис. 33 в виде штрихпунктирной линии.

Как следует из графика, показанного на рис. 33, изменение положения максимума спектра сигналов дельфина в пределах 20—120 кГц при коэффициенте широкополосности $\gamma = 1,0$ позволяет ему производить оптимальное обнаружение на дистанциях 15—300 м. Для идеально жесткой сферы диаметром 25 см возможна также оптимальная классификация на дальностях, близких к предельным. Естественно, при этом возникает необходимость применения различных сигналов для обнаружения и классификации, что отмечалось и ранее (см., например, § 3).

Глава II ПАРАМЕТРЫ ГИДРОЛОКАТОРА ДЕЛЬФИНА

§ 6. Дальность действия

Максимальная дальность действия может быть определена из уравнения импульсного гидролокатора

$$R_{\text{max}} = \frac{CT_{\text{max}}}{2}, \quad (34)$$

где $C = 1500$ м/с — скорость звука в воде; T_{max} — максимальный период следования импульсов, зарегистрированный во время экспериментов по обнаружению мишеней.

По данным экспериментов $T_{\text{max}} = 150$ мс, что соответствует частоте следования 6,7 Гц. Подставив в формулу (34) это значение, найдем $R_{\text{max}} = 110$ м.

Интересно сравнить полученную дальность с данными расчета по энергетическим соотношениям и результатами экспериментов. Результаты экспериментов по исследованию чувствительности

гидролокатора дельфина к интенсивности сигналов для различных частот приведены на рис. 35. Сплошной кривой обозначены данные, полученные Джонсоном [66] при опытах в бетонном бассейне. Точками отмечены результаты экспериментов, проведенных в свайно-сетевом вольтере по методике условных рефлексов группой исследователей ЛИАПа. Чувствительность гидролокатора дельфина к интенсивности сигналов зависит как от частоты, так и от длительности и уровня шумов. Из рис. 35 видно, что чувствительность гидролокатора дельфина в активной ширине спектра сигнала для расчетов можно принять равной -40 дБ относительно уровня 1 Па.

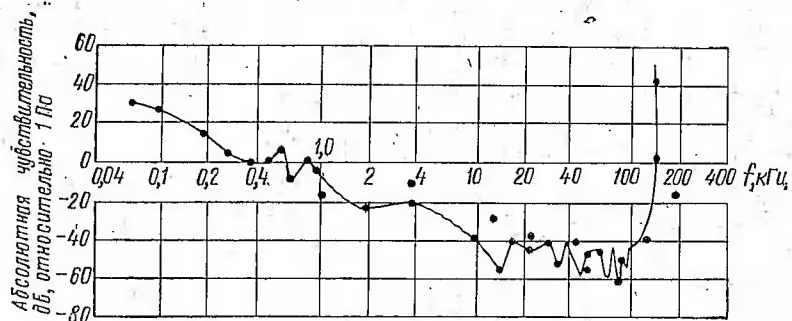


Рис. 35. Частотная зависимость чувствительности дельфина.

Следует, однако, отметить, что вышеуказанные эксперименты проводились без учета действия реверберации, рельефа дна, при малых внешних шумах. В открытых акваториях дельфин, по-видимому, может уменьшать чувствительность и изменить ее характеристику в соответствии с характеристиками зондирующих сигналов. Так, например, в экспериментах, проводимых в мелководной открытой акватории при глубинах до 10 м, с помощью имитатора сигналов была зарегистрирована чувствительность 30 дБ относительно 1 Па [38]. Максимальный уровень излучения зондирующих сигналов дельфинов равен 90 дБ относительно 1 Па.

Для активной локаций имеет место следующая энергетическая зависимость [9]:

$$E = S + T - 2H(R), \quad (35)$$

где E — чувствительность гидролокатора; S — уровень излучаемых сигналов; T — сила цели; $2H(R)$ — полное затухание при распространении звукового сигнала от излучателя до отражающего объекта и обратно;

$$T = 20 \lg \frac{r}{2}, \quad (36)$$

где r — радиус идеально жесткой сферы, эквивалентной по отражающей способности реальной цели, м.

Полное затухание при локации цели зависит от потерь на расширение фронта и потерь на затухание в воде. Результирующая величина затухания для морской воды определяется следующим образом:

$$2H(R) = 40 \lg R + 2(0,214f + 0,00016f^2)R + 120 \text{ дБ}, \quad (37)$$

где R — дистанция до цели, км; f — частота сигнала, кГц.

Предположим, что для гидролокатора дельфина справедливо соотношение (37). Тогда, используя данные об уровне излучаемых сигналов и чувствительности, для заданной силы цели можно определить максимальную дальность локации. Так, для шара при эквивалентном радиусе сферы $r = 35$ мм максимальная дальность локации составляет 100 м.

Эксперименты по обнаружению такого шара в открытой акватории позволили определить, что максимальная дальность локации равна 90 — 110 м. Это подтверждает приведенные выше расчетные данные. Эксперименты проводились по условно-рефлекторной методике в 1975 г. группами сотрудников ЛИАПа и ЛГУ:

Кроме того, результаты экспериментов совпадают также с данными, приведенными на рис. 33 (пунктирная кривая), для частоты максимума спектра сигнала дельфина, равной 30 кГц.

Следует, однако, отметить, что эксперименты по исследованию локаций дельфинов в открытых акваториях проводятся в СССР и за рубежом в течение последних 2 — 3 лет. Так что эти результаты можно считать только предварительными.

§ 7. Распознаваемость мишеней

Еще в первых опытах по исследованию гидролокационной способности дельфинов было обнаружено, что с помощью своих гидролокаторов они могут не только обнаруживать предметы, но и различать их между собой. Во время экспериментов Келлога [67] было замечено, что при кормлении дельфины более охотно берут небольшую рыбу — горбыль, чем вдвое большую — кефаль. Используя этот факт, Келлог и его сотрудники провели ряд опытов с целью проверки, может ли дельфин без участия зрительного анализатора распознать породу рыб с помощью гидролокатора. Дельфину одновременно предлагали кефаль и горбыль, расположенные на расстоянии 60 см друг от друга. После небольшого периода обучения дельфин безошибочно распознавал рыб. Информативным признаком в этом случае явился размер рыб, а не их порода, что было показано в контрольных опытах: при предъявлении рыб разных пород, но одного размера дельфин оказывался не в состоянии их различить.

Позднее была обнаружена и способность дельфина различать мишени, сделанные из равного материала. В 1961 г. в опытах Норриса [72] дельфин четко отличал рыбу от наполненной водой желатиновой капсулы того же размера. Большая серия опытов

[2] показала, что дельфин может использовать как признак для выбора мишени размер, форму и материал мишени. В этих опытах в качестве положительной мишени применялась рыба — бычок размером 12—13 см, а — отрицательной — та же рыба, но с прикрепленной сбоку металлической пластинкой или рыба больших размеров (26—30 см), а также отрезок резиновой трубки.

После короткого обучения резиновая трубка распознавалась всегда, крупный бычок от мелкого — в 87,7% случаев, бычок с металлической пластинкой на боку — в 91,6% случаев. Период обучения во всех аналогичных опытах учитывать не следует, так как в это время дельфин всегда совершает несколько подходов в отрицательной мишени из-за рефлекса «что такое?»

Современные исследования по различению мишеней, отличающихся размером, формой или материалом, можно разделить на две группы. К первой группе относятся эксперименты, с помощью которых определяют предельные возможности гидролокатора дельфина без выяснения физических механизмов распознавания. Вторая группа включает исследования физических признаков, определяющих предельную возможность распознавания объектов, т. е. поиск информативных параметров в отраженном сигнале.

Методика проведения экспериментов в обоих случаях примерно одинакова и соответствует типовой методике, описанной во введении. Существенно отличается только подход к выбору мишеней. В первом случае выбор мишеней может быть совершенно произвольным. На практике с целью исключения трудно учитываемых ракурсных зависимостей часто используют симметричные фигуры — шары и цилиндры. Однако материал и размеры мишеней обычно выбирают произвольно.

Во втором случае в качестве мишеней используют почти исключительно шары и цилиндры, поскольку они допускают математический расчет отраженного сигнала. При этом размеры и материал мишеней выбирают строго определенным образом, чтобы подчеркнуть или ослабить те физические эффекты, которые предположительно используются дельфином для различения.

В одной из первых работ [59] было проведено исследование возможностей распознавания дельфином белобочкой геометрических фигур в виде квадратов, треугольников и пирамид, составленных из двух или трех убывающих по площади квадратов. Результаты опытов, проведенных по методике одновременного предъявления мишеней, показали, что дельфин определяет изменение объема целей с точностью около 6,7%, уверенно распознает (в 77% случаев) плоские фигуры, различающиеся между собой по площади на 9,75% и безошибочно отличает пирамиду от плоской фигуры, площадь которой равна площади пирамиды. В таких опытах большое внимание уделялось обеспечению достоверности полученных результатов, в частности, доказательству того, что различение мишеней осуществляется с помощью гидролока-

ции, а не зрения. Для этого была проведена серия контрольных опытов, во время которых те же фигуры предлагались дельфину за стеклом. Введение стекла нарушало распознавание. Без стекла правильное распознавание было отмечено в 95,2% случаев, а при его наличии — только в 50%, что соответствует случайному выбору. Более поздние опыты [5] показали, что дельфин способен отличать сплошную плоскую фигуру от плоской фигуры с вырезанными отверстиями при равной площади 6,2%; но теряет эту способность, если разность площадей уменьшается до 1%.

Работ по различению дельфинами шаров и цилиндров, отличающихся размерами и материалом, выполнено довольно много как в СССР, так и за рубежом. Причем результаты, полученные разными авторами по предельным параметрам, совпадают [2, 19, 29, 60]. Пороги различения по линейным размерам зависят от материала и формы мишеней и в среднем составляют 5—10 мм, хотя иногда удавалось получить до 3,5 мм для стали и 2 мм для свинца [19]. Пороги различения по материалу также неодинаковы и зависят от абсолютного размера мишеней. При этом оказалось, что некоторые пары материалов (например, латунь — текстолит, латунь — эбонит) дельфины распознают всегда, в то время как другие (сталь — дюралюминий) практически не дифференцируются.

Поиск информативных параметров в отраженном сигнале производился в экспериментах по биологическому моделированию для простейших мишеней. Эта работа представляет большой интерес для бионики, так как ни одна из существующих технических систем подобной задачи не решает, а актуальность ее для современной техники не вызывает сомнений.

Методика проведения типовых опытов при использовании поочередного (последовательного) предъявления мишеней описана в работе [19]. Дельфину предлагались стальные шары различного диаметра. Шар диаметром 20 мм служил положительной мишенью, шары диаметром 76, 60, 40, 35 и 30 мм — отрицательной. Показателем правильной реакции дельфина на положительную мишень являлся его подход к мишени на расстояние 0,5 м и ожидание рыбы в течение 3—5 с. Правильной реакцией на отрицательную мишень был поворот дельфина в направлении к стартовой позиции с расстояния 8—9 м от мишени. Расстояние между стартовой позицией и мишенью в этих опытах равно 20 м.

Установлено, что в 88% случаев от общего числа опытов дельфины дифференцируют разницу в размерах шаров, равную 10 мм с расстояния 8—9 м. При параллельном предъявлении мишеней положительное решение получают в 90% опытов при разнице мишеней 8 мм с диаметром положительного шара 20 мм.

Аналогичные опыты с цилиндрами показали, что при высоте положительной мишени $h_+ = 25$ мм, отрицательной мишени $h_- = 35$ мм количество правильных ответов составило 85% и 60% для $h_- = 30$ мм [36]. Предъявление цилиндров

с $h_2 = 28$ мм во всех случаях сопровождается положительной пицевой реакцией дельфина, и, следовательно, предельная величина различения цилиндров по высоте равна 5 мм.

В опытах по определению способности дельфинов различать материал мишеней [26] животному предлагались шары диаметром 20 мм, изготовленные из стали, латуни, дюралюминия, эбонита и тефлона. За положительную мишень был принят шар из латуни. Результаты параллельного предъявления пар шаров приведены ниже.

Предъявляемая пара	% различения
Латунь — сталь	87
Латунь — дюралюминий	94
Латунь — тефлон	98
Латунь — эбонит	100

Примерно такие же результаты были получены и в опытах с цилиндрическими мишенями, хотя процент правильных подходов в этом случае был немного меньше: например, для пары латунь — дюралюминий — 90%.

Для распознавания размеров и материала мишеней дельфин может использовать либо изменение в интенсивности эхо-сигналов от различных мишеней, либо изменение тонкой структуры отраженного сигнала. Результаты многочисленных экспериментов показали, что дельфин несомненно использует различие в интенсивности эхо-сигналов для распознавания, но только этим признаком объяснить полученные данные невозможно. Например, в опытах, проведенных в ЛИАПе, дельфин уверенно распознавал мишени, выполненные из различных материалов, отражательная способность которых искусственно уравнивалась за счет изменения степени шероховатости поверхности путем пескоструйной обработки.

Для исследования возможности использования дельфином тонкой структуры спектра прежде всего необходимо знать спектральную и временную структуру сигнала, отраженного от мишени. Для упругого шара эта структура может быть вычислена аналитически [22, 65].

Рассчитаем давление $P_r(t)$ в некоторой точке B при падении на сферу радиуса a гармонической бесконечной протяженной плоской волны давления. Точка B , где наблюдается отраженная волна, имеет координаты r, φ, θ . Падающая волна давления $P_i(t)$,

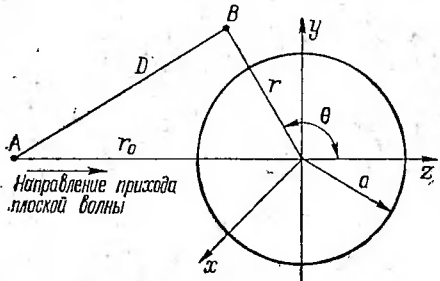


Рис. 36. Отражение плоской звуковой волны от шара.

распространяющаяся вдоль оси z (рис. 36), записывается как

$$P_i(t) = P_0 e^{ik(ct-z)},$$

где P_0 — амплитуда давления; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны; z — координата фронта волны по оси z ; C — скорость звука в воде.

В точке A эта гармоническая волна создает волну [84]

$$P_r(t) = \frac{P_0 a}{2r} e^{ik(ct-z)} f(ka),$$

где $f(ka)$ — характеристика отражения, зависящая от параметров цели (формы, размера, материала) и координат точки B — r

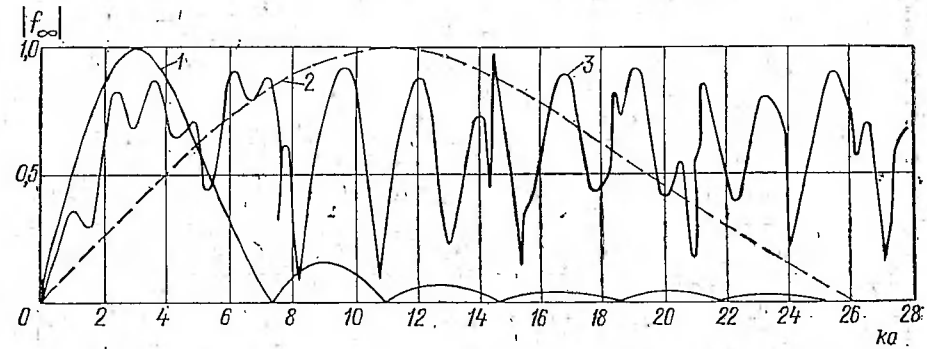


Рис. 37. Функция рассеяния шара и спектры зондирующих сигналов. 1 — спектр узкополосного зондирующего сигнала; 2 — спектр широкополосного зондирующего сигнала; 3 — функция рассеяния шара.

и θ . Функцию $f(ka)$ при $\theta = \pi$ и $P \rightarrow \infty$ обозначим через $f_\infty(ka)$. Эта функция является комплексной и была рассчитана в работе [65] в большом диапазоне значений ka для ряда материалов. На рис. 37 показан вид кривой $|f_\infty(ka)|$ для шара из алюминия. Величина Δf — усредненное расстояние между соседними максимумами или минимумами функции $|f_\infty(ka)|$ или диапазон частот, однозначно связанный со скоростью сдвиговых волн в материале шара [65].

Поскольку процесс отражения сигнала от шара при не очень больших амплитудах линеен, то этот процесс эквивалентен прохождению такого же сигнала через некоторый линейный четырехполюсник [12]. Из теории электрических цепей известно, что, если амплитудно-частотная характеристика линейного четырехполюсника имеет колебательный характер, то его импульсная характеристика представляет собой последовательность затухающих импульсов, интервал между которыми Δt является функцией от Δf , т. е.

$$\Delta t \approx \frac{c}{\Delta f \cdot 2\pi a}$$

Проведенные с помощью ЦВМ аналитические расчеты формы сигналов, отраженных от шаров, выполненных из различных материалов [11, 22], показали, что отраженный сигнал при широкополосном зондирующем сигнале состоит из последовательности затухающих импульсов (рис. 38). Δt зависит как от материала мишени, так и от ее диаметра. При малых размерах мишени, т. е. при $ka \leq 2$ (узкополосный зондирующий сигнал), функция $|f_\infty(ka)|$ не содержит осцилляций, а отраженный сигнал состоит из одиночного импульса.

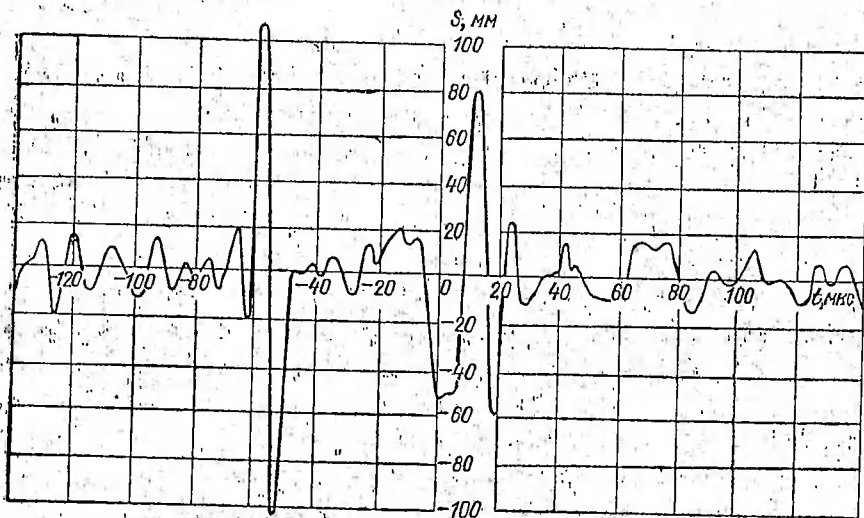


Рис. 38. Вычисленный отраженный сигнал от шара.

Результаты этих расчетов показали возможность использования дельфином для дифференцировки мишеней спектрального [20] или временного методов различения отраженных сигналов. Различия в спектрах отраженных сигналов можно охарактеризовать величиной Δ — средним периодом осцилляции функции $|f_\infty(ka)|$:

$$\Delta = \frac{2\pi a \Delta f}{c}$$

Различие в величине Δ для двух мишеней, отличающихся как размерами, так и материалом, можно выразить как

$$\delta f = \left| \frac{c}{2\pi} \left(\frac{\Delta_1}{a_1} - \frac{\Delta_2}{a_2} \right) \right|,$$

где Δ_1 , a_1 и Δ_2 , a_2 — параметры первой и второй мишеней соответственно.

Если принятая гипотеза верна, то для уверенного распознавания мишеней необходимо, чтобы

$$|\delta f| \geq |\delta f_0|,$$

где δf_0 — постоянная, зависящая от индивидуальных особенностей животного.

Аналогичное условие можно сформулировать и на временном языке. Поскольку Δt однозначно связано с Δf , то и равенство величин Δt для двух мишеней оказывается связанной с Δf :

$$\delta f = \left| \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\Delta t_1 - \Delta t_2} \right|,$$

где Δt_1 и Δt_2 — величины Δt для первой и второй мишеней.

Работы [5, 22], в частности изучение зависимости порогов различения от a , подтвердили эту гипотезу для тех случаев, когда число максимумов функции $|f_\infty(ka)|$ равно 1—100. За пределами рассматриваемого диапазона зависимости, полученные экспериментально, резко отличаются от вычисленных, что указывает на использование дельфином какого-то другого признака. Для подтверждения этого положения были проведены три серии опытов [22], в которых дельфину предъявлялись три пары шаров.

В первой серии опытов в качестве мишеней подбирались пара шаров, отраженный сигнал от которых по расчету, подтвержденному прямым наблюдением, является одиночным импульсом. Такими мишенями оказалась пара шаров диаметром 10 мм, изготовленных из латуни и алюминия.

Во второй серии экспериментов дельфину предлагалась пара шаров, эхо-сигнал от каждого из которых представлял последовательность затухающих импульсов с различными интервалами между импульсами. Шары, изготовленные из равных материалов — латуни и алюминия, имели диаметр 70 мм.

В третьей серии опытов использовалась пара шаров с одинаковыми интервалами между импульсами в эхо-сигналах. Один шар был изготовлен из латуни диаметром 50 мм, другой — из алюминия диаметром 70 мм. Для исключения возможности распознавания этих шаров по интенсивности отраженных сигналов поверхность алюминиевого шара обрабатывалась пескоструйным аппаратом.

Результаты опытов показали, что дельфин с большой вероятностью ($P = 0,98$) различает мишени, эхо-сигналы от которых представляют собой последовательность импульсов, если интервалы между ними существенно отличаются. Однако дельфин практически не различает шаровые мишени, если эхо-сигналы от них являются одиночными импульсами ($P = 0,57$) или все интервалы между импульсами в эхо-сигналах одинаковы.

Следует отметить, что в настоящее время неизвестно, каким признаком — временным или спектральным — пользуется дельфин при различении объектов. Слуховой механизм животных лучше приспособлен к спектральному анализу, а центральная нервная система — как к спектральному, так и к временному анализу [2]. Однако с точки зрения бионики для моделирования

выявленных зависимостей в технике временной подход предпочтительнее.

Особый интерес представляет изменение параметров зондирующих сигналов дельфина в зависимости от характеристик шаров, предъявляемых ему для различения. На рис. 39 показаны нормированные спектральные плотности сигналов дельфинов [48], рассчитанные на ЦВМ при применении алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Пунктирной линией дан спектр сигнала, использованного дельфином для различения латунного и

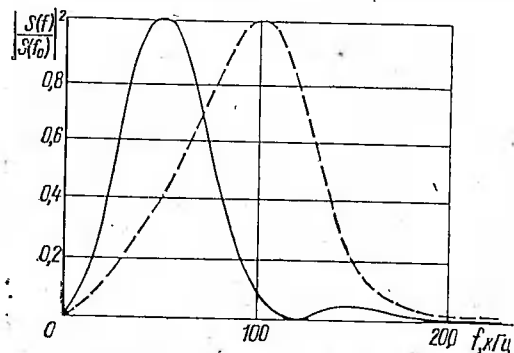


Рис. 39. Спектры сигналов дельфина при различных по сложности задачах.

алюминиевого шаров диаметром 70 мм, при вероятности правильного решения 95%. Сплошной линией обозначен

спектр сигнала, использованного дельфином для различения алюминиевого шара диаметром 70 мм и латунного шара диаметром 50 мм при вероятности правильного решения 60%. Из рисунка видно, что изменение параметров сигнала состоит в изменении активной ширины спектра сигнала и смещении его средней частоты.

§ 8. Разрешающая способность

Значительный интерес для бионики представляет исследование разрешающей способности гидролокатора дельфина по дальности и углам в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Сравнение этих характеристик с аналогичными характеристиками технических систем может позволить количественно оценить параметры гидролокатора дельфина и наметить новые пути совершенствования технических устройств.

Эксперименты, определяющие разрешающую способность гидролокатора дельфина по дальности, ставились равными авторами с помощью типовой методики (приведена во введении), но с использованием мишеней различных типов.

В работе [47] описаны опыты по различению шаровых мишеней по дальности, которые производились в бетонном бассейне с использованием разделительной сети. Мишеней представляли собой пары шаров, которые могли удаляться один от другого на расстояние от 0 до 50 см. В положительной мишени расстояние между центрами шаров оставалось постоянным в течение всего опыта, а в отрицательной — изменялось. При измерении разрешения по дальности дельфин должен был определять разницу в раз-

несении шаров вдоль направления, параллельного разделительной сети. По сигналу экспериментатора дельфин двигался со стартовой позиции к мишеням и в начале разделительной сети сам принимал решение о выборе мишени.

Разрешающая способность по дальности определялась с помощью пороговой величины Δr , при которой правильная реакция дельфина наблюдалась в 75% случаев. В опытах на стальных шарах $\varnothing 17,3$ мм при различных расстояниях между центрами шаров положительных мишеней величина Δr составляла 0,9—1,1 см.

В экспериментах, описанных в работах [13] и [24], также использовалась методика двигательного-лицевых условных рефлексов, но в качестве мишеней применялись латунные цилиндры с неподвижным дном и перемещающейся в процессе опыта крышкой. При погружении мишени заполнялись морской водой. Толщина неподвижного основания выбиралась такой, чтобы эхосигнал от ближней по направлению прихода зондирующего сигнала животного стенки отличался от эха, отраженного от подвижной дальней стенки не более чем на 3 дБ. Во время опытов мишени располагались так, что дельфин облучал их со стороны неподвижного основания, ориентированного перпендикулярно к оси тела животного. Подвижная крышка перемещалась по резьбе, шаг и глубина которой были выбраны много меньше длины волны колебаний, излучаемых дельфином, что исключило паразитные отражения от резьбы. Предельная разрешающая способность, полученная в этих опытах, составила 1,5 мм.

В работе [24] описаны опыты еще с одним видом мишеней — параллельными квадратными пластинами, меньшая из которых перемещается относительно большей. Минимальное разрешение, полученное на пластинах, также равно 1,5 мм.

Вопрос об информативных признаках, используемых дельфином для разрешения мишеней по дальности, в настоящее время относят к дискуссионным. Наибольшее распространение получили две связанные между собой гипотезы: временная и спектральная. Первая из них говорит о том, что информативным параметром является временной интервал между импульсами, отраженными от двух тел — шаров, плоскостей и т. д. В этом случае, чтобы обеспечить найденные величины Δr , разрешающая способность по времени должна составлять 2—2,5 мкс. Однако минимальный временной интервал между двумя акустическими импульсами, различаемый дельфинами, оказался равным 17 мкс [39]. Эта гипотеза подтверждается тем, что при использовании разных мишеней, обладающих заведомо различными спектральными характеристиками (пары шаров с различной исходной базой [47], цилиндры с подвижной стенкой [13, 24], пластины [24], пирамиды [59]), опытные величины Δr оказываются близкими.

По спектральной гипотезе [47] разрешающая способность по дальности обеспечивается различиями в спектре отраженного

сигнала при заданном взаимном расположении мишеней. Другими словами, в этом случае дельфин рассматривает комбинацию двух мишеней как одну сложную мишень. Косвенным подтверждением данной гипотезы является полученное в работе [47] увеличение значения $\Delta\tau$ до 4,4 см при переходе от стальных шаров к свинцовым.

В опытах по определению способности дельфина различать два объекта, находящихся под некоторым углом к оси животного, все исследователи используют методику параллельного предъяв-

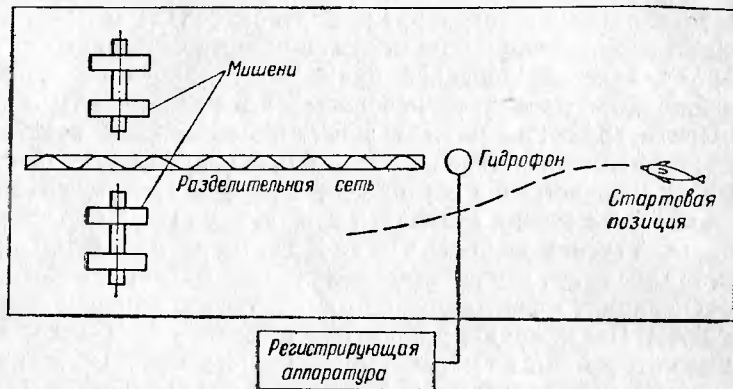


Рис. 40. Схема проведения опыта для определения разрешающей способности по углу.

ния мишеней и применяют разделительную сеть. Схема проведения опыта показана на рис. 40. Чтобы избежать выработки побочных условных рефлексов на место расположения мишеней, положительные и отрицательные мишени меняли местами по случайному закону. По сигналу вызова животное двигалось к мишеням, у края разделительной сети принимало решение и, если оно оказывалось правильным, подплывало к положительной мишени, получая за это рыбу. Зная длину разделительной сети и расстояние между объектами, составляющими сложную мишень, можно судить об угловых размерах мишеней. В качестве мишеней применялись пары стальных шаров диаметром 17,3 мм [47], расстояние между которыми могло изменяться. Полученная при этом разрешающая способность $\Delta\varphi$ оценивается в $19' \pm 5'$ (угловых минут) при базе мишени $l = 2,5$ см и $60'$ при $l = 20$ см. Базой мишени называется линейное расстояние между составными частями положительной мишени.

Аналогичные исследования были проведены на дельфинах белобочках [20, 18, 68], где в качестве мишеней использовались цилиндры из пенопласта высотой 15 см и диаметром 5 см. Положительной мишенью являлись сдвинутые цилиндры, отрицательной — раздвинутые. Полученная в опытах величина $\Delta\varphi$ равна

40" в горизонтальной плоскости и $1'$ — в вертикальной. При этом база мишеней была очень малой — 2–3 мм. Существенный недостаток этих экспериментов — неоднородность акустических характеристик пенопласта.

В работах [27, 33] использовались цилиндрические мишени диаметром 60 мм и высотой 10 мм, которые помещались на общую ось диаметром, значительно меньшую, чем диаметры цилиндров (рис. 41). На мишенях с малой базой (положительная мишень — сомкнутые цилиндры) были получены $\Delta\varphi = 8'$ в вертикальной плоскости и $14'$ — в горизонтальной. Применение цилиндров является недостатком этого эксперимента, так как их отражательные характеристики имеют ракурсные зависимости.

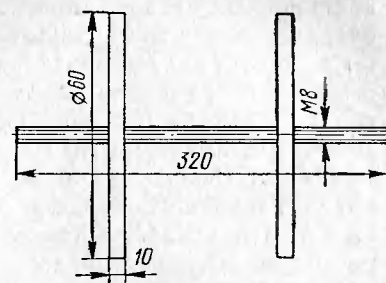


Рис. 41. Мишень для определения разрешающей способности по углу.

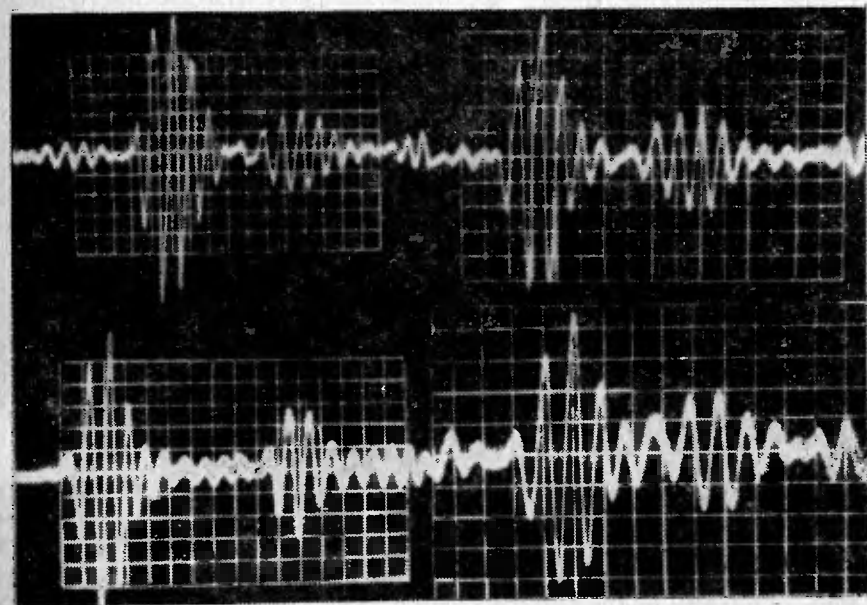


Рис. 42. Отраженные сигналы от шаров. Масштаб развертки 20 мкс/дел.

Информационные параметры, используемые дельфином для углового различения мишеней, в настоящее время достоверно не известны. В случае применения мишеней с малой базой дельфин,

по-видимому, использует тонкую структуру отраженного сигнала во временной или частотной областях, образующуюся за счет волноводных свойств мишени [14, 27, 74]. При этом отраженные сигналы становятся сложной структуры (рис. 42), которая может быть использована дельфином для распознавания. Полученное в работе [60] увеличение $\Delta\varphi$ для свинцовых шаров, по сравнению со стальными, подтверждает предположение, каким образом дельфин получает высокую разрешающую способность при большой базе. Исследования поведения дельфинов [4] показали, что после первичного выбора цели дельфин часто поворачивается на бок и продолжает движение в таком положении. Это наводит на мысль об использовании дельфином принципа синтезированной апертуры. Проведенные расчеты показали, что при наблюдаемых величинах поперечных колебаний траекторий и этот метод не обеспечивает измеренных $\Delta\varphi$.

Высокая разрешающая способность эхолотатора дельфина вызвала большой интерес к изучению направленных свойств приемной и излучающих его систем.

Исследованию приемного аппарата посвящена работа [56], в которой получены предварительные данные о направленности приемной системы. Оказалось, что ширина диаграммы направленности приемной системы дельфина составляет единицы градусов и уменьшается с увеличением частоты тонального сигнала.

Экспериментальные данные о направленности излучения дельфина были получены рядом авторов [23, 25, 43]. Так, в работе [43] рассмотрена диаграмма направленности, которую снимали на голове мертвого дельфина в диапазоне частот от 10 до 180 кГц через 20 кГц. В литературе [37] приводится диаграмма направленности излучающего аппарата дельфина, построенная по данным экспериментов, проводимых в бетонном бассейне небольшого диаметра. Все эти работы дают лишь приближенные пространственные характеристики излучений дельфина. Более точные данные можно получить, снимая диаграммы направленности излучающего аппарата дельфина в вертикальной и горизонтальной плоскостях с живого животного при дифференцировке им различных мишеней. Методика проведения такого эксперимента описана ниже.

Снятие диаграммы направленности выполнялось моноимпульсным методом по принципу пространственно-временной развертки отдельных зондирующих сигналов животного. Пространственное выделение сигналов осуществлялось путем применения цепочки из нескольких гидрофонов, позволяющей регистрировать сигналы одновременно в ряде точек.

Временное выделение сигналов производилось путем размещения цепочки гидрофонов под некоторым углом к плоскости распространения сигнала животного. Схема проведения опыта показана на рис. 43 [25]. Дельфин занимал стартовую позицию на расстоянии 15 м от мишеней. Применялась методика парал-

лельного предъявления мишеней. Цепочка из шести гидрофонов располагалась за дифференцируемыми мишенями под углом $\gamma = 18^\circ 30'$ при определении горизонтальной диаграммы направленности и $\gamma = 39^\circ$ по отношению к поверхности воды для вертикальной диаграммы.

Разница в путях, проходимых импульсами между двумя соседними гидрофонами, определяет временную задержку между

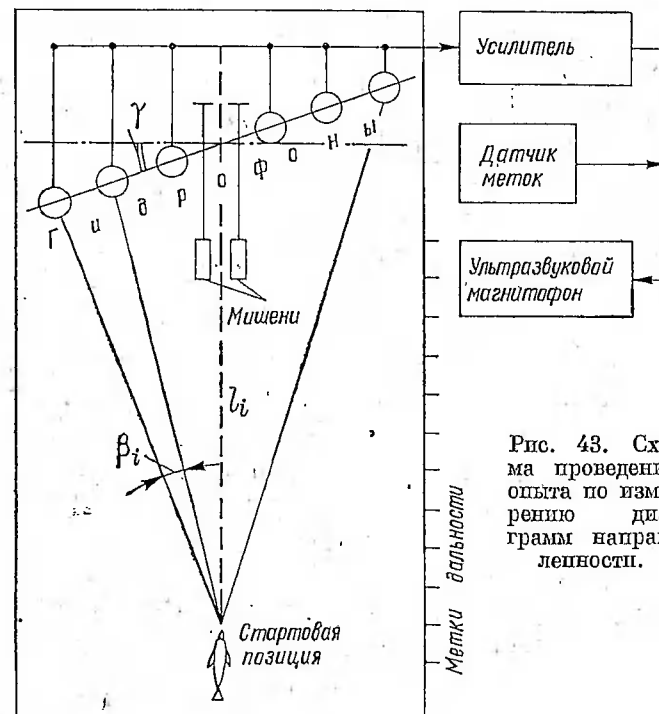


Рис. 43. Схема проведения опыта по измерению диаграммы направленности.

импульсами, принятыми этими гидрофонами. Если l_i — расстояние до i -го гидрофона, а l_{i+1} — до $(i+1)$ -го, то задержка

$$\tau = \frac{l_{i+1} - l_i}{C},$$

где C — скорость звука в воде, равная 1500 м/с.

Сигналы с цепочки гидрофонов поступают на усилитель и записываются ультразвуковым магнитофоном. Путь дельфина от старта до мишени разбивается на равные участки и обозначается метками дальности. Когда дельфин проходит эти метки, датчик выдает сигнал, записываемый на магнитофон.

Для того чтобы сигналы, регистрируемые с линейки гидрофонов, не перекрывались, необходимо соблюдение условия

$\tau < \tau_{\text{имп}}$ ($\tau_{\text{имп}}$ — длительность импульса животного). Максимальная длительность локационных сигналов в этом опыте принималась равной 60 мкс, при этом для $\gamma = 18^\circ 30'$ величина $\Delta l = l_{i+1} - l_i = C\tau_{\text{имп}} = 0,09$ м. Минимальное расстояние между гидрофонами составляло 28 см. В этом случае цепочка из шести гидрофонов позволила регистрировать сигналы лишь в узком телесном угле ($18,5^\circ \cdot 39^\circ$), считая рострум дельфина за точку излучения сигналов. Для регистрации диаграммы в более широком угловом диапазоне расстояние между гидрофонами можно устанавливать равным 50 и 90 см. Для цепочки были подобраны идентичные сферические гидрофоны диаметром 10 мм с разбросом частотных характеристик чувствительности не более 10%.

Каждый локационный сигнал дельфина принимался шестью гидрофонами в равное время и в различных точках пространства. Время между двумя записанными соседними сигналами соответствует определенному направлению, т. е. определенному углу между направлениями излучения сигналов на мишень и на данный гидрофон. Амплитуда каждого сигнала несет в себе информацию о величине диаграммы направленности в направлении на данный гидрофон.

Для обработки полученных данных все записанные сигналы были сняты на киноплёнку. Анализ зарегистрированных сигналов производился с помощью проекционного аппарата микророт типа 5ПО-1.

Для построения диаграмм в обеих плоскостях использовались пространственные развертки тех локационных сигналов, которые излучались животными вблизи меток дальности. Допустимая погрешность определения угловых координат диаграммы направленности была принята равной 10%. Эта величина является исходной при определении длительности выборки сигналов на киноплёнке около меток дальности. Каждая выборка снятых на киноплёнку сигналов содержала не более 20 импульсов, а всего для повышения точности было обработано 3000 импульсов, зарегистрированных в 36 выстрелах. Для удобства обработки все сигналы были нормированы по амплитуде.

По приведенной методике были построены диаграммы направленности излучающего аппарата дельфина для горизонтальной плоскости при удалении от мишени на 2, 4, 6 и 8 м при расстоянии между гидрофонами 28,50 и 90 см, для вертикальной плоскости — при удалении от мишени 3, 6, 9, 12 м и расстоянии между гидрофонами 90 см. При увеличении длины цепочки гидрофонов излучение животного исследовалось в большом телесном угле, но при этом уменьшалась точность определения центрального лепестка диаграммы направленности.

По полученным в горизонтальной и вертикальной плоскостях диаграммам с различных расстояний до мишеней и при равном расстоянии между гидрофонами строились усредненные диаграммы в обеих плоскостях.

На рис. 44 приведена диаграмма направленности излучающего аппарата дельфина в горизонтальной плоскости. Диаграмма симметрична, ширина главного лепестка по уровню 0,7 составляет

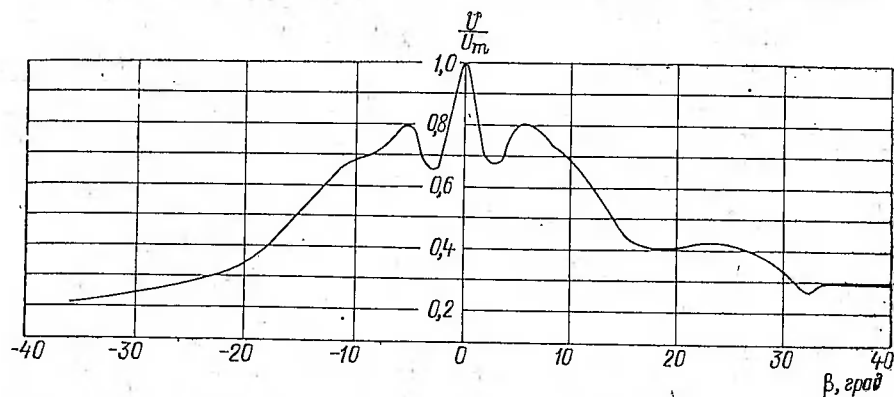


Рис. 44. Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости.

$3^\circ 30'$. Боковые лепестки при $\beta = \pm 5^\circ$ на 2 дБ меньше уровня основного лепестка, а далее их уровень плавно понижается.

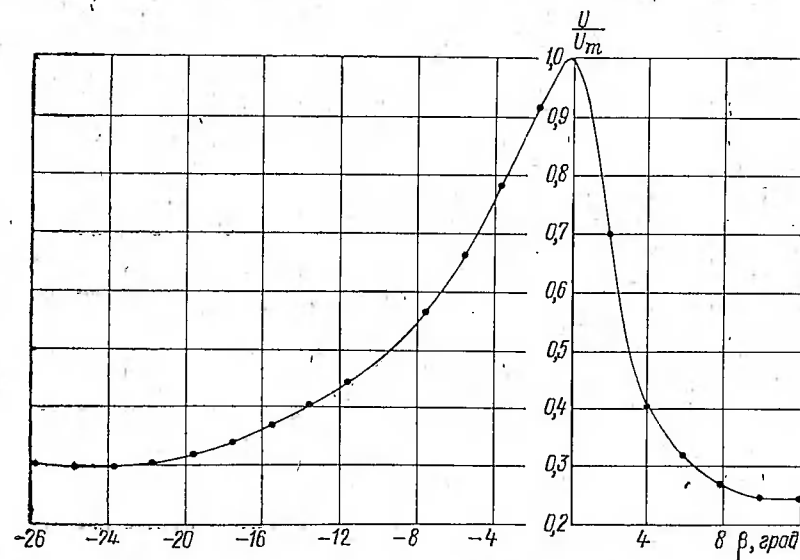


Рис. 45. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости.

На рис. 45 приведена диаграмма направленности в вертикальной плоскости, которая имеет асимметричный характер. Ее ширина на уровне 0,7 справа от направления максимума составляет 2° , а слева — $5^\circ 12'$. Ширина основного лепестка по уровню 0,7

равна $7^{\circ}12'$. Разрешающая способность по углу гидролокатора дельфина составляет при малой базе мишеней $19'$, при большой — $60'$. Разрешающая способность по дальности равна $1,5$ мм.

Таким образом, полученные данные о диаграммах направленности излучающего аппарата дельфина не соответствуют данным, полученным по угловой разрешающей способности даже для мишеней с большой базой. Возможно, это несоответствие объясняется неизвестными способами обработки информации в мозгу животного.

§ 9. Помехозащищенность

Из теории гидролокации известно, что анализ любой системы должен производиться с учетом помех. При изучении гидролокационного аппарата дельфина этот вопрос представляет особый интерес, так как сопоставление собственных шумов моря с параметрами гидролокатора дельфина позволяет судить о степени его адаптации к условиям существования.

Применительно к рассматриваемой задаче наиболее существенными компонентами собственных шумов моря являются шумы поверхности моря, дождя и тепловые.

Тепловые шумы обусловлены движением молекул в водной среде. Эта составляющая шума при температуре $+15^{\circ}\text{C}$ может быть вычислена [40] по формуле

$$L = -115 + 20 \lg f, \quad (38)$$

где L — звуковое давление в полосе 1 Гц, дБ, относительно $0,1$ Па; f — частота, кГц.

Из формулы (38) видно, что в логарифмическом масштабе тепловые шумы линейно возрастают с частотой (рис. 46, кривая 2).

Шумы поверхности моря представляют собой основной источник шума в открытом море на малых глубинах. Уровень этих шумов зависит от скорости ветра и состояния моря. Частотные зависимости шумов поверхности моря [40] приведены на рис. 46, кривые 1. Параметром семейства этих кривых является состояние моря в баллах. Из этого рисунка видно, что для поверхностных шумов с повышением частоты интенсивность шума монотонно спадает примерно на 5 дБ на октаву.

С изменением скорости ветра при $f > 1$ кГц интенсивность поверхностных шумов изменяется приблизительно пропорционально скорости ветра в степени $1,8$.

Во время дождя уровень поверхностных шумов повышается на 15 — 25 дБ по сравнению с данными, приведенными на рис. 46, причем это повышение наиболее заметно при $f < 20$ кГц. На частотах свыше 30 кГц шумы дождя становятся пренебрежимо малыми и, следовательно, характер частотной зависимости поверхностных шумов на высоких частотах не изменяется.

Так как шумы от независимых источников складываются геометрически, а наклон кривых для тепловых и поверхностных шумов мало отличается по модулю, но противоположен по знаку, то при монотонном изменении частоты общий уровень шумов имеет минимум, соответствующий точке, где тепловые шумы равны поверхностным. Как видно из рис. 46, частота, соответствующая этому минимуму, зависит от состояния поверхности

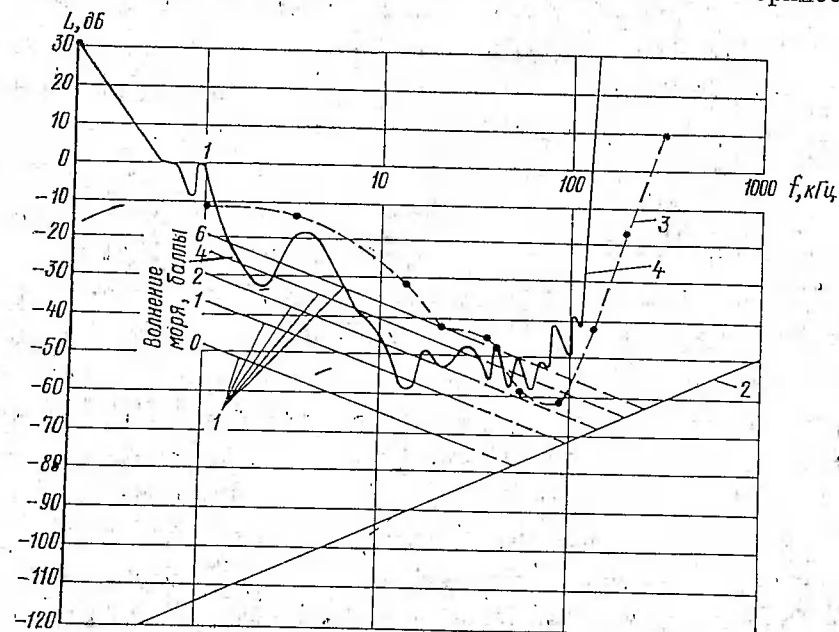


Рис. 46. Спектральные плоскости шумов и пороговые кривые чувствительности.

1 — поверхностные шумы; 2 — тепловые шумы; 3, 4 — пороговые кривые чувствительности (3 — экспериментальные данные, проведенные авторским коллективом, 4 — данные, полученные Джонсоном).

моря. Наиболее характерным случаем в рассматриваемой задаче можно считать волнение в пределах 0 — 4 баллов. При таком волнении минимальный уровень шумов будет в диапазоне 40 — 200 кГц.

Если рассмотреть пороговую кривую органов слуха дельфина (см. рис. 46, кривые 3 и 4) [46], то можно видеть, что именно в этом диапазоне частот чувствительность органов слуха дельфина наибольшая. Для сравнения на этом же рисунке представлена пороговая кривая органов слуха дельфина, полученная Джонсоном [66]. Расхождение кривых объясняется, во-первых, различными методиками и условиями, при которых проводились опыты, во-вторых, использованием аппаратуры с ограниченным частотным диапазоном. Пороговая кривая Джонсона снималась в закрытом бассейне при максимально излучаемой частоте

150 кГц. Кривая чувствительности, полученная нами, снята в открытом вольере, вблизи берега при максимально излучаемой частоте 500 кГц. За пределами полосы частот 40—200 кГц пороговая чувствительность падает и притом неодинаково: на более высоких частотах сильнее, чем на более низких. Суммарный уровень шумов подчиняется тому же закону.

Таким образом, пороговая чувствительность органов слуха дельфина оказывается хорошо согласованной с шумовыми свойствами окружающей среды.

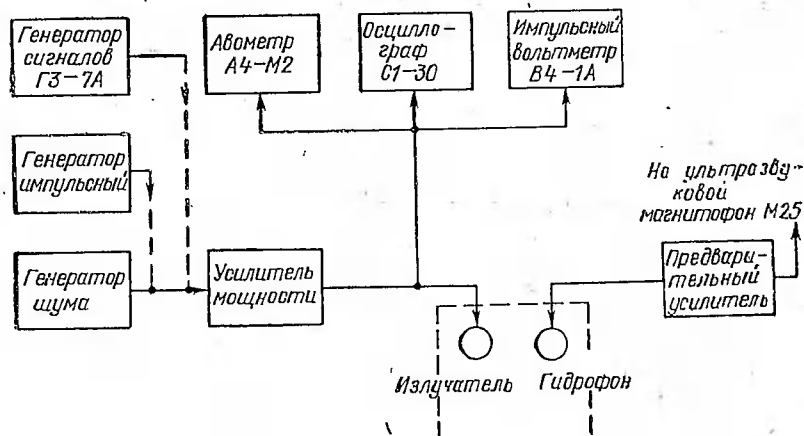


Рис. 47. Схема проведения опыта по помехозащищенности.

Условия обитания дельфина в водной среде, как и многих других морских животных, требуют обеспечения высокой помехозащищенности их приемного аппарата, с помощью которого они распознают на фоне большого уровня окружающих помех (активных и пассивных) различные предметы, рыбу, естественные и искусственные препятствия, а также дифференцируют собственные сигналы и сигналы других животных. В связи с этим были поставлены специальные опыты по выяснению адаптации и помехоустойчивости гидролокационного аппарата дельфинов при излучении различных искусственных помех: полосового шума, тона частотой 30 и 80 кГц, радиопульсов длительностью 200 мкс с периодом следования 10 мс и частотой заполнения 30 и 80 кГц.

Параметры непрерывных помех (шумовой и тональной) были выбраны с учетом максимальной чувствительности слухового анализатора дельфина — от 20 до 80 кГц [66], а параметры импульсных помех — как имитация локационных сигналов дельфинов.

Опыты проводились на черноморских афалинах в свайно-сетевых вольерах размерами 30 × 5 × 4,5 м с использованием методики двигательного-пищевых условных рефлексов. На рис. 47 представлена структурная схема макета, используемого для исследова-

ования адаптации дельфина к вышеперечисленным помехам. Сигналы с выходов генератора шума, генератора импульсов и генератора синусоидальных колебаний ГЗ-7А поочередно подавались на усилитель мощности, служащий согласующим звеном между задающим генератором и излучателем. Генератор помехи оставался включенным в продолжение всего опыта. При включении генератора помехи животное не проявляло каких-либо признаков беспокойства и его поведение не отличалось от обычного.

Во время проведения опытов регистрировались зондирующие сигналы дельфина посредством ультразвукового магнитофона МУЗ-М25 с полосой пропускания до 100 кГц. В качестве приемного гидрофона использовалась сфера из титаната бария диаметром 8 мм. Неравномерность частотной характеристики этого гидрофона в полосе частот 10—120 кГц была меньше 4 дБ. В качестве излучателя использовалась аналогичная сфера диаметром 20 мм.

Эксперименты проводились с животным, ранее обученным определять (с вероятностью 100%) положительную мишень при отсутствии помех. По мере увеличения интенсивности помех процент распознавания падал. Снижение его до 85% считалось прекращением дифференцировки. Уровни помех при этом, измеренные на расстоянии 1 м от излучающего гидрофона, составляли для полосового шума — 900 Па; тона частотой 30 кГц — 120 Па; тона частотой 80 кГц — 540 Па.

Для импульсных помех срывы дифференцировок зарегистрировать не удалось. Записанные на магнитофон сигналы животных и помехи анализировались по временным и частотным характеристикам. При воспроизведении магнитной записи эти сигналы воспроизводились на экране осциллографа и фиксировались на киноплёнку. Обработка осциллограмм [12] позволила получить временные характеристики зондирующих сигналов и помех. По экспериментальным данным отраженный сигнал зондирующего примерно на 25 дБ при расстоянии от рострума дельфина до мишени в 1 м. Поэтому, чтобы получить отношение сигнал/помеха, следует измеренную величину уменьшить на 25 дБ.

Анализ результатов показал, что при увеличении интенсивности излучаемой помехи выше определенного значения уровень сигналов дельфинов почти не изменялся. Следовательно, в данных условиях для локационной системы дельфина не требовалось постоянства отношения сигнал/помеха.

Анализ сигналов позволил установить, что при излучении полосового шума и тона частотой 30 и 80 кГц дельфин использует серии импульсов с малой и большой частотами следования, почти ничем не отличающиеся от серий импульсов, полученных при проведении опытов по дифференцировке мишеней без искусственных помех. Однако при наличии импульсной помехи дельфин излучает последовательности импульсов с частотой следования

17 Гц, что значительно меньше частоты следования импульсной помехи, равной 100 Гц. Причем дельфин подстраивается к данной помехе так, чтобы его сигналы размещались в интервалах между импульсами помехи. То же самое наблюдалось при обработке записи одновременного излучения двух животных. Такая адаптация дельфина к воздействию импульсной помехи позволяет ему, по-видимому, работать и при больших уровнях помех, что, вероятно, и обусловило большую устойчивость дифференцировки.

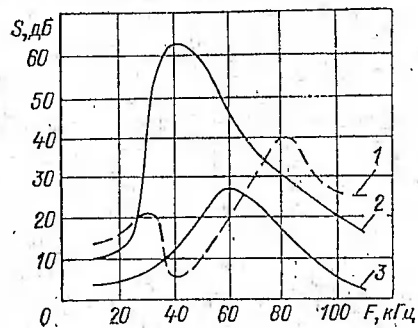


Рис. 48. Спектры шумовой помехи и сигнала.

Результаты исследования спектральных характеристик для полосовой шумовой помехи, тональной помехи и помехи в виде радиоимпульсов приведены на рис. 48, 49, 50. Спектр зондирующих сигналов (кривые 2) смещается в противоположную сторону от спектра помех (кривые 1) по сравнению со спектром сигналов при отсутствии помех (кривые 3). При излучении полосового шума, тона частотой 80 кГц и радиоимпульсов с частотой заполнения 80 кГц максимальная энергия сигналов дельфина сосредоточена в области более низких частот 35—50 кГц (кривые

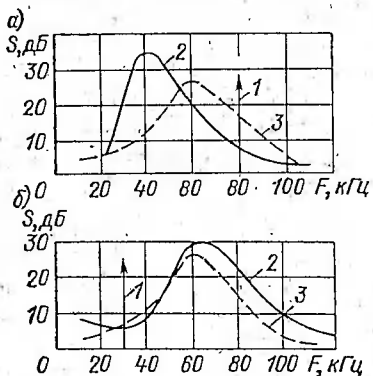


Рис. 49. Спектры тональной помехи и сигнала: а — частота тональной помехи выше максимума спектра сигнала; б — ниже максимума спектра сигнала.

2, рис. 48, 49, а, 50, а). При излучении помех в виде тона частотой 30 кГц и радиоимпульсов с частотой заполнения 30 кГц максимальная энергия спектров сигналов дельфина сосредоточена в области более высоких частот: 65—85 кГц (кривые 2, рис. 49, б

и 50, б). К аналогичным выводам можно прийти, анализируя осциллограммы (рис. 51) зондирующих сигналов, снятых при импульсных помехах, идентичных помехам на рис. 50, а и 50, б. Такие помехи наиболее удобны для снятия осциллограмм, так как зондирующие сигналы находятся между импульсными помехами. Из сравнения рисунков 51, а и б видно, что более высокой частоте заполнения импульсов помехи соответствует более низкочастотное заполнение сигнала, и наоборот.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что при данных условиях излучения помех дельфин отстраивается от излучаемой помехи по частоте. При радиоимпульсной помехе дельфин использует для посылки своих сигналов временные паузы между им-

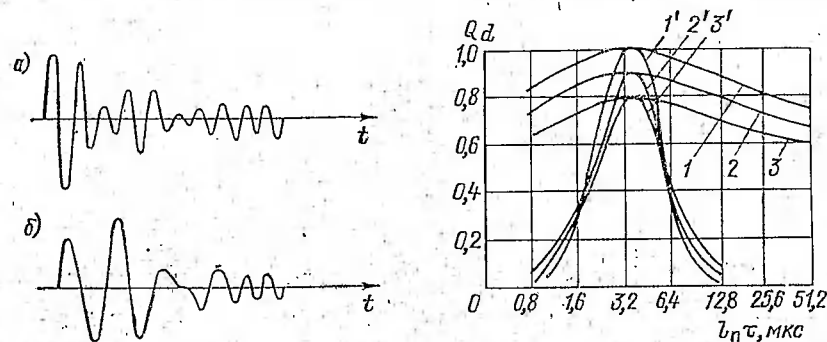


Рис. 51. Изменение вида зондирующих сигналов при действии импульсной помехи: а — спектр помехи лежит ниже спектра сигнала; б — выше спектра сигнала.

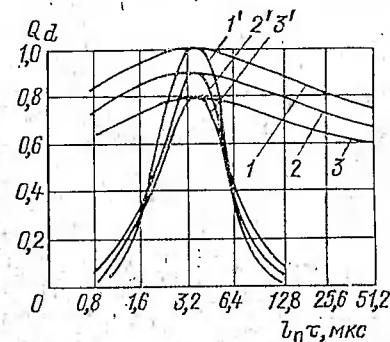


Рис. 52. Характеристики слухового анализатора дельфина и согласованного фильтра.

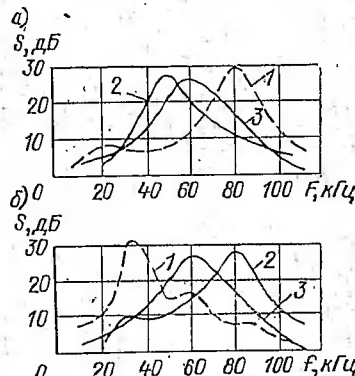


Рис. 50. Спектры помехи в виде радиоимпульсов и сигнала: а — спектр помехи лежит выше спектра сигнала; б — ниже спектра сигнала.

пульсами помехи. Полученные результаты позволяют дать в основном качественную оценку помехозащищенности гидролокатора животного. Однако можно считать установленным тот факт, что дельфин реагирует на появление внешних помех изменением параметров своего излучения [1, 39].

При исследовании адаптивности и помехозащищенности эхолокатора дельфина не менее важным является вопрос об эффективности слухового восприятия дельфином тонального сигнала на фоне гауссовой помехи в зависимости от его длительности при фиксированной энергии.

В работе [30], выбрав в качестве основных параметров длительность сигнала, частоту заполнения и отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума, были получены характеристики слухового анализатора дельфина в функции длительности сигнала. По расчетным данным построены семейства вероятностных характеристик для анализатора дельфина (рис. 52, кривые 1, 2, 3) и согласованного фильтра (рис. 52, кривые 1',

2', 3'). Экспериментальные характеристики и кривые эффективности согласованного фильтра позволяют при заданном уровне вероятности правильного обнаружения сигнала оценить пределы адаптации слухового анализатора дельфина.

Глава МОДЕЛИРОВАНИЕ
III ГИДРОЛОКАТОРА
ДЕЛЬФИНА

§ 10. Аппаратура для моделирования

На современном этапе развития бионики моделирование гидролокатора дельфина сводится в основном к моделированию процесса отражения акустических сигналов, подобных сигналам дельфинов, от различных мишеней (физическое моделирование). Так как данных по электрофизиологии мозга дельфина в настоящее время недостаточно для построения модели обработки сигналов, то при математическом моделировании обычно проверяют различные гипотезы обработки. Поэтому дельфин рассматривается как «черный ящик».

С учетом вышесказанного, к аппаратуре, применяемой для физического моделирования, предъявляют следующие требования:

1. Возможность формирования последовательности зондирующих импульсов с частотой следования 20—200 Гц, несущей частотой 20—130 кГц, длительностью 20—100 мкс и импульсной мощностью больше 100 Вт. Зондирующие сигналы по форме должны представлять собой «пакеты» синусоид с различными огибающими.

2. Обеспечение диаграммы направленности порядка единиц градусов в режимах передачи и приема.

3. Получение в приемном тракте уровня шума меньше 1 мкВ в полосе частот 10—230 кГц при неравномерности частотной характеристики 4 дБ.

Эти требования и были приняты за основу для разработки и создания аппаратуры для экспериментов по моделированию.

Структурная схема тракта излучения представлена на рис. 53. Сформировать электрические импульсы с указанными параметрами несложно. Однако излучить подобный широкополосный сигнал с небольшими искажениями в воду очень трудно, так как существующие излучатели имеют относительную полосу обычно

не более 15%, а относительная ширина спектра сигналов дельфинов свыше 100%. Пути решения этой проблемы рассмотрены ниже.

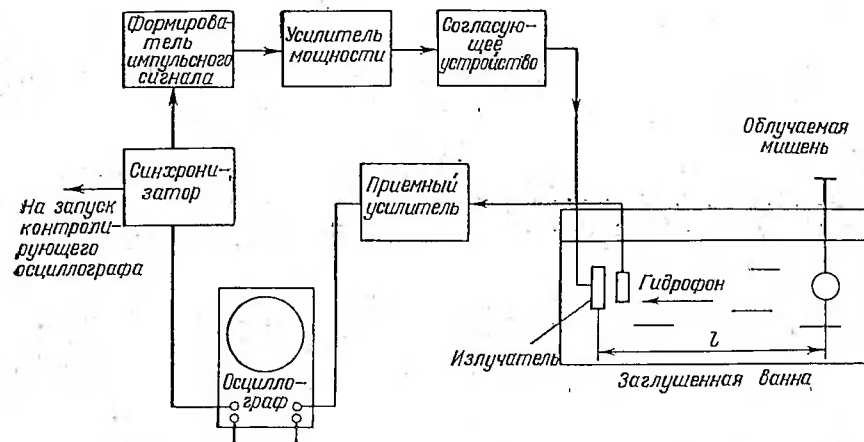


Рис. 53. Схема тракта излучения для моделирования.

Схема рис. 53 позволила получить частоту следования импульсов 20—1000 Гц при несущей частоте 20—130 кГц. Число формируемых периодов синусоиды можно было изменять от 1 до

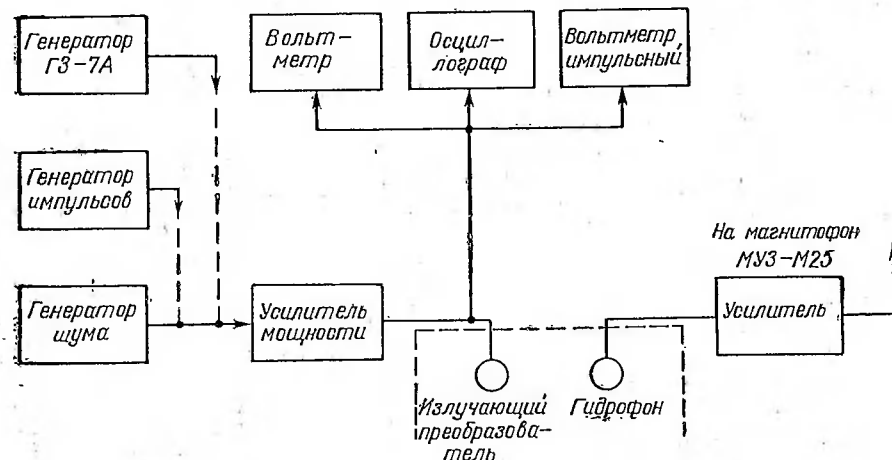


Рис. 54. Схема тракта регистрации для моделирования.

10 при любой несущей. Акустическая мощность составляла 140 Вт.

Структурная схема приемного тракта приведена на рис. 54. Основным элементом тракта является приемный гидрофон, так

как его частотная характеристика определяет в основном степень искажений регистрируемого сигнала. Создание широкополосного усилительного тракта в данном случае принципиальных трудностей не представляет. Типы и конструкции широкополосных гидрофонов рассмотрены в работах [6, 43, 68].

В экспериментах по моделированию использовался сферический гидрофон диаметром 7 мм из титаната бария с чувствительностью 7 мкВ/Па и цилиндрический гидрофон из того же материала, обладающий направленностью в вертикальной плоскости, с чувствительностью 20 мкВ/Па. Неравномерность частотных характеристик в диапазоне 10—230 кГц составляла не более 4 дБ. Входной каскад предварительного усилителя приемного

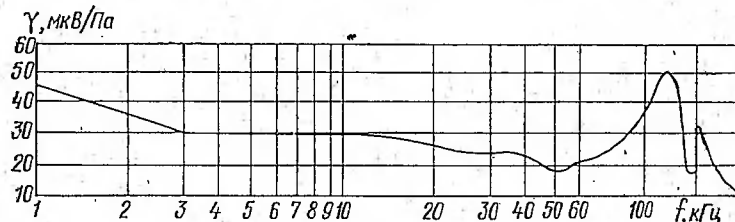


Рис. 55. Амплитудно-частотная характеристика тракта регистрации.

тракта выполнен на полевом триоде. Амплитудно-частотная характеристика тракта регистрации показана на рис. 55.

Моделирование в лабораторных условиях предъявляет целый ряд требований к используемому бассейну. Основное из этих требований — создание малых уровней реверберации (меньше 30—40 дБ). Для выполнения этого требования применяют звукопоглотители, корректировку результатов с учетом интерференции, импульсное излучение и т. д. [6].

Существующие звукопоглощающие покрытия основаны либо на свойстве клина изменять волновое сопротивление от вершины к основанию, либо на резонансном поглощении акустической энергии в воздушной полости [51]. Высота акустического клина должна быть не менее длины волны акустических колебаний в воде. Для изготовления покрытий используют такие материалы, как смесь цемента и опилок — инсулькрит, а также смесь синтетического каучука с опилками и графитом — опшанол, различные породы дерева, в частности кедр, кипарис, красное дерево. Звукопоглощающие опшаноловые покрытия проектируют на диапазон частот 5—80 кГц, при этом достигается коэффициент поглощения по интенсивности 0,96—0,99.

Получить одинаковое заглушение бассейна в диапазоне частот 10—230 кГц практически невозможно. Тем не менее с применением системы временно́го стробирования, соответствующей геометрии

эксперимента и обычной звукопоглощающей резины, можно получить уровень паразитных сигналов меньше 30—40 дБ [11, 14].

Весьма важным является выбор и обоснование размеров бассейна, расчет расположения в нем преобразователей и облучаемой мишени. Практическая методика инженерного расчета изложена в работе [6]. При этом возможны два подхода к расчету: при заданных размерах бассейна выбирается длительность акустических импульсов, их средняя частота или по заданным параметрам сигналов обосновываются размеры бассейна.

Рассмотрим возможные пути распространения акустических сигналов (рис. 56) при заданном расположении излучателя и гидрофона. Первым в точку приема попадает прямой сигнал и лишь затем его отражение. Импульсный режим работы предполагает, что разность путей распространения первого прямого и первого отраженного импульсов больше, чем длительность зондирующего сигнала. Минимальная разность путей распространения составляет Ct_0 , м, где C — скорость звука в воде, t_0 — минимальная разность времени распространения импульсов.

Минимальную длину L и ширину или глубину W бассейна можно определить как

$$L = d + Ct_0;$$

$$W = [(d + Ct_0)^2 - d^2]^{1/2} = (2dCt_0 + C^2t_0^2)^{1/2}.$$

При этом длительность зондирующего сигнала должна удовлетворять условию

$$\tau_n < 0,5 \frac{L}{C}.$$

Взаимное влияние преобразователей мало при условии

$$d \gg \frac{2}{\lambda} (S_1 S_2)^{1/2},$$

где d — расстояние между преобразователями; S_1 — площадь излучателя; S_2 — площадь гидрофона; λ — длина волны.

Диаграмма направленности излучателя считается сформированной, и акустическую волну можно считать плоской, если выполняется соотношение

$$r \geq \frac{D_2}{\lambda},$$

где D_2 — диаметр излучателя; λ — длина волны; r — расстояние от излучателя до рассматриваемой точки пространства.

Например, при диаметре излучателя $D = 0,08$ м и длине волны наивысшей частоты излучаемого спектра $\lambda = 0,01$ м, $r = 0,64$ м. Таким образом, облучаемая мишень должна располагаться на расстоянии не менее $0,64$ м от излучателя.

Как уже упоминалось выше, наибольшую трудность для моделирования представляет получение широкополосных зондирующих сигналов, подобных сигналам дельфинов. Остановимся более подробно на некоторых путях решения этой задачи.

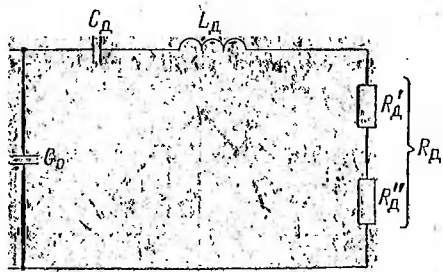


Рис. 57. Эквивалентная схема электроакустического преобразователя. C_0 — статическая емкость преобразователя; L_d, C_d — реактивные динамические элементы, учитывающие механические и пьезоэлектрические свойства преобразователя, реактивную реакцию соколеблющейся массы воды; R'_d, R''_d — механические потери и сопротивление излучения преобразователя соответственно.

Основные методы получения широкополосных сигналов следующие: демпфирование электроакустических преобразователей, электрическая коррекция частотных характеристик преобразователей, использование электронной предсказывающей схемы.

Применение этих методов для гидроакустических преобразователей на частотах 10 — 200 кГц имеет ряд особенностей, на которых следует остановиться более подробно.

При методе демпфирования преобразователей расширение полосы пропускания производится путем снижения добротности резонансной системы за счет присоединения к ней согласующих резонансов или демпфирующих масс. Это равносильно подключению шунтирующего сопротивления к контуру, в качестве которого можно представить эквивалентную схему преобразователя. В работах [15, 45] рассмотрено влияние демпфирования и согласующих переходных слоев на чувствительность и полосу преобразователей. Как показывают расчеты, демпфирование преобразователя ведет к некоторому расширению полосы пропускания и снижению его чувствительности. Кроме того, несколько ослабляется зависимость формы частотной характеристики от величины актив-

ного электрического сопротивления, шунтирующего преобразователь со стороны генератора. Демпфер изготавливается на основе эпоксидной смолы с наполнителем из вольфрамового порошка.

При одном из сочетаний электрических и акустических параметров полоса пропускания преобразователя с демпфером была расширена в 2 раза, при уменьшении чувствительности — на 5 — 6 дБ.

Известный способ расширения полосы пропускания стержневых преобразователей — применение четвертьволнового слоя с определенной величиной удельного акустического сопротивления — был использован в работе [15] для расширения полосы цилиндрического преобразователя. При этом было получено значение относительной полосы пропускания $\Delta f/f_{cp} = 110\%$.

Использование данного метода для гидроакустических излучателей моделирующих устройств, к сожалению, не всегда возможно из-за существенно более высоких требований к интенсивности излучения и значительно более низких частот, чем в работе [15].

Рассмотрим теперь метод электрической коррекции частотных характеристик преобразователей. Эквивалентная электрическая схема для электроакустического преобразователя представлена на рис. 57.

Эквивалентная схема преобразователя может рассматриваться как реактивный LC -четыреполюсник, нагруженный на чисто активное сопротивление R_n . Согласно [12] звуковое давление, создаваемое преобразователем в воде, достигает максимума на частоте механического резонанса. При этом входная проводимость $G_{вх}$ также достигает максимума. Зависимость интенсивности возбуждаемой звуковой волны $I(\omega)$ совпадает с зависимостью $G_{вх}(\omega)$ [13], если считать, что напряжение на входе преобразователя поддерживается постоянным в интервале частот.

Чтобы упростить задачу, можно рассматривать эквивалентную схему преобразователя как одиночный колебательный контур. Частотная зависимость тока, протекающего через активное сопротивление контура, совпадает с частотной зависимостью акустического давления, создаваемого излучателем в дальней зоне [31]. Эта зависимость имеет резонансный характер.

Задача расширения полосы пропускания в рассматриваемом случае может быть решена путем включения согласующего четырехполюсника, трансформирующего входное сопротивление преобразователя во входное сопротивление, близкое к активному и постоянное в заданной полосе частот. Это может быть достигнуто путем введения в эквивалентную схему преобразователя системы из двух связанных контуров. Схема корректирующей цепи вместе с эквивалентом преобразователя показана на рис. 58.

Для согласования выходного сопротивления генератора с входным сопротивлением согласующего четырехполюсника в схему включается широкополосный трансформатор. На рис. 59, а

представлен импульс, излучаемый преобразователем с согласующим устройством. Для сравнения на рис. 59, б показан импульс, излученный обычным преобразователем. Как видно из осциллограмм, применение такого устройства значительно расширяет полосу излучающего тракта.

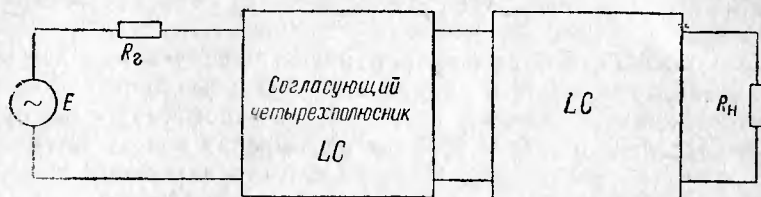


Рис. 58. Схема корректирующей цепи для излучения.

В методе предсказывающей схемы используется искусственное укорочение переходного процесса излучателя из-за подачи специального входного сигнала или действия обратной связи [12].

Импульсная характеристика узкополосного преобразователя представляет собой отрезок синусоиды, состоящий из 5—8

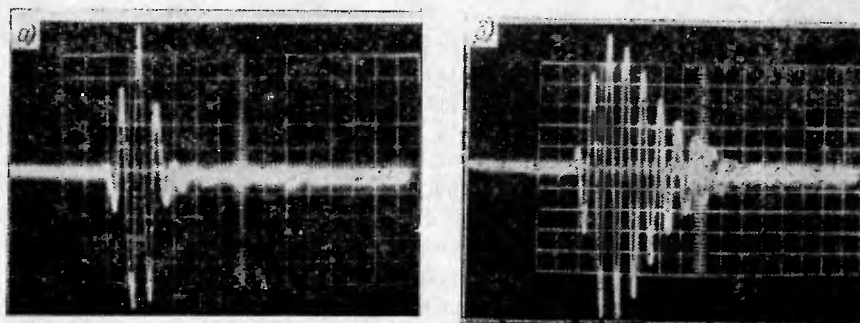


Рис. 59. Импульсы излучателя: а — с корректором; б — без корректора. Масштаб развертки 40 мкс/дел.

периодов. Импульсная характеристика предсказывающей цепи может быть определена из решения уравнения Вольтерра 2-го рода

$$\varphi_{o.o}(t) = \int_0^t h_{\perp 2}(t-\tau) h_{\perp K}(\tau) d\tau, \quad (39)$$

где $h_{\perp 2}$ и $h_{\perp K}$ — импульсные характеристики излучателя и предсказывающей цепи; $\varphi_{o.o}(t)$ — акустический сигнал, подобный сигналу дельфина.

Применим к выражению (39) преобразование Лапласа и получим

$$\Phi_{o.o}(p) = K_2(p) K_K(p),$$

где

$$K_2(p) = L\{h_{\perp 2}(t)\};$$

$$K_K(p) = L\{h_{\perp K}(t)\}. \quad (40)$$

Полагая

$$\varphi_{o.o}(t) = A \sin \omega_0 t \left[1(t) - 1\left(t - \frac{2\pi m}{\omega_0}\right) \right];$$

$$h_{\perp 2}(t) = B \sin \omega_0 t \left[1(t) - 1\left(t - \frac{2\pi n}{\omega_0}\right) \right],$$

где A и B — постоянные; $m < n$, получим

$$K_K(p) = \frac{A}{B} \frac{1 - e^{-p \frac{2\pi m}{\omega_0}}}{1 - e^{-p \frac{2\pi n}{\omega_0}}}. \quad (41)$$

Структурная схема предсказывающей цепи, соответствующая описанной формуле (41), приведена на рис. 60. Схема выполнена на базе разветвленной цепи [12]. Осциллограммы импульса, полученного от этой схемы, изображены на рис. 61. Таким методом удастся получить относительную полосу излучения до 100% и больше при дополнительном заглушении 4—6 дБ. Существенным

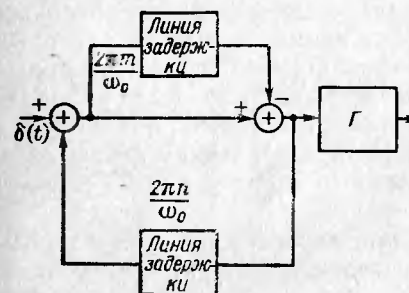


Рис. 60. Схема предсказывающей цепи.

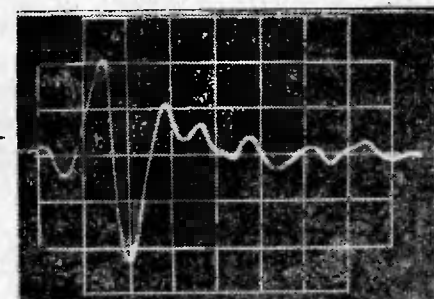


Рис. 61. Импульс излучателя с предсказывающей цепью.

преимуществом данного метода перед вышеописанным является возможность его применения для сигналов мощности до нескольких киловатт.

Следует отметить, что для моделирования сигналов дельфинов трудно применить взрывные или искровые излучатели. Хотя излучатели и дают короткие акустические импульсы, но изменять их параметры невозможно.

Широкополосные зондирующие сигналы имеют большое самостоятельное значение, так как позволяют создать гидроакустические системы, получающие максимальную информацию об объекте, необходимую для распознавания.

§ 11. Анализ результатов моделирования

С помощью аппаратуры, описанной в предыдущем параграфе, были проведены эксперименты по получению эхо-сигналов от мишеней. Мишени для этих экспериментов были выбраны те же, что и в натуральных опытах с дельфинами по определению характеристик их локационного аппарата [11, 14, 33, 34]. Результаты экспериментов, выполненных на моделирующей установке с различными мишенями, сведены в табл. 2. Там же приведена осциллограмма зондирующего сигнала.

В первой серии опытов (см. табл. 2) исследовались эхо-сигналы от мишени, по которой определялась разрешающая способность эхолокационного аппарата дельфина по дальности. Мишенью являлись две круглые металлические пластины, разнесенные на расстояние l . Изменение l приводит к изменению расстояния между парой импульсов в эхо-сигнале.

Во второй серии опытов исследовались эхо-сигналы от мишени, которая служила для определения угловой разрешающей способности у дельфина. Мишень состояла из двух металлических цилиндров диаметром 60 мм и высотой 10 мм. Расстояние l между цилиндрами можно было изменять. При этом изменяется как число импульсов в эхо-сигнале, так и интервал между импульсами, что хорошо видно на осциллограммах.

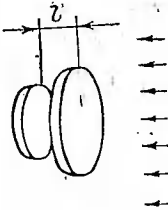
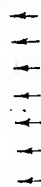
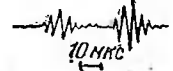
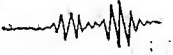
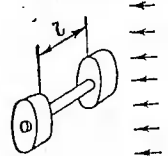
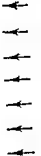

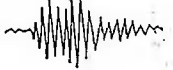

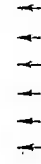
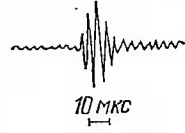


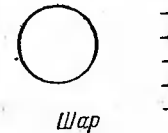

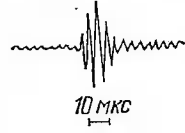


В третьей серии опытов проводилось исследование сигналов, отраженных от латунного и стального шаров, каждый из которых имел диаметр 70 мм. Такие шары были использованы в натуральных опытах по различению дельфинами материала мишени. Эхо-сигналы состояли из последовательности импульсов, аналогичных по форме зондирующему сигналу. Интервалы между импульсами в эхо-сигнале составляют: от стального шара $\Delta\tau = 60$ мкс, от латунного шара $\Delta\tau = 90$ мкс.

В четвертой серии опытов были исследованы эхо-сигналы, излучаемые латунными шарами разного диаметра. Эти мишени применялись для определения способности дельфина различать шары по диаметру. Каждый эхо-сигнал состоит из последовательности импульсов, интервал между которыми различен в зависимости от диаметра шара: при диаметре шара 70 мм $\Delta\tau = 90$ мкс, при диаметре шара 30 мм $\Delta\tau = 50$ мкс.

Предварительная обработка эхо-сигналов показала, что амплитудно-временные характеристики, а также соответствующие им спектральные характеристики меняются при изменении дифференцировочных параметров мишеней. Это позволяет сделать вывод, что соответствующие изменения структуры эхо-сигналов дают возможность дельфину произвести дифференцировку мишеней.

Проанализируем эхо-сигналы, излучаемые упругими шарами, используемыми в натуральных экспериментах. Выбор шаров в качестве мишеней не случаен — для тела сферической формы можно

Виды мишеней и эхо-сигналы, получаемые при моделировании

Серия опытов	Облучаемые мишени	Зондирующий сигнал	Дифференцировочный параметр, мм	Эхо-сигналы, отраженные от мишени	
1			$l = 60$		
			$l = 80$		
2			$l = 100$		
			$l = 30$		
3				Латунь $\varnothing 70$	
				Сталь $\varnothing 70$	
4				Латунь $\varnothing 70$	
				Латунь $\varnothing 30$	

получить строгое математическое решение задачи отражения, сравнить его с результатами физического моделирования и построить сравнительно простую структурную модель отражения от упругой сферы, основанную на физических законах отражения. Использование структурной модели значительно упрощает машинные эксперименты.

В работах [17, 20; 29] показано, что дельфины с большой вероятностью могут различать мишени шаровидной формы, изготовленные из разных материалов. Для анализа эхо-сигналов, излучаемых такими мишенями при облучении их короткими акустическими сигналами, произведено исследование отраженного поля от упругой сферы [11, 12].

Процесс образования эхо-сигнала от упругой сферы иллюстрируют рис. 36, 37, 38. Плоская волна, падающая на сферу из точки А (см. рис. 36), возбуждает собственные колебания сферы. С учетом функции рассеяния плоской волны $f_{\infty}(ka)$ эхо-сигнал может быть записан в виде

$$S_{\text{отр}}(t) = \sum_{p=0}^l A_p |f_{\infty}(ka)|_p \sin [2\pi(ka)pt - \arg_p f_{\infty}(ka)], \quad (42)$$

где $|f_{\infty}(ka)|_p$ и $\arg_p f_{\infty}(ka)$ — дискретные значения $|f_{\infty}(ka)|$ и $\arg f_{\infty}(ka)$, взятые из [84]; A_p — нормированный амплитудный спектр зондирующего сигнала.

На рис. 38 представлены эхо-сигналы, рассчитанные на ЦВМ по соотношению (42). Когда огибающая амплитудного спектра зондирующего импульса перекрывает осциллирующий участок функции $|f_{\infty}(ka)|$, эхо-сигнал представляет собой последовательность импульсов, следующих с интервалом, обратно пропорциональным интервалу между максимумами функции $|f_{\infty}(ka)|$. Таким образом, временной интервал Δt может служить характеристикой материала и размера упругой сферы.

Для подтверждения приведенных расчетов были выполнены экспериментальные исследования на шарах, изготовленных из латуни и алюминия. Диаметры латунных шаров составляли 70, 50, 30 мм, алюминиевого шара — 70 мм. Облучение шаров производилось в акустической заглушенной ванне при помощи аппаратуры, описанной в § 10.

На рис. 42, а, б, показаны осциллограммы эхо-сигналов от алюминиевого и латунного шаров диаметром 70 мм. Расстояние между импульсами Δt , полученное в эксперименте для алюминиевого шара — 60 мкс, для латунного — 92 мкс. Расчетные величины соответственно равны 61 и 88 мкс. На рис. 42, в, г представлены эхо-сигналы от латунных шаров диаметром 30 и 50 мм.

Как видно из математических соотношений и экспериментальных данных, эхо-сигнал от упругого шара представляет собой затухающую последовательность импульсов. Расстояние между

импульсами и степень их затухания зависят от размера и материала шара, а также от параметров зондирующего сигнала.

В работе [7] высказано предположение, что такая структура эхо-сигнала может быть объяснена возбуждением и распротраиванием в материале шара поверхностных волн. Релевская волна, «бегущая» по поверхности шара, возбуждает в жидкости волну, отходящую от поверхности тела [8]. Первый импульс в эхо-сигнале образуется за счет зеркального отражения падающего шара, возбуждаемого падающим импульсом. При этом учитываются только поверхностные волны, в предположении, что

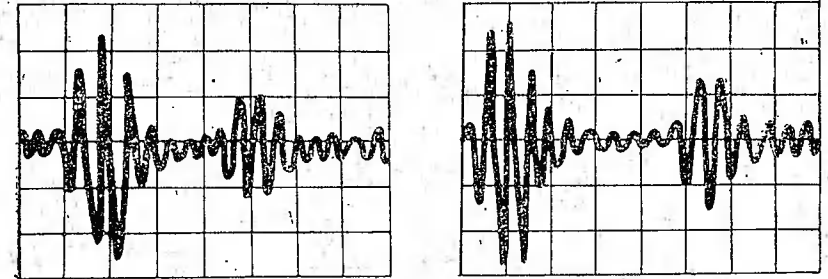


Рис. 62. Осциллограммы отраженных сигналов при средней частоте 100кГц: а — латунный шар диаметром 70 мм. K_p теоретически равно 0,432 (экспериментально — 0,45); б — алюминиевый шар диаметром 70 мм. K_p — теоретически равно 0,511 (экспериментально — 0,5).

остальные виды возбуждаемых колебаний мало влияют на эхо-сигнал.

Коэффициент передачи релевской волны можно рассчитать по формуле

$$K_p(f) = e^{-\frac{Lf}{10V_n}} \quad (43)$$

где L — длина пути, проходимого волной по поверхности шара; V_n — скорость распространения поверхностных волн; f — средняя частота колебаний.

Можно предположить, что энергия отраженного сигнала примерно равна энергии, возбужденной в жидкости поверхностной волной. Поэтому соотношение между импульсами в эхо-сигнале определится затуханием поверхностной волны. Анализ экспериментальных данных подтверждает это предположение. Осциллограммы этих отраженных сигналов приведены на рис. 62.

На основании вышеизложенного при помощи моделирующей установки были подобраны шары, отличающиеся по размеру и материалу так, чтобы эхо-сигналы от них были примерно одинаковыми. Эксперименты показали, что дельфин практически не различает мишени шаровидной формы, если интервал между импульсами в эхо-сигнале одинаков [20, 22]. Таким образом,

можно предположить, что дельфин использует временной признак в качестве информативного для распознавания.

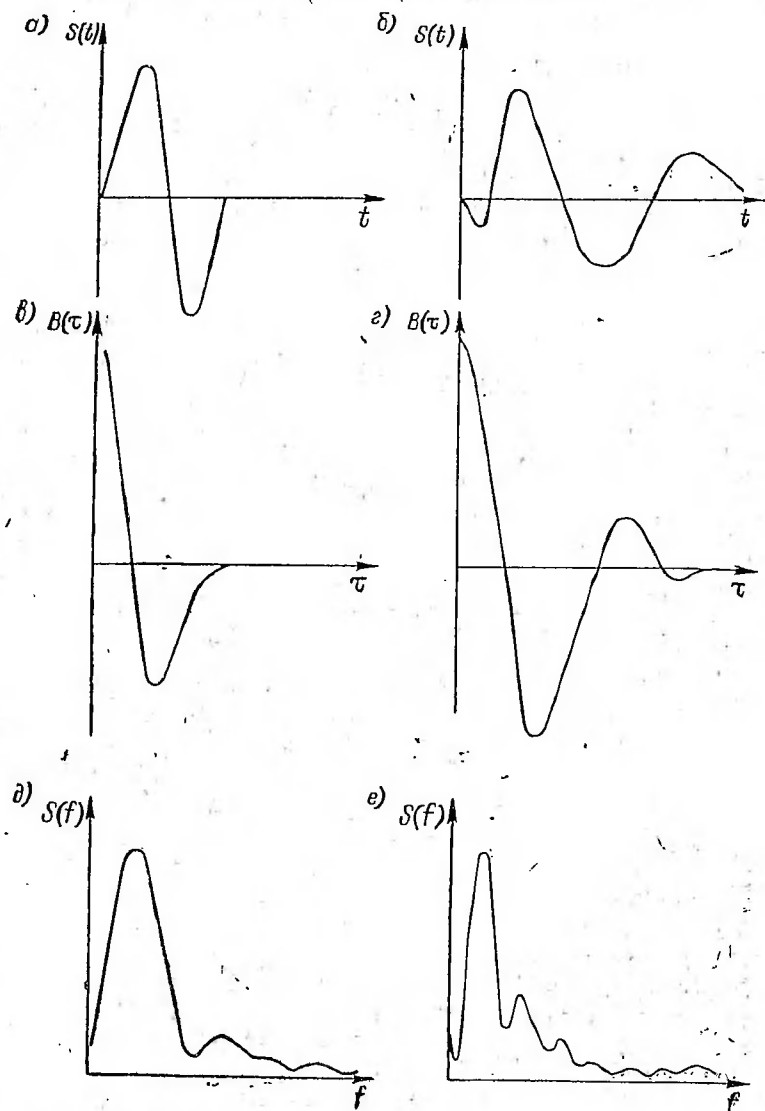


Рис. 63. Зондирующие сигналы двух видов — а, б; их характеристики, рассчитанные на ЦВМ: автокорреляционные функции — в, г, спектры — д, е.

Для выявления информационных признаков в сигналах дельфинов и эхо-сигналах, полученных при моделировании, их необходимо подвергнуть спектральному и корреляционному анализу

с помощью ЦВМ. Была разработана методика спектрального и корреляционного анализа сигналов, зарегистрированных на фотоленку [48].

Используемый метод позволил анализировать во временной и частотной областях заданные графически процессы. В диапазоне частот до 500 кГц максимальная ошибка дискретизации не превышает 3%. Выбор частотного диапазона для анализа зависит только от возможностей регистрирующей аппаратуры. Изменение этого диапазона на ЦВМ осуществляется изменением скорости ввода данных, что относится к достоинствам метода.

В качестве примера на рис. 63 приведены зондирующие сигналы дельфинов, их автокорреляционные функции и амплитудные спектры.

Из вышеизложенного следует, что физические отличия мишеней определяют соответствующие отличия в эхо-сигналах и их спектрах.

Остаются нерешенными следующие вопросы: 1. Способно ли животное выделить те классификационные признаки, которые, по нашим предположениям, несут информацию об атакуемых мишенях? 2. Хватит ли чувствительности анализаторов дельфинов?

На эти вопросы дают ответ работы [16, 28, 38], подтвержденные и другими исследователями, например [20, 24, 30]. Так, если временной интервал между импульсами в эхо-сигналах от упругих шаров составляет 50—100 мкс, то дельфин различает его, поскольку минимальный временной интервал, дифференцируемый животным, составляет <math>< 17</math> мкс [20, 28]. То же самое можно сказать и о частотном анализе. Если частотный интервал между максимумами спектра эхо-сигнала, например, от алюминиевого шара \varnothing 8 см составляет 14 кГц, то разрешающая способность слухового анализатора животного на частотах 50—100 кГц — менее 1 кГц [16]. Конечно, логичнее всего предположить, что дельфин как исключительно сложная и высокоорганизованная распознающая система принимает решение не по одному какому-либо признаку (временному или спектральному), а по их совокупности или же использует временное описание сигнала при корреляционной обработке [32].

Моделирование процесса классификации тестовых мишеней на основе корреляционного метода было проведено в работе [49]. При этом решение задачи классификации стало возможным по двум причинам: применению класса зондирующих сигналов, подобных сигналам дельфинов, и установлению того факта, что отраженный от мишени эхо-сигнал содержит информацию о ее размерах, материале и форме.

Для решения задачи классификации необходимо предположить следующее:

1) имеется m классов объектов с априорными вероятностями их появления;

2) набор реализаций эхо-сигналов любого класса содержит информацию, достаточную для принятия решения о принадлежности к данному классу;

3) отношение сигнал/шум много больше единицы, что соответствует условиям моделирования.

В памяти классифицирующего цифрового автомата заложен алфавит эталонов, представляющих собой функции, комплексно-сопряженные со статистически усредненными описаниями эхо-сигналов для каждого из m классов объектов. Максимум корреляции эталона и реализации эхо-сигнала соответствует наличию в реализации искомого класса сигналов. При переборе эталонов, решение о принадлежности объекта к данному классу сигналов принимается по максимуму пика корреляции. Алгоритм классификации был реализован в дискретной форме на универсальной ЦВМ «Раздан-3». Операции преобразования Фурье осуществлялись алгоритмом БПФ. При моделировании процесса классификации алгоритму ЦВМ были предъявлены эхо-сигналы от различных мишеней. Используя алфавит эталонов, определяем принадлежность объекта к данному классу. При этом максимум пика корреляции эталона и реализации эхо-сигнала, соответствующий принятию решения, превышал уровень максимума пика корреляции эталона и помехи.

Данные результаты являются предварительными, поскольку метод опробовался на простейших мишенях (шарах) только для случая дихотомии (двухклассового распознавания). Вполне возможно, что переход к конечномерному пространству четких, физически обусловленных признаков, дает более простой и надежный алгоритм классификации, чем корреляционный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты исследований гидролокатора дельфина показывают, что это — высокоорганизованная, адаптивная система, имеющая более высокие параметры по точности и достоверности результатов, чем техническая система подобного назначения.

Особенно интересными с практической точки зрения являются разрешающая способность по углам и дальности, способность к классификации, помехозащищенность, адаптация к различным режимам работы, совместимость. Энергетические же параметры гидролокатора дельфина сравнительно мало отличаются от аналогичных параметров технических систем, хотя последние существенно проигрывают в ресурсе и габаритах.

Наиболее перспективными, по-видимому, будут работы по созданию аналоговых и дискретных устройств опознавания и адаптации.

Дельфина можно использовать (и это очень важно!) как модель для решения задачи оптимизации параметров технических гидролокаторов. При решении таких задач разработчик часто не знает, все ли граничные условия, как, например, помехи, условия распространения и т. д., им учтены. Решение задачи оптимизации зондирующих сигналов для условий гидролокации дельфина (см. § 3) позволяет сравнить расчетные данные с результатами экспериментов над дельфинами и, таким образом, ответить на поставленный вопрос. В данном случае решение задачи оптимизации можно сравнить с заранее известным частным решением, полученным из экспериментов с дельфинами. Естественно, что эксперименты лучше проводить в открытых акваториях, что дает возможность применять большие мишени и приближает условия работы дельфина к условиям работы технического гидролокатора.

Важным этапом в дальнейших исследованиях по бionике должны быть исследования способности дельфина решать различные задачи гидролокации — обнаружение, измерение параметров цели, классификацию, сопровождение и т. д. одновременно для нескольких целей. Подобные задачи в технической локации пока не могут быть решены с такой высокой точностью и вероятностью, как это делает дельфин.

На основании современных исследований можно привести следующие данные по гидролокатору дельфина:

1. Рабочая частота — 20—120 кГц.
2. Длительность зондирующего импульса — 20—100 мкс. Форма импульса от 1 до 8 периодов синусоиды (значительно изменяется в зависимости от ракурса).
3. Частота следования импульсов — 3—200 Гц.
4. Максимальный уровень излучения — 90 дБ относительно 1 Па.
5. Чувствительность — 40 дБ относительно 1 Па. Частотная характеристика чувствительности обратна характеристике шумов моря и имеет максимум при малом волнении моря (0—2 балла) на частотах около 70 кГц.
6. Максимальная дальность обнаружения около 200 м. Дальность обнаружения шара \varnothing 70 мм — 100 м.
7. Разрешающая способность по дальности — 1,5 м.

8) Разрешающая способность по углу в горизонтальной плоскости при малой базе — $19'$, при большой базе — $60'$.

9) Импульсная диаграмма направленности в горизонтальной плоскости симметрична и равна $3^\circ 30'$ по уровню 3 дБ, боковые лепестки составляют 2 дБ при угле $\pm 5^\circ$; в вертикальной плоскости асимметрична и равна $7^\circ 12'$ по уровню 3 дБ (вверх — $2^\circ 12'$, вниз — 5°); боковые лепестки — 20 дБ.

10) Параметры гидролокатора адаптивны к помехам и условиям локации. Гидролокатор обладает акустической совместимостью.

Приложение

Разветвленные цепи. Некоторые положения теории. Применение и ограничения реализации

Разветвленной цепью называют схему, состоящую из каскадно соединенных четырехполосников (основная структура), охваченных любыми прямыми и обратными связями. Это наиболее обобщенная схема четырехполосника, пригодная для инвариантных во времени устройств функциональной обработки и преобразования сигналов. Основное отличие передаточной функции разветвленной цепи от передаточной дробно-рациональной функции четырехполосника заключается в том, что в качестве независимых переменных принимаются не комплексные частоты, а элементарные передаточные функции основной структуры и связей. Существуют чисто пассивные, гибридные активно-пассивные и дискретные реализации таких цепей.

По типу основной структуры и связей различают взаимноэквивалентные канонические схемы разветвленных цепей трех видов: 1) все элементарные передаточные функции прямых и обратных связей вещественны (положительны или отрицательны), а элементарные передаточные функции основной структуры комплексны; 2) все элементарные передаточные функции прямых и обратных связей комплексны, а элементарные передаточные функции основной структуры вещественны; 3) все элементарные передаточные функции основной структуры и связей комплексны.

Канонические схемы первого вида применяют, например, при построении трансверсальных фильтров. Для низкочастотных схем с усилительными каскадами более применимы канонические схемы второго вида. При учете паразитных реактивностей используют схемы третьего вида.

Значительный интерес представляет рассмотрение разветвленных цепей с точки зрения возможностей реализации их для всех практически встречающихся передаточных функций. В этом случае требуется определить элементарные передаточные функции, например, для канонической схемы основной структуры первого вида, по которой можно разложить общие передаточные функции. Математически эту задачу представляют как разложение импульсной характеристики разветвленной цепи по обобщенному ряду Фурье. На основании теорем Мюнца и Сеге в качестве таких элементарных передаточных функций можно брать $e^{-\alpha_i t}$, $\delta(t - t_i)$, $si \omega_{гр}(t - t_i)$, где α_i , t_i , $\omega_{гр}$ — постоянные; i — числа натурального ряда.

Реализация элементарных передаточных функций вида $e^{-\alpha_i t}$ возможна на RC-цепях, $\delta(t - t_i)$ или $si \omega_{гр}(t - t_i)$ на LC-цепях (приблизительно) p^i , $1/p^i$ требуют создания схем кратного дифференцирования или интегрирования. Приближенное решение последней задачи для низкочастотных цепей (до сотен килогерц) осуществляется с использованием одноконтурных цепей. Для более высоких частот (до 30 МГц) необходимо учитывать паразитные реактивности. Поэтому реализацию производят по схемам трансверсального фильтра, образующего конечные разности и производящего алгебраическое суммирование.

Применение различных систем элементарных передаточных функций позволяет образовывать системы ортогональных функций, создавать ортогональные фильтры, производить аналоговое моделирование дифференциальных и интегральных уравнений и тем самым решать задачи анализа, синтеза и коррекции для бионики.

Аналоговые разветвленные цепи могут быть использованы в качестве прототипа для перехода к дискретным моделям. При моделировании по рекуррентным соотношениям применяют стандартную Z или билинейную трансформацию. Цифровые модели обладают большими возможностями реализации, чем аналоговые. Они могут моделировать нелинейные и параметрические цепи, как например, детекторы, дифференцирующие устройства в комплексной плоскости, плавно перестраиваемые по полосе фильтры, трансформаторы спектра и т. д. К недостаткам дискретных моделей следует отнести то, что они эквивалентны аналоговым моделям разветвленных цепей с однородной основной структурой или связями и имеют относительно низкие рабочие частоты.

Любая из упомянутых систем элементарных передаточных функций позволяет разложить практически используемые передаточные функции, для которых выполняется условие физической реализуемости — «реакция после воздействия». Практически же пределы технической реализуемости определяют допусками на изготовление пассивных элементов, потерями в реактивностях при реализации высокодобротными реактивными цепями, ограничениями, накладываемыми на характеристики усилителей и внутренними шумами в разветвленной цепи.

Для однореактивной разветвленной цепи потенциальные возможности реализации, т. е. предельное количество элементарных передаточных взаимно ортогонализированных функций, определяются допусками на элементы цепи, для двухреактивной цепи высокой добротности — произведением полосы пропускания на время задержки (качеством цепи). Полоса пропускания зависит в этом случае от допустимого отклонения амплитудно-частотной или фазочастотной характеристик. Предельное качество цепи определяется потерями в реактивных элементах. Применение критерия модуля инварианта относительной чувствительности позволяет сравнить возможности реализации в различных базисах, т. е. при различных элементарных передаточных функциях.

Возможности реализации аналоговых разветвленных цепей увеличиваются с введением развязывающих линейных усилительных каскадов пропорционально \sqrt{n} . Однако следует учитывать, что развязывающие каскады имеют ограничения на полосу усиления. При большом числе элементов в структуре могут возникнуть ограничения реализации цепи из-за действия шумов. Все активные элементы гибридной пассивно-активной структуры могут работать с пренебрежимо малыми нелинейными искажениями, т. е. до конечного уровня сигнала. При микроминиатюрном и интегральном исполнении схемы такое ограничение уровня сигнала зависит и от пробойного напряжения или тока в пассивных элементах. Коэффициент усиления каскадов в таких структурах близок к единице, что увеличивает воздействие шумов.

1. Абрамов А. П., Голубков А. Г., Фрадкин В. Б. Аппаратура для исследования адаптации гидролокатора дельфина к различным помехам. — В кн.: Некоторые проблемы биологической кибернетики. Л., «Наука», 1972, с. 250—254.
2. Айрапетьянц Э. Ш., Константинов А. И. Эхолокация в природе. Л., «Наука», 1974.
3. Алексеева Т. В., Голубков А. Г., Ершова И. В. К вопросу об активной ширине спектра локационных сигналов дельфинов. — Труды Акустического института АН СССР, 1971, вып. XVII, с. 99—103.
4. Белькович В. М. Некоторые представления о возможностях локационного восприятия дельфинов. — «Экология», 1970, № 6, с. 89—93.
5. Белькович В. М., Борцов В. И. Локационное распознавание фигур сплошной конфигурации. — Труды Акустического института АН СССР, 1974, вып. XVII, с. 19—23.
6. Боббер Р. Гидроакустические измерения. М., «Мир», 1974.
7. Векслер Н. Д. Эхо-сигналы от упругих объектов в воде. Таллин, Институт кибернетики АН ЭССР, 1974.
8. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Релея и Лэмба в технике. М., «Наука», 1966.
9. Гийес Л., Сабате П. Основы акустики моря. Л., Гидрометеиздат, 1967.
10. Голубков А. Г., Ершова И. В., Жежерин А. Р. Методика и аппаратура обработки сигналов дельфинов. — Труды ЛИАП, 1969, вып. 64, с. 133—140.
11. Голубков А. Г., Жежерин А. Р. Исследование временной структуры сигнала, отраженного от упругой сферы в воде. — Труды ЛИАП, 1972, вып. 76, с. 24—34.
12. Голубков А. Г., Жежерин А. Р. Основы гидроакустики. Курс лекций, ЛИАП, 1975.
13. Голубков А. Г., Иваненко Ю. В. Исследование разрешающей способности эхолокатора дельфина по дальности. — Тезисы докладов к XXIII НТК ЛИАП, 1970, с. 65.
14. Григорьев В. П., Майышев Ю. А., Токарев В. С. Исследование характеристик эхолокационного аппарата дельфинов моделированием их зондирующих сигналов. — Труды ЛИАП, 1974, вып. 92, с. 167—169.

15. Днaнoв Д. Б., Кузьменко А. Г. Исследование возможности расширения полосы пропускания цилиндрических пьезопреобразователей. — «Акустический журнал», 1970, т. XVI, вып. 2, с. 236—240.

16. Дифференциальные пороги слухового анализатора дельфина по частоте. — Тезисы докладов к XXV НТК ЛИАП, 1972, с. 73. Авт.: Абрамов А. П., Голубков А. Г., Игнатъева Е. А., Королев В. И., Фрадкин В. Б.

17. Дифференцирование дельфином афалиной сферических и цилиндрических объектов. — IV Всесоюзная конференция по бионике. Краткие тезисы, 1973, Т. 2, с. 1—5. Авт.: Айрапетъянц Э. Ш., Воронин В. А., Орловский Д. Л., Сергеев Б. Ф., Чилингирис В. И.

18. Дубровский Н. А., Заславский Г. Л. О роли костей черепа в формировании пространственно-временной структуры зондирующего сигнала. — «Акустический журнал», 1975, т. XXI, вып. 3, с. 74—79.

19. Дубровский Н. А., Краснов П. С. Распознавание дельфинами-афалинами упругих шагов по материалу и размеру. — Труды Акустического института АН СССР, 1974, т. XVII, вып. 1, с. 9—18.

20. Дубровский Н. А., Титов А. А. Эхолокационное различие дельфином-афалиной шаровых мишеней, отличающихся одновременно размерами и материалом. — «Акустический журнал», 1975, т. XXI, вып. 3, с. 469—471.

21. Ершова И. В. Влияние верхней граничной частоты регистрирующей аппаратуры на искажения формы локационных сигналов дельфинов. — Труды ЛИАП, 1972, вып. 76, с. 19—23.

22. Ершова И. В., Жежерин А. Р., Игнатъева Е. А. О различиях в эхо-сигналах, используемых дельфинами при распознавании упругих шаров. — Труды ЛИАП, 1975, вып. 93, с. 87—91.

23. Заславский Г. Л. О направленности звукоизлучения у черноморского дельфина-афалины. — Труды Акустического института АН СССР, 1974, вып. XVII, с. 60—70.

24. Иваницко Ю. В. Разрешающая способность сонара дельфина по дальности. — IV Всесоюзная конференция по бионике. Краткие тезисы, 1973, т. 2, с. 102—105.

25. Исследование диаграммы направленности излучающего аппарата эхолокатора дельфина. — Тезисы докладов к XXIV НТК ЛИАП, 1974, с. 190—191. Авт.: Абрамов А. П., Алексеева Т. В., Воронин В. Р., Малышев Ю. А.

26. Исследование коммуникационных сигналов черноморского дельфина-афалины. — «Акустический журнал», 1974, т. XX, вып. 4, с. 518—525. Авт.: Бурдин В. И., Резник А. М., Скорняков В. М., Чулаков А. Г.

27. Исследование разрешающей способности эхолокационного аппарата дельфина по угловым координатам. — Труды ЛИАП, 1972, вып. 76, с. 3—8. Авт.: Абрамов А. П., Игнатъева Е. А., Малышев Ю. А., Фрадкин В. Б.

28. Исследование способности дельфина различать частоты монохроматических сигналов и измерения интервалов между импульсами. — VIII Всесоюзная акустическая конференция. Рефераты докладов, 1973, Т. 1, с. 127. Авт.: Абрамов А. П., Игнатъева Е. А., Малышев Ю. А., Токарев В. С., Фрадкин В. Б.

29. Исследование способности дельфинов к дифференцировке объемных предметов по линейным размерам и материалам. — В кн.: Некоторые проблемы биологической кибернетики, 1972, с. 101—104. Авт.: Абрамов А. П., Голубков А. Г., Ершова И. В., Фрадкин В. Б., Королев В. И.

30. Исследование эффективности слухового восприятия дельфина в зависимости от временных характеристик сигнала. — «Биофизика», 1975, Т. XX, вып. 4, с. 720—724. Авт.: Сапрыкин В. А., Ковтушенко С. В., Королев В. И., Дмитриева Е. С., Белов Б. И., Марьясин В. Г.

31. Камп Л. Подводная акустика. М., «Мир», 1972.

32. Лившиц М. С. Корреляционная модель опознавания объектов эхолокационными животными. — «Биофизика», 1975, Т. XX, вып. 5, с. 920—924.

33. Методика и аппаратура проведения экспериментов по дифференцировке объемных мишеней дельфинами. — Тезисы докладов к XXIII НТК ЛИАП, 1970, с. 59—60. Авт.: Абрамов А. П., Бурдин В. И., Ершова И. В., Королев В. И., Малышев Ю. А.

34. Некоторые вопросы аппаратурного моделирования гидролокатора дельфина. — Тезисы докладов к XXV НТК ЛИАП, 1972, с. 81—82. Авт.: Алексеева Т. В., Голубков А. Г., Игнатъева Е. А., Григорьев В. П., Малышев Ю. А.

35. Некоторые характеристики гидролокационных сигналов дельфинов. — VII Всесоюзная акустическая конференция по физической и технической акустике. Сборник докладов, 1973, с. 36—38. Авт.: Абрамов А. П., Голубков А. Г., Ершова И. В., Жежерин А. Р., Малышев Ю. А., Фрадкин В. Б.

36. Некоторые экспериментальные данные и перспективы изучения аналитаторной способности дельфина. — Труды ЛИАП, 1969, вып. 64, с. 128—132. Авт.: Голубков А. Г., Зворыкин В. Н., Ершова И. В., Королев В. И., Бурдин В. И., Малышев Ю. А.

37. Норрис К. Эхолокация у китообразных. — В кн.: Морская биоакустика. Л., «Судостроение», 1969, с. 362—379.

38. Об энергетических параметрах локационного аппарата черноморских афалин. — Труды ЛИАП, 1972, вып. 76, с. 9—12. Авт.: Голубков А. Г., Ершова И. В., Королев В. И., Малышев Ю. А.

39. О помехоустойчивости гидролокатора дельфина. — Труды Акустического института АН СССР, 1974, вып. XVII, с. 24—28. Авт.: Абрамов А. П., Голубков А. Г., Королев В. И., Фрадкин В. Б.

40. Подводная акустика. Под ред. Бреховских Л. М., М., «Мир», 1970.

41. Резников А. Е. «Акустические глаза» дельфина. — «Природа», 1972, № 12, с. 60—65.

42. Регистратор гидроакустических сигналов. Авторское свидетельство № 452756. — «Бюллетень изобретений», 1974, № 41. Авт.: Абрамов А. П., Ершова И. В., Жежерин А. Р., Малышев Ю. А.

43. Романенко Е. В., Томилини А. Г., Аршменко Б. А. К вопросу о звукообразовании и направленности звуков у дельфинов. — В кн.: Бионика. М., «Наука», 1965, с. 269—273.

44. Романенко Е. В. Физические основы биоакустики. Л., «Наука», 1974.

45. Сафонов В. И. К вопросу о расширении полосы пропускания искажателя ультразвукового дефектоскопа. — «Дефектоскопия», 1968, № 4, с. 55—60.

46. Сравнение локационных сигналов дельфинов с данными расчетов оптимальных сигналов. — ДАН СССР, 1975, т. 223, № 5, с. 1251—1252. Авт.: Голубков А. Г., Королев В. И., Антонов В. А., Игнатъева Е. А.

47. Титов А. А., Фадеева Л. М. О пространственной разрешающей способности эхолокатора дельфина. — Труды Акустического института АН СССР, 1974, вып. XVII, с. 47—53.

48. Токарев В. С., Петров В. В. Анализ локационных сигналов дельфинов на ЦВМ. — Труды ЛИАП, 1974, вып. 92, с. 162—166.

49. Токарев В. С. О применении алгоритма быстрого преобразования Фурье к задачам классификации. — Труды ЛИАП, 1975, вып. 93, с. 99—101.

50. Турнер Р. Методы изучения поведения китообразных. — В кн.: Морская биоакустика. Л., «Судостроение», 1969, с. 362—379.

51. Тюрин А. М., Сташкевич А. П., Таранов Э. С. Основы гидроакустики. Л., «Судостроение», 1966.

52. Френкс Л. Теория сигналов М., «Сов. радио», 1974.

53. Харкевич А. А. Собрание сочинений, т. 1, «Наука», М., 1973.

54. Хоменко Б. Г. Принципы функционирования лобного выступа как фокусирующей системы у дельфина. — В кн.: Бионика-73. АН СССР, 1973, с. 110—111.

55. Чемоданов В. К., Калита Е. В.; Резвов Р. Н. Аттестация целей, используемых при исследовании локационных способностей дельфинов; методами гидроакустического моделирования. — Тезисы докладов к XXIII НТК ЛИАИ, 1970, с. 60.

56. Чилингириш В. И., Иваненко Ю. В. Направленность слухового приемника черноморских дельфинов. — IV. Всесоюзная конференция по бионике. Краткие тезисы, 1973. Т. II, с. 247—250.

57. Эванс У., Сатерленд У., Бейл Р. Диаграммы направленности звуков дельфинов. — В кн.: Морская биоакустика. II. «Судоостроение», 1969, с. 380—398.

58. Эхолокационное дифференцирование и характеристика получаемых импульсов у дельфина. — ДАН СССР, 1969, Т. 188, № 5, с. 1197—1198. Авт.: Айрапетьянц Э. Ш., Толубков А. Г., Ершова И. В., Жежерин А. Р., Зворыкин В. Н., Королев В. И.

59. Эхолокационные возможности дельфинов-белобочек. — «Зоологический журнал», 1969, Т. 48, № 6, с. 876. Авт.: Белькович В. М., Борисов В. И., Гуревич В. С., Крушицкая Н. Л.

60. Яблоков В. И.; Белькович В. М., Борисов В. И. Киты и дельфины. М., «Наука», 1972.

61. Charman S. Dolphins and multifrequency, multiangular images. — «Science», 1968, v. 160, N 3824, p. 208—209.

62. Dreher J. J. Acoustic holographic model of cetacean. — In: «Echolocation acoustical holography», 1969, v. 1, Plenum Press, N.Y., p. 127—137.

63. Evans W. E., Prescott J. H. Observations on the sound production capabilities of the bottlenose porpoise: a study of whistles and clicks. — «Zoologica», 1962, v. 47, N 3, p. 121—125.

64. Freedman A. The high frequency echo structure of some simple body shapes. — «Acustica», 1962, v. 12, N 2, p. 61—70.

65. Hickling R. Analysis of echoes from a solid elastic sphere in water. — «J. Acoust. Soc. Amer.», 1962, v. 34, N 10, p. 1582—1592.

66. Johnson C. S. Relation between absolute threshold and duration of tone pulse in the bottlenose porpoise. — «J. Acoust. Soc. Amer.», 1968, v. 43, N 4, p. 757—763.

67. Kellog W. N. Porpoises and Sonar. Univ. of Chicago Press, 1961.

68. Levin P. A. Underwater impuls measurement. — «Technical Review», 1974, Brül and Kjaer, № 4, p. 3—13.

69. Lilly I. C. Distress call of the bottlenose dolphin: stimuli and evoked behavioral responses. — «Science», v. 139, 1963, N 3550, p. 116—118.

70. Lilly J. C. Sonic — Ultrasonic emissions of the bottlenose dolphin. Whales, Dolphins and Porpoises. Univ. Calif. Press, 1966, p. 503—508.

71. Mc. Bride A. F. Evidence for echolocation by cetaceans. — «Deep-sea Research», v. 3, 1956, p. 153—154.

72. Norris K. S., Prescott J. H., Asa-Dorian P. V. An experimental demonstration of echolocation behaviour in the porpoise, *Tursiops truncatus* (Montagu). «Biol. Bull.», v. 120, N 2, 1961, p. 163—176.

73. Norris K. S., Evans W. E., Turner R. N. Echolocation in an Atlantic Bottlenose Porpoise during discrimination. — «Animal Sonar Systems Biology and Bionics», v. 1, 1966.

74. Redwood M. Mechanical waveguides. Pergamon Press Oxford, London, N. Y., Paris, 1960.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Предисловие	3
	Введение	5
Глава I.	ОСОБЕННОСТИ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ ДЕЛЬФИНОВ И ТРАКТОВ РЕГИСТРАЦИИ	14
§	1. Основные характеристики сигналов дельфинов	—
§	2. Особенности трактов регистрации	22
§	3. Классификация сигналов по задачам локации	36
§	4. Адаптивность сигналов	38
§	5. Оптимальные частоты	44
Глава II.	ПАРАМЕТРЫ ГИДРОЛОКАТОРА ДЕЛЬФИНА	49
§	6. Дальность действия	—
§	7. Распознаваемость мишеней	51
§	8. Разрешающая способность	58
§	9. Помехозащищенность	66
Глава III.	МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОКАТОРА ДЕЛЬФИНА	72
§	10. Аппаратура для моделирования	—
§	11. Анализ результатов моделирования	80
	Заключение	86
	Приложение	88
	Указатель литературы	91

В 1976 ГОДУ В СЕРИИ

**«Библиотека
инженера-
гидроакустика»**

ВЫШЛА КНИГА

МАТВИЕНКО В. Н., ТАРАСЮК Ю. Ф. Дальность действия гидроакустических средств. 14 л. с ил.

В 1977 г. ВЫЙДУТ КНИГИ:

ЛАВРЕНТЬЕВ Э. В., КУЗЯН О. И. Взрывы в море. 10 л.

ЖУКОВ В. Б. Расчет гидроакустических антенн по диаграмме направленности. 12 л.

В 1978 г. БУДУТ ИЗДАНЫ:

ПРОСТАКОВ А. Л. Электронный ключ к океану. 13 л.

УРИК РОБЕРТ ДЖ. Основы гидроакустики. Пер. с англ. 25 л.

АЛЕКСАНДР ГРИГОРЬЕВИЧ ГОЛУБКОВ

Гидролокатор дельфина

Редактор Э. В. Зубкова
Художественные редакторы В. Т. Левченко
и В. А. Пурицкий
Технический редактор Р. К. Чистякова
Корректор Л. Г. Тамашкович
Оформление художника В. В. Бабанова

ИБ № 82

Сдано в набор 14/XII 1976 г. Подписано к печати 27/IV 1977 г. М-14157. Формат издания 60 × 90^{1/16}. Вумга типографская № 3. Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,1. Тираж 4200 экз. Изд. № 8211—76. Заказ 1427. Цена 32 коп.

Издательство «Судостроение», 191065,
Ленинград, ул. Гоголя, 8.

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 196006, Ленинград, Московский пр., 91.

