

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕЛЬФИНОМ *Tursiops truncatus* НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ В УСЛОВИЯХ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ В ДИСКРЕТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИХ СПЕКТРОВ

АННОТАЦИЯ

В поведенческих экспериментах на афалинах оценивалась эффективность идентификации низкочастотных шумов, представляющих собой определенную ритмическую последовательность импульсов, при дестабилизации их спектров методом частотной модуляции. Результаты экспериментов показали, что нарушение спектральной структуры при размывании её дискретных составляющих не приводит к снижению эффективности идентификации шумов, что свидетельствует о большей значимости временных, а не спектральных механизмов при обработке слуховой системой дельфина сложных акустических сигналов.

Ключевые слова: дельфин; шумовой сигнал; спектральная структура; модуляция.

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

EFFECTIVENESS DETECTION THE DOLPHIN *Tursiops truncatus* NOISES IN TERMS OF FREQUENCY MODULATION IN DISCRETE COMPONENTS OF THEIR SPECTRA

ABSTRACT

In behavioral experiments on efficacy was evaluated were the identification of low-frequency noises, representing a rhythmic sequence of pulses, with destabilization of their spectra method frequency wobble. Experimental results have shown that the violation of the spectral structure on erosion of its discrete components does not reduce the effectiveness of identifying noise that attests to the greater visibility of temporary rather than spectral mechanisms in the processing of auditory system Dolphin complex acoustic signals.

Keywords: dolphin; rattle; spectral signal structure; wobble.

Введение

По словам представителя Военно-морских сил США Тома Лапуцца, отвечающего за программу по морским млекопитающим, сегодня на службе у американских военных находятся более 100 дельфинов-афалин (средней длиной около 2,5 м), калифорнийских морских львов и белух. Число «сотрудников» более чем утроилось после терактов 11 сентября 2001 года. До этого численность боевых животных достигала лишь 30 особей — в 2007 их уже 75. На базе тренируются 5 видов дельфинов и 6 видов морских львов, также есть белухи, белокрылые морские свиньи и касатки. Все они объединены в 5 команд, три из которых занимаются распозна-

ванием мин. Несмотря на то, что основная база находится в Сан-Диего, животных тренируют и на других базах, одна из них располагается недалеко от Сиэтла, штат Вашингтон. Свои навыки млекопитающие применяли в ходе военных операций ВМС США во Вьетнаме, Бахрейне, Ираке. В общей сложности у базы в Сан-Диего уже более 300 «выпускников». В 2007 году ее бюджет составил \$14 млн, в 2013-м на нее выделяли \$23 млн.

Эти сведения говорят о той большой роли, которой придают ВМС США исследованиям с морскими животными и, в частности дельфинами. Это касается их и локационных возможностей, способности к обнаружению и

классификации сигналов. Локатор дельфина намного эффективней, чем современные гидроакустические средства. Поэтому исследования, направленные на изучение локационных возможностей дельфинов, являются актуальными и важными не только с точки зрения чисто научного интереса и возможности общения с ними, но и обороноспособности страны и ее безопасности на морских просторах.

Исследование основных принципов и механизмов акустического анализа и выяснение особенностей функционирования слуховой системы морских эхолоцирующих млекопитающих при пассивной локации представляет задачу исключительной важности. Известно, что у всех лоцирующих животных орган слуха как биологический анализатор решает задачу установления направления и свойств источника звука как в активном режиме, когда объекты облучаются зондирующими сигналами и становятся источниками эхосигналов, так и в пассивном режиме при восприятии сигналов окружающей среды. При работе в пассивном режиме перед слуховой системой животного стоит более сложная задача, чем при работе в активном, поскольку неизвестны направления прихода звука, расстояние до источника, интенсивность звука, момент его прихода, спектрально-временные характеристики воспринимаемого акустического сигнала. Для эффективного восприятия в этом случае орган слуха должен быть постоянно готовым к приему сигнала, пришедшего с заранее неизвестного направления во всем диапазоне изменения этих параметров. Необходимость восприятия сигнала, пришедшего с заранее неизвестного направления, требует чтобы пассивный слух был ненаправленным, что подтверждается в работах по исследованию направленности слуха дельфина в области низких частот [1]. Возможность и необходимость восприятия дельфинами низкочастотных сигналов подтверждается теоретическими расчетами [2]. Исследований по изучению особенностей работы слуховой системы эхолоцирующих морских млекопитающих при восприятии низкочастотных сигналов крайне мало [3, 4, 5, 6]. Практически отсутствуют исследования особенностей восприятия дельфинами таких низкочастотных сигналов как шумы,

постоянно присутствующие в океане и подверженные искажающему воздействию различных факторов. Шумы, возникающие в океане, не только помеха гидроакустическому приему. В ряде случаев, принимаемый шум необходимо рассматривать как полезный сигнал, несущий определенную информацию о гидрологических, биологических, метеорологических и других важных характеристиках акустического поля акватории. Знание параметров шумового поля открывает пути решения задач, позволяющих с той или иной достоверностью определять основные частоты поверхностного волнения, коэффициент отражения звука дном, а для морских лоцирующих млекопитающих, кроме того, шумы рыбных скоплений позволяют локализовать участки эффективного лова и определять характеристики «сигналов – источников опасности», что особенно важно в районах прохода судоходных трасс. Ранее в наших работах [4, 5] было показано, что слуховая система черноморской афалины способна воспринимать и классифицировать низкочастотные шумовые сигналы, если в их структуре имеется определенная ритмическая последовательность импульсов. В дальнейшем была выявлена возможность слуховой системы дельфина распознать и классифицировать такие сигналы в условиях многоальтернативного пространственного выбора и при наличии шумовых помех [4, 5, 6].

Важнейшей задачей обработки любых, в том числе и шумовых, сигналов в слуховой системе дельфинов является выделение информативных признаков обнаружения и идентификации. Основной набор этих признаков, соотношение между ними, а также способы принятия решений по этим признакам были исследованы в работе [7] с использованием одиночных и парных импульсов, имитирующих зондирующие импульсы афалины. На одиночных и двоянных сигналах был осуществлен попарный перебор физических параметров из всей их совокупности и выделена иерархически организованная система независимых акустических признаков в порядке значимости расположенных следующим образом: «макроструктура», «микроструктура» и третий признак – энергия сигнала. Признаки «макроструктуры» и «микрострук-

туры» определяется различными масштабами деформаций энергетического спектра. Были установлены точные границы областей этих признаков. «Макроструктура» энергетического спектра определяется его крупномасштабными деформациями, выходящими за пределы частотных полос шириной в 10 кГц. «Микроструктура» энергетического спектра определяется мелкомасштабными осцилляциями спектра с периодом в интервале 5 – 10 кГц.

Задачей настоящей работы явилось изучение значимости информативных признаков распознавания, входящих в иерархически организованную систему, для шумовых сигналов с определенной ритмической последовательностью импульсов, имитирующих некоторые естественные шумы моря. Изучалась способность черноморской афалины обнаруживать и идентифицировать такие сигналы при размывании дискретных составляющих их спектров, что в некоторой степени приближает условия проведения экспериментов к условиям формирования акустического поля естественной среды обитания, где практически все сигналы подвержены существенным искажениям.

Материалы и методы

Для формирования экспериментальных шумовых сигналов был разработан и сконструирован прибор, многоканальный имитатор сложных шумовых сигналов, позволяющий производить многообразие шумовых процессов в диапазоне частот 150 Гц – 20 кГц. В основу имитации естественных шумов моря был положен метод образования широкополосных сигналов, представляющих собой совокупность импульсов разной полярности. Кодирование временной последовательности импульсов задавало отличительный признак сигнала. Управляемый генератор вырабатывает последовательность прямоугольных импульсов, которые поступают на дешифратор, преобразующий ее в параллельный восьмиразрядный код. После усилителя сигнал поступает на гидрофон. В результате акустический процесс на выходе преобразователя приобретает шумообразный характер. Сигналы в одном периоде представляют последовательность прямоугольных импуль-

сов заданной длительности с определенными временными паузами между ними. Временная и спектральная структура выбранных для проведения экспериментов на животных шумовых сигналов представлена на рис. А, Б, В. Излучатель – гидрофон пьезокерамическая сфера \varnothing 20 мм с шириной полосы пропускания 0,15 – 120 кГц располагается на глубине 50 см. Звуковое давление, приведенное к 1 м, в полосе 1 Гц составляло 80 дБ относительно 1 мкПа при шуме моря 50 дБ.

Нестационарный режим шумоизлучения, предусмотренный в работе прибора, обеспечивал возможность частотной модуляции тональных компонент смоделированных сигналов, т.е. вобуляцию дискретных составляющих их спектров. Пределы изменения частоты дискретных составляющих задаются формулой:

$$\Delta f(t) = f_{0i} + \Delta f_{m_i}(t),$$

где $\Delta f(t)$ – девиация частоты, f_{0i} – частота i -й дискретной составляющей,

$$\Delta f_{m_i}(t) = 0.5(f_{\max} - f_{\min}).$$

Величина вобуляции оценивается по величине индекса модуляции, определяемого по формуле:

$$m = \frac{\Delta f_{m_i}}{\Delta f_{0i}}.$$

Такая традиционная оценка вобуляции возможна в случае, когда наблюдается изменение частотных интервалов между дискретными составляющими спектра. В данном случае происходит размывание дискретных составляющих вплоть до полного слияния соседних дискрет. За 100% вобуляции берется случай полного слияния дискретных составляющих спектра. Глубина вобуляции i -й дискретной составляющей определялась отношением полосы частот между двумя дискретными составляющими, умноженной на 2, к центральной частоте дискретной составляющей:

$$m_i = \frac{2 \left(\Delta f_i + \frac{\Delta f_{m_i}}{2} \right)}{f_{0i}} = \frac{2\Delta f_i + \Delta f_{m_i}}{f_{0i}},$$

где m_i – глубина вобуляции для i -й дискретной составляющей;

Δf_i – полоса частот между i и $(i + 1)$ дискретными составляющими;

Δf_{m_i} – полоса частот при размывании i -й дискретной составляющей;

f_{0i} – центральная частота i -й дискретной составляющей.

У животных вырабатывалась традиционным способом условно-рефлекторная реакция на выбранные для исследования шумовые сигналы: стимул – пищевое подкрепление. Подкрепление ответной реакции объекта исследования на условные сенсорные стимулы при решении задач обнаружения известно как метод вынужденного выбора «да-нет». Обучение животного сводится к последовательной выработке и закреплению простых условно-рефлекторных реакций: тактильному контакту с манипулятором, выработке устойчивой стартовой позиции, ориентации на стимул и в завершающей стадии – дифференцировка по акустическим признакам сигналов при их последовательном предъявлении с фиксацией реакции нажатием на манипулятор. Работа с животным, участвующим в акустических экспериментах, требует обучения их строго детерминированным для экспериментатора реакциям на локальную ситуацию. Введение методики обучения «да-нет» позволяет снять неопределенность относительно реакции животного путем объективной регистрации поведенческих реакций, связанных с решением акустической задачи. Эксперименты проводили на пяти черноморских дельфинах афалинах в свайно-сетевом вольере размером $10 \times 7 \times 6$ м. Стартовая позиция дельфина располагалась на расстоянии 6 м от излучателя. В случае правильного решения – распознавания предъявленного положительного сигнала дельфин ударял рострумом по манипулятору, расположенному в 50 см перед излучателем и получал рыбу. Каждому животному для выработки прочного условного рефлекса на положительный шумовой сигнал и его закреплению предъявлялось по 50 стимулов в качестве положительного раздражителя. При работе со всеми вобулированными сигналами на каждую степень вобуляции животным предъявлялось по 100 стимулов. В первой серии экспериментов дельфинам предлагалась программа обучения распознаванию сигналов, отличающихся временным кодом последовательности импульсов, в стационарном невобулированном режиме шумоизлучения. При достижении высокой

вероятности распознавания каждого из выбранных для экспериментов сигналов ($P = 0,9$) переходили к следующему этапу исследований.

Животному для идентификации предъявлялись сигналы с определенной степенью вобуляции (Рис.1). Размывание дискретных составляющих спектра шумового сигнала происходит уже при второй степени ($m_i = 30\%$), в значительной мере при третьей ($m_i = 60\%$) и практически полностью при четвертой ($m_i = 85\%$) степени вобуляции. Полное слияние дискрет со смещением энергии в низкочастотную область спектра наблюдается при пятой степени вобуляции ($m_i = 99\%$). Размывание дискретных составляющих приводит не только к разрушению микроструктуры спектра, но и к деформации огибающей спектра.

Вобуляция сигналов, с увеличением ее в пределах от 12 до 85% снижает вероятность правильной идентификации шумовых сигналов от 0,95 до 0,8. При пятой степени вобуляции ($m_i = 99\%$) дельфин не мог достоверно различить предъявляемые ему сигналы. Сравнение результатов реакций дельфина и данных спектрального анализа сигналов показывает, что с увеличением степени размывания дискретных составляющих спектра шума постепенно теряются определенные информационные признаки, в первую очередь гармоники. При значительной глубине вобуляции полностью размываются гармоники спектра и начинает деформироваться огибающая спектра.

При этом дельфин способен с высокой степенью вероятности ($P = 0.8$) различать и идентифицировать предъявляемые ему сигналы как сохранившие форму огибающей спектра (шум А, $m_i = 85\%$) так и утратившие ее (шум Б, $m_i > 60\%$, 85% и шум В, $m_i > 60\%$, 85%). И лишь при деформации первоначального спектра шумового сигнала ($m_i = 99\%$) – полном размывании дискретных составляющих и принципиальному изменению огибающей спектра, сдвигу спектра в низкочастотную область, для дельфина становится невозможным правильное решение поставленной задачи, что может быть объяснено возникновением сходства спектральной структуры всех трех типов шумов.

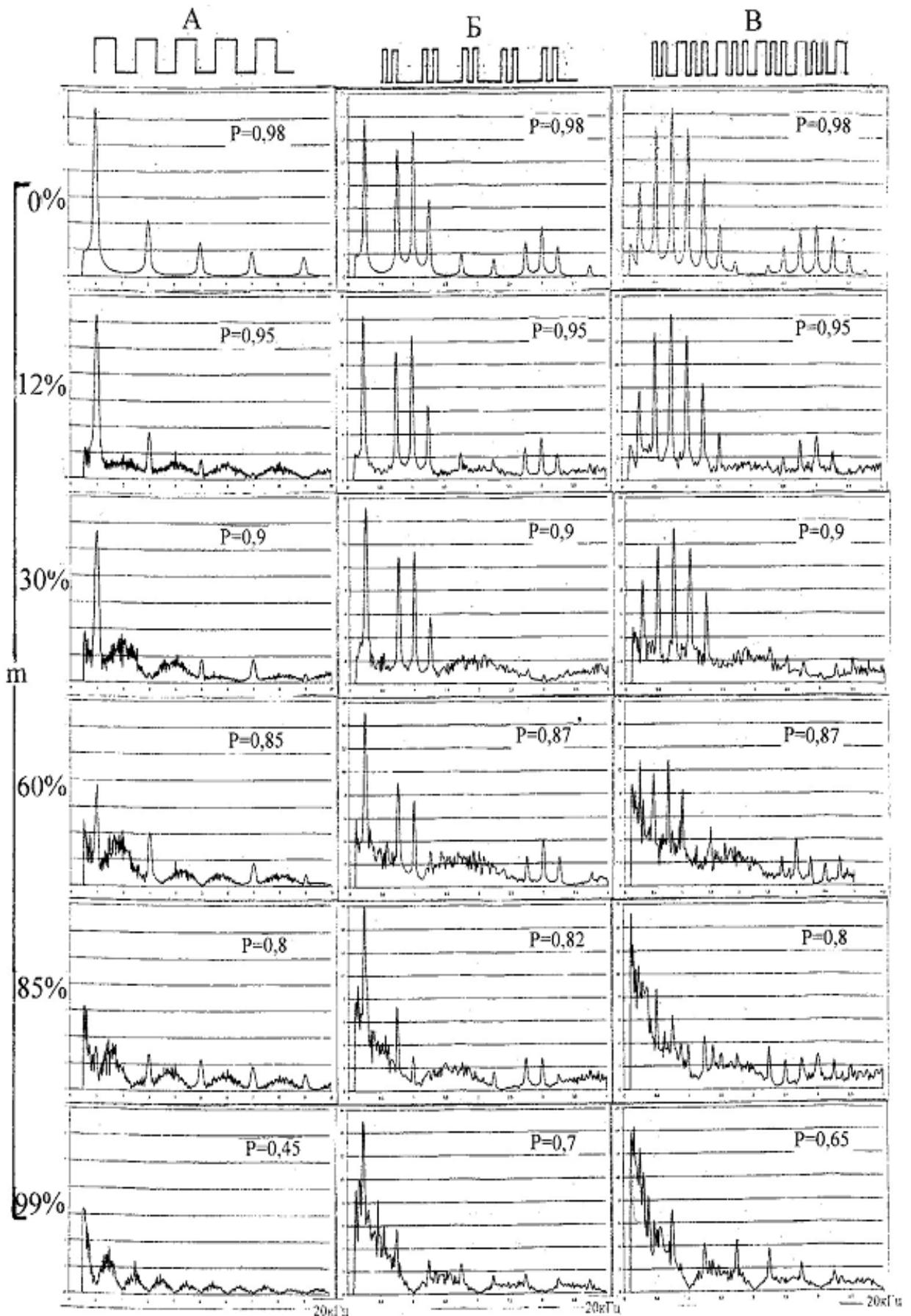


Рисунок 1 – Временная структура сигналов А, Б, В (верхняя строка) и по вертикали их спектральная структура, изменяющаяся с ростом вобуляции. m – степень вобуляции

Вобуляция сигналов, с увеличением ее в пределах от 12 до 85% снижает вероятность правильной идентификации шумовых сигналов от 0.95 до 0.8. При пятой степени вобуляции ($m_i = 99\%$) дельфин не мог достоверно различить предъявляемые ему сигналы.

Сравнение результатов реакций дельфина и данных спектрального анализа сигналов показывает, что с увеличением степени размывания дискретных составляющих спектра шума постепенно теряются определенные информационные признаки, в первую очередь гармоники. При значительной глубине вобуляции полностью размываются гармоники спектра и начинает деформироваться огибающая спектра. Возрастающая от 0 до 99%, P – вероятность правильной идентификации сигнала, Нижние горизонталы – частотный диапазон шумов в кГц.

Сравнение результатов реакций дельфина и данных спектрального анализа сигналов показывает, что с увеличением степени размывания дискретных составляющих спектра шума постепенно теряются определенные информационные признаки, в первую очередь гармоники. При значительной глубине вобуляции полностью размываются гармоники спектра и начинает деформироваться огибающая спектра. При этом дельфин способен с высокой степенью вероятности ($P = 0,8$) различать и идентифицировать предъявляемые ему сигналы как сохранившие форму огибающей спектра (шум А, $m_i = 85\%$) так и утратившие ее (шум Б, $m > 60\%$, 85% и шум В, $m = 60\%$, 85%).

И лишь при деформации первоначального спектра шумового сигнала ($m_i = 99\%$) – полном размывании дискретных составляющих и принципиальному изменению огибающей спектра, сдвигу спектра в низкочастотную область, для дельфина становится невозможным правильное решение поставленной задачи, что может быть объяснено возникновением сходства спектральной структуры всех трех типов шумов.

При значительной глубине вобуляции полностью размываются гармоники спектра и начинает деформироваться огибающая спектра. При этом дельфин способен с высокой степенью вероятности ($P = 0,8$) различать и идентифицировать предъявляемые ему сигналы как сохранившие

форму огибающей спектра (шум А, $m_i = 85\%$) так и утратившие ее (шум Б, $m > 60\%$, 85% и шум В, $m = 60\%$, 85%). И лишь при деформации первоначального спектра шумового сигнала ($m_i = 99\%$) – полном размывании дискретных составляющих и принципиальному изменению огибающей спектра, сдвигу спектра в низкочастотную область, для дельфина становится невозможным правильное решение поставленной задачи, что может быть объяснено возникновением сходства спектральной структуры всех трех типов шумов

Гипотезы и модели

Учитывая важность режима пассивной локализации в гидроакустике, естественно возникает желание на основе имеющейся информации о возможности дельфина обнаруживать широкополосные сигналы, к которым относятся и полигармонические сигналы, предложить математические модели, которые хоть как-то могли объяснить высокую эффективность пассивного локалятора дельфина. В настоящем пункте статьи будет предложена модель, основанная на «равнодобротности» частотной шкалы.

Известно [9-15], что основной задачей приемной части системы обнаружения сигналов является принятие решения о наличии или отсутствии полезного сигнала в наблюдаемом входном процессе. Это сложная задача, предъявляющая к приемнику наиболее высокие требования, т. к. обнаружение сигнала, как правило, происходит при минимальных отношениях сигнал/помеха (ОСП). Решение о наличии сигнала принимается по превышению отклика приемника установленного порога, выбираемого на основе одного из статистических критериев по заданным вероятностям правильного обнаружения и ложной тревоги.

Необходимо отметить, что в настоящее время не до конца используются полезные свойства в структуре полигармонического сигнала (ПС). Здесь можно указать два важных факта:

- полигармонический сигнал, как правило, рассматривается как совокупность отдельных компонент, а не как единое целое, где проявляются системные свойства;
- полагают, что сигнал состоит из отдельных компонент одинаковой длительности, поэ-

тому отдельные компоненты имеют разный коэффициент узкополосности (разную «добротность»);

- не учитывается группа преобразований сжатия, ответственность за которую «несет» кинематика объекта;
- существует определенная аналогия между случайным процессом, представленным рядом Карунена-Лоэва, и между отраженным сигналом от объекта локации и полигармоническим сигналом со случайными коэффициентами.

В соответствии с общепризнанным определением отношения узкополосности введем его выражением следующего вида:

$$k_i = 2 \frac{f_{i+1} - f_i}{f_{i+1} + f_i} = \frac{\Delta f_i}{f_{0i}} \quad (1)$$

Потребуем также, чтобы для каждой компоненты полигармонического сигнала удовлетворялось отношение $k_i = k = \text{const}$.

Определим последнее соотношение как «условие равнодобрности».

Далее определим число компонент полигармонического сигнала, который занимает некоторую частотную полосу.

Имеем:

$$\begin{aligned} f_i &= f_0 + \frac{\Delta f_0 + \Delta f_1}{2} = f_0 + \frac{kf_0 + kf_1}{2} \Rightarrow \\ &\Rightarrow 2f_i = 2f_0 + kf_0 + kf_1 \Rightarrow \\ &\Rightarrow f_i(2 - k) = f_0(2 + k) \Rightarrow f_i = f_0 \left(\frac{2 + k}{2 - k} \right)^i. \end{aligned}$$

Далее нетрудно получить:

$$\begin{aligned} f_{i+1} &= f_i \left(\frac{2 + k}{2 - k} \right) = f_0 \left(\frac{2 + k}{2 - k} \right)^{i+1} \approx \\ &\approx f_i(1 + 2k) = f_0(1 + 2k)^{i+1}. \end{aligned} \quad (2)$$

В последнем соотношении учитывался тот факт, что $k \ll 1$ (каждая отдельная компонента является узкополосным сигналом).

Аналогично можно получить выражение, связывающее частотные промежутки между компонентами полигармонического сигнала [9,14].

$$\Delta f_i = \Delta f_0 \left(\frac{2 + k}{2 - k} \right)^i \quad (3)$$

Иллюстрация зависимостей частоты компоненты и ширины полосы показана на рис.2. Графики показывают монотонное возрастание и частоты компоненты ПС и соответствующих спектральных полос, что в целом подтверждает, тот факт, что, чем шире спектр ПС, тем больше компонент он содержит.

Положим, задана полоса ΔF , тогда используя формулу вычисления геометрической прогрессии и учитывая, что $k \ll 1$, $\Delta f_0 = kf_0$ получаем [15]:

$$N \approx \frac{\ln \left[\frac{2k\Delta F}{f_0} + 1 \right]}{k} \quad (4)$$

К примеру, если $\Delta F = 2000$ Гц, $f_0 = 100$ Гц, $k = 0.1$, то число компонент полигармонического сигнала будет равно $N \approx 37$. На рис. 3а представлена зависимость числа компонент полигармонического сигнала от показателя узкополосности при тех же значениях полосы ΔF и нулевой частоты f_0 . Из поведения графика видно, что с увеличением коэффициента узкополосности число компонент уменьшается. Оно и понятно: чем шире компонента ПС, тем меньше их поместится в заданной полосе. На рис. 3б показана зависимость $N(\Delta F)$. С ростом ΔF число компонент монотонно возрастает. При этом $f_0 = 100$ и $k = 0.1$.

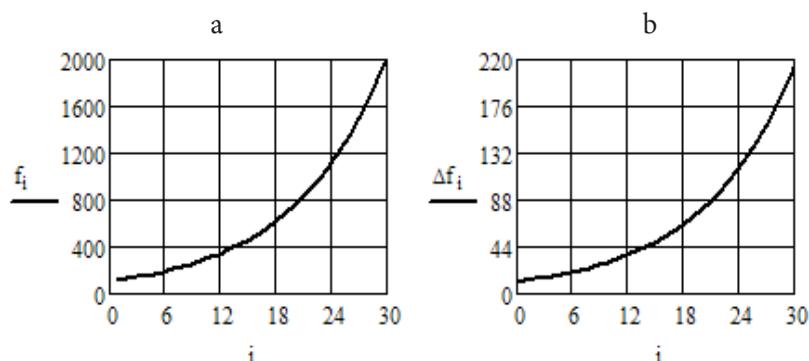


Рисунок 2 – а) Зависимость частоты компоненты от его номера i .

б) Зависимость ширины полосы компоненты от ее номера i .

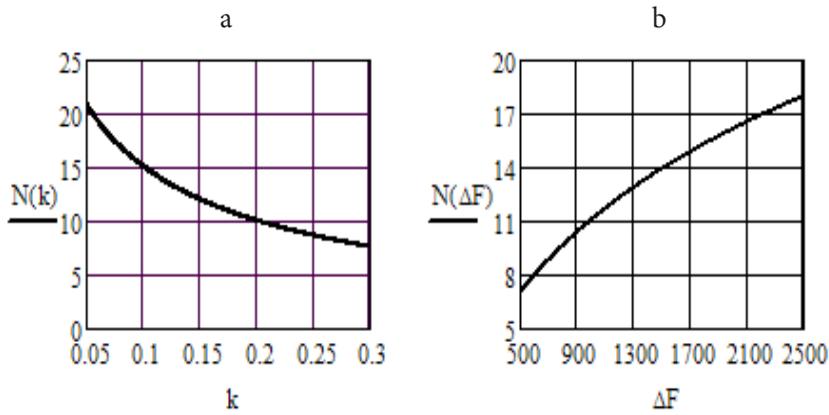


Рисунок 3 – а) Зависимость числа компонент ПС от показателя узкополосности
 б) Зависимость числа компонент ПС от ширины спектра GC

Следует отметить, что условие $k_i = k = \text{const}$ означает, что длительности каждой из компонент ПС будут различными. Это следует из того факта, что число степеней свободы каждой из компонент будет одинаковым. К примеру, если число степеней свободы каждой из компонент равно n , то, исходя из теоремы Котельникова о дискретизации конкретно гармонического непрерывного сигнала, с ростом частоты f интервал дискретизации $\Delta t = 1 / 2f$ уменьша-

ется. Увеличиваем частоту в два раза, интервал дискретизации уменьшится в два раза. Так как $T = n \cdot \Delta t$, то, соответственно, уменьшится и длительность сигнала T . Число степеней свободы гармонического сигнала в два раза больше числа его периодов, поэтому длительность сигнала при постоянстве n будет меняться. Временное представление полигармонического сигнала, стоящего из 4-х гармоник показано на рис.4.

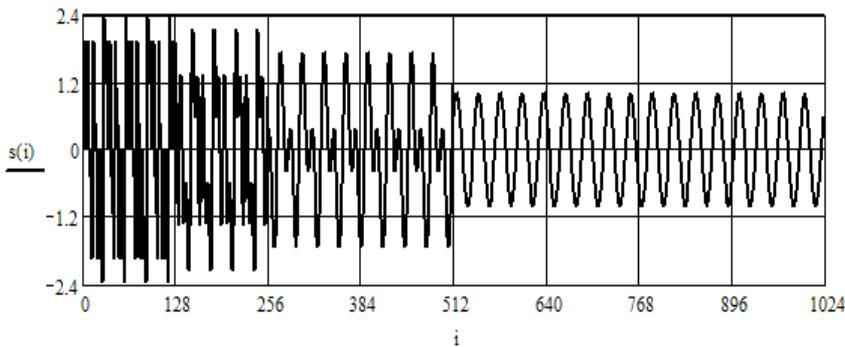


Рисунок 4 – Временное представление полигармонического сигнала, состоящего из 4-х гармоник

На рис.5 приведена иллюстрация модуля комплексного спектра полигармонического сигнала, состоящего из 4-х гармоник.

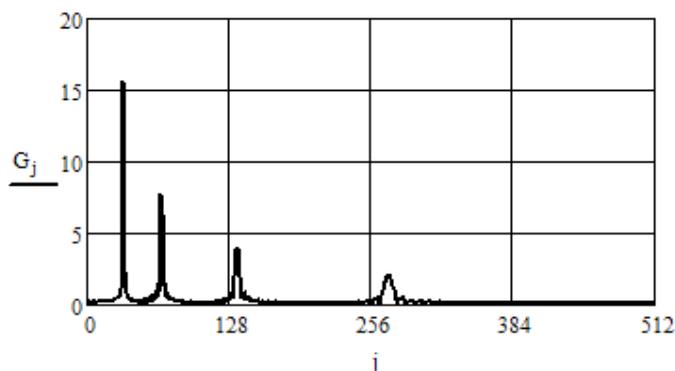


Рисунок 5 – Спектральное представление полигармонического сигнала, состоящего из 4-х гармоник

Условия моделирования: число отсчетов 1024; число степеней свободы 30; база выполнения БПФ (быстрого преобразования Фурье) – 512.

В целом, анализ моделирования показывает, что с увеличением числа компонентов они становятся все ближе друг к другу, а ПС он все больше во временном представлении становится похожим на гиперболический сигнал. Следовательно, и его свойства также приближаются к свойствам гиперболического сигнала. В заключение можно отметить, что предложенная модель обладает высокой гибкостью и асимптотическими свойствами. Последнее означает, что в принципе любой сигнал может быть аппроксимирован полигармоническим сигналом. Модель фильтрации может быть использована как в режиме активной, так и пассивной локации. Другими словами, такой подход позволяет использовать методы обработки сигналов в активной локации в режиме пассивной локации, что, безусловно, повышает эффективность пассивной локации в обнаружении и фильтрации шумоподобных сигналов. Кроме того, описание и генерация полигармонических сигналов проще, чем широкополосных и модулированных.

Результаты и обсуждение

Таким образом, выявлена способность к высокой эффективности работы слуховой системы черноморской афалины при идентификации сложных шумовых сигналов, внутренняя структура которых подвергается различным степеням искажения, а именно – размыванию дискретных составляющих спектра. Установлены границы возможной деформации, за которыми идентификация сигнала становится статистически недостоверной. Полученные данные свидетельствуют о том, что внутренняя структура спектра шумового сигнала (дискретные составляющие) не является необходимым и определяющим признаком для слуховой системы дельфина при распознавании шумового сигнала. Можно было предположить, что более важным признаком распознавания является форма огибающей спектра шумового сигнала, его макроструктура. Хотя этот признак, как показали результаты экспериментов, не является определяющим для правильной идентификации шумовых сигна-

лов дельфином. Можно предположить наличие каких-то других, в том числе временных, механизмов различения, основанных на анализе ритмической структуры сигналов.

В слуховой системе может анализироваться не сама огибающая и дискретные составляющие сложного сигнала, а учитываться тонкая временная структура звуковой волны, включающая колебания более высокой несущей частоты. Высота сигнала определяется периодами, равными расстоянию между положительными пиками высокочастотных колебаний, расположенными вблизи максимумов огибающей.

Из известных в настоящее время литературных данных можно сделать вывод, что дельфины при обнаружении акустических сигналов могут использовать различные принципы и механизмы обработки поступающей информации в зависимости от решаемой задачи. По акустическим параметрам сигналов возможен целенаправленный поиск информативных характеристик, используемых дельфинами при распознавании сигналов. В ряде работ [2] теоретически рассматривалась возможность различения дельфинами сложных акустических сигналов, основанная на определении различий в спектрах сигналов, а именно в положении максимума и средней величины периода осцилляций спектра. Однако, в экспериментальных работах было показано, что максимумы могут отсутствовать, что делает этот признак ненадежным. Анализ результатов ряда работ позволил выявить некоторые общие закономерности в работе слуховой системы дельфинов при восприятии сложных акустических сигналов и сформулировать спектральную теорию различения, согласно которой средние периоды осцилляций в спектрах сигналов могут служить признаком различения. Авторы вышеупомянутой теории ввели границы ее применимости. Слуховая система дельфина, которая производит частотный анализ, обладает достаточной чувствительностью к изрезанности спектра только в ограниченном частотном диапазоне чисел периодов осцилляций. Если число периодов спадает до 1 или стремится к 100, то чувствительность к изменению периода резко снижается. Возникают условия, которые превышают возможности слуховой системы дельфина анализи-

ровать отдельные пики в сигнале. Как показали результаты настоящей работы количество максимумов, разница средних периодов осцилляций и других признаков, используемых обычно при спектральном анализе, в проведенных нами исследованиях не могли быть использованы животным. В физических спектрах исследуемых в работе шумовых сигналов утрачиваются компоненты, соответствующие первоначальным частотам и основным признаком, определяющим их восприятие, очевидно, становится периодические изменения звуковой волны, т.е. слуховая система помимо спектрального производит временной анализ формы звуковых возмущений.

Если рассматривать слуховой анализатор как набор фильтров, то при действии звука, состоящего из ряда гармоник, информация об этом звуке может быть представлена с одной стороны как распределение средних уровней выходных сигналов с каждого фильтра и это распределение будет отражать спектральный состав звука – амплитуду и частоту членов ряда Фурье, с другой, можно анализировать мгновенные выходные сигналы каждого фильтра, которые изменяются во времени и, форма волны которых отражает низкочастотные колебания огибающей звука. Нейрофизиологические исследования не противоречат подобным представлениям, т.к. они показывают, что в слуховом пути картина нервной импульсации оказывается синхронизированной с частотой возбуждающих колебаний. Сохранение в картине нервной импульсации информации о периодичности стимулов легло в основу предположения о существовании системы измерения периодов, интервалов между нервными импульсами. Для подтверждения высказанного предположения необходимы более детальные исследования о процессах накопления информации во времени и временных характеристиках процедуры принятия решений в слуховой системе дельфинов при распознавании ими сложных акустических сигналов. Дельфины являются вторичноводными млекопитающими, слуховая система которых адаптировалась к приему акустических сигналов в водной среде. Адаптация эта приводит к существенным структурным и функциональным преобразованиям в приемной слуховой системе этих

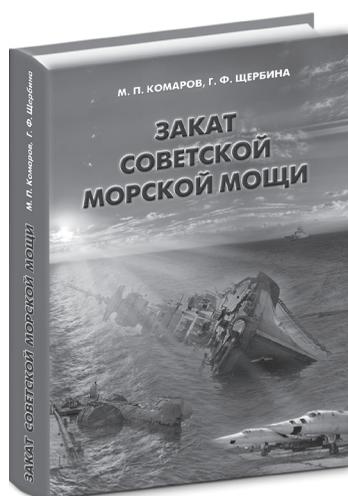
животных, изучение которых несомненно представляет большой интерес для эволюционной теории слуха. Изучение механизмов, лежащих в основе высокой эффективности работы слуховой системы дельфинов, должно способствовать более глубокому пониманию адаптационных возможностей биологических анализаторных систем, а также содействовать решению ряда важных задач, связанных с разработкой и усовершенствованием систем гидролокации и систем связи под водой.

Список литературы

1. Зайцева К. А., Морозов В. П., Аюпиан А. И. Сравнительная характеристика пространственного слуха дельфина (*Tursiops truncatus*) и человека // Журн. эвол. биохим. и физиол. – 1978. – Т. 14. – № 1. – С. 80-85.
2. Черноморская афалина. *Tursiops truncatus ponticus*. Морфология. Физиология. Акустика. Гидродинамика / Под ред. В. Е. Соколова, Е. В. Романенко. – М., 1997.
3. Au W. W. L., Pawlovski J. L. Detection of Noise with rippled spectra by atlantic bottlenose dolphin // J. Acoust. Soc. Amer. – 1989. – N 86. – P. 591-596.
4. Зайцева К. А., Королев В. И., Яковлев А. И., Ахи А. В. Эффективность работы сонара дельфина при различении шумов // Военная радиоэлектроника: материалы XVIII Научно-технической конференции. – Петродворец, 2007. – С. 204-212.
5. Зайцева К. А., Королев В. И., Ахи А. В. Распознавание дельфинами *Tursiops truncatus* классов шумоподобных сигналов // Журн. эвол. биохим. и физиол. – 2008. – Т. 44. – № 2. – С. 194-199.
6. Зайцева К. А., Королев В. И., Яковлев А. И., Ахи А. В. Эффективность классификации шумовых сигналов дельфином (*Tursiops truncatus*) в условиях акустических помех // Военная радиоэлектроника: материалы XIX Научно-технической конференции. – Петродворец, 2008. – С. 425-433.
7. Дубровский Н. А., Зориков Т. В., Квижинадзе О. Ш., Кураташвили М. М. Признаковое описание сигналов и принципы его организации в слуховой системе // Акуст. журн. – 1991. – Вып. 4. – С. 18-24.

8. Радионов А. В. Учиться у дельфинов // Наука в России. – 2007. – № 2.
9. Бутырский Е. Ю., Смагулов А. Б., Шаталов Г. В., Якунин К. В. Устройство обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе квадратурного приемника. Патент на изобретение № 2549207 от 26.03.2015 г.
10. Бурдик В. С. Анализ гидроакустических систем. – Л.: Судостроение, 1988. – 392 с.
11. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
12. Ольшевский В. В. Статистические методы в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1983. – 280 с.
13. Бутырский Е. Ю. Функция неопределенности сигналов на группе преобразований // Информатика и космос. – 2008. – № 3. – с. 31-39.
14. Бутырский Е. Ю. Полигармонические сигналы // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2016. – № 15-1. – С. 17-26.
15. Бутырский Е. Ю., Сапрыкин В. А., Беленков В. Н., Алексеев М. В. Способ обнаружения сигналов. Патент на изобретение RUS 2032917

КНИЖНЫЕ НОВИНКИ



Комаров М. П., Щербина Г. Ф. К 63 Закат советской морской мощи. – СПб.: Стратегия будущего, 2017. – 350 с.: фото

В книге представлены результаты реконструкции и исследования долговременных и медленно протекающих процессов: реорганизации Вооружённых сил и Военно-морского флота в ходе развала СССР и становления новой России; сокращения состава объединений, соединений, частей, кораблей и летательных аппаратов всех четырёх родов сил ВМФ; утилизации подводных лодок, боевых надводных кораблей и судов, в том числе с участием международного сообщества. Установлены тенденции и закономерности указанных процессов. Приведено большое количество иллюстраций и полученных статистических материалов.

Книга предназначена для специалистов, участвующих в создании и реорганизации вооружённых сил и других больших и сложных социальных организационно-технических систем, историков, изучающих развитие этих систем, а также для всех заинтересованных в данной теме читателей.

По вопросам приобретения книги обращаться в редакцию журнала «Национальная безопасность и стратегическое планирование» (www.to-future.ru; e-mail: to-future@mail.ru; тел.: +7-911-7910880)