

УДК 681.883

DOI 10.22213/2410-9304-2023-4-31-41

Идентификация подводных объектов по отраженным гидроакустическим сигналам

А. С. Тугбаева, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

А. Г. Ицков, кандидат физико-математических наук, доцент,

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

В. Н. Милич, кандидат технических наук, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

В. А. Широков, кандидат технических наук,

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

В статье представлены результаты исследования метода идентификации подводных объектов на основе периодограммного анализа отраженных от них гидроакустических сигналов с применением алгоритма голосования. Под идентификацией объекта в статье понимается принятие решения об отличии его от других объектов. Гидроакустические сигналы являются основным средством получения информации о подводной среде, они также широко используются для обнаружения и идентификации подводных объектов, включая суда, подводные лодки и подводные сооружения. Идентификация подводных объектов является важной задачей для обеспечения безопасности подводных исследований и эффективного использования морских ресурсов в условиях шума и сложной подводной обстановки, включающей наличие нескольких природных объектов и использование различных технических средств разработки подводных месторождений.

В исследовании предлагается подход, который использует анализ периодограмм с последующим применением алгоритма голосования для решения задачи идентификации подводных объектов. Периодограммный анализ является методом, позволяющим выявить характерные временные и частотные особенности в отраженных от различных типов объектов гидроакустических сигналах. Предлагаемый подход учитывает различные характеристики периодограммы сигнала для определения уникальных особенностей каждого подводного объекта.

Основной целью данной работы является разработка и исследование набора признаков с помощью периодограмм, учитывающих специфику гидроакустических сигналов и уникальные свойства различных типов исследуемых подводных объектов. Этот подход позволяет добиться достаточно высокой точности идентификации.

В статье приводятся результаты экспериментов, проведенных на реальных гидроакустических сигналах. Эти результаты позволяют сделать вывод об эффективности применения метода идентификации подводных объектов по отраженным от них гидроакустическим сигналам на основе периодограммного анализа. Результаты исследования имеют практическую значимость и могут быть применены в приложениях, связанных с подводными исследованиями.

Ключевые слова: гидроакустика, подводный объект, эхосигнал, периодограммный анализ, идентификация.

Введение

В последние десятилетия гидроакустические исследования становятся все более актуальными в различных областях, таких как океанология, гидрография, экология, гидролокация и навигация. Подводная среда в связи с высоким давлением и ограниченными возможностями для прохождения электромагнитных волн малоприспособлена для деятельности человека и может интенсивно осваиваться только с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), которые должны быть оснащены системами подводного видения (СПВ) [1, 2]. Гидроакустические сигналы используются для различных целей, включая обнаружение и идентификацию объектов под водой, мониторинг окружающей среды, исследование поведения морских животных и многих других приложений [3–5]. Поэтому актуальной является задача различения объектов по их гидроакустическим сигналам. Тема работы – исследование методов гидролокации подводных объектов для их обнаружения, координирования и распознавания. Известно достаточно много алгоритмов для обработки гидроакустических сигналов, применяемых в указанных выше целях [6–8]. Данная работа посвящена теме распознавания подводных объектов на основе периодограммного анализа. Периодограммный анализ является одним из методов анализа сигналов, который применяется для различения объектов на основе

представления исходных сигналов как квазипериодических сигналов. Этот метод предполагает использование периодических составляющих сигнала для определения таких характеристик объекта, как его форма и размеры [9]. В работе используется метод периодограмм А. Шустера с использованием вычислительной схемы Бью-Балло и преобразованием Фурье. Реализация алгоритмов и работы системы представлена на языке программирования C++. Периодограммный анализ, как показали исследования, является перспективным средством для решения поставленных задач.

Метод периодограммного анализа гидроакустических сигналов позволяет выявить их различительные свойства. Это дает возможность сформировать систему признаков, которая с последующим применением методов распознавания оказывается достаточно эффективной для решения задач идентификации подводных объектов, то есть их различения [10].

Таким образом, целью настоящей работы является экспериментальное исследование методов поиска различительных свойств гидроакустических сигналов с использованием периодограммного описания сигнала. Ясно, что на отраженный гидроакустический сигнал влияет множество факторов, обусловленных условиями измерения. Это и характеристики экспериментальной установки, и свойства отражаю-

щего объекта, и характеристики расположения отражающего объекта, и особенности зондирующего сигнала (частота и структура). Поэтому в статье рассматриваются результаты исследования модельной ситуации. В качестве отражающих объектов выбраны три объекта простейшей формы: вертикальные трубки различного диаметра из различных материалов. Эти объекты характеризуются отсутствием зашумляющих отражающих (в смысле гидроакустики) деталей и независимостью результата от направления освещения и направления регистрации отраженного сигнала. Классом распознавания является совокупность сигналов одного объекта, снятых в разное время и при различных условиях (расстояния от источника до объекта и, как следствие, от объекта до приемника, а также типы воздействующих на объект сигналов). Для принятия решения об отличии исследуемого объекта (идентификации объекта) от остальных используется метод голосования по системе признаков, полученных с помощью периодограммы отраженного гидроакустического сигнала.

Методы периодограммного анализа

Периодограммный анализ – это метод, который позволяет определить спектральную плотность мощности сигнала. Этот метод основывается на разложении сигнала на несколько частотных компонент, которые являются составляющими спектра сигнала [11]. С помощью периодограммного анализа можно определить, какие частоты присутствуют в сигнале и какая мощность приходится на каждую частоту. Он основывается на разложении сигнала на составляющие с различными частотами и измерении их мощности. Спектральный анализ, как известное направление исследований, может включать различные методы оценки спектра сигнала, такие как преобразование Фурье, корреляционный анализ, вейвлет-преобразование и другие. Он позволяет получить информацию о частотных компонентах сигнала и их амплитудах.

Для идентификации подводных объектов по отраженным от них гидроакустическим сигналам с применением методов периодограммного анализа используются спектральные характеристики сигнала. Одной из таких характеристик является спектральная плотность мощности, отражающая распределение интенсивности по частотам в сигнале [12].

Один из способов вычисления периодограммы использует преобразование Фурье и представляет собой зависимость интенсивности $I(f_i)$ от частоты $f_i(1)$. Предположим, что количество отсчетов в сигнале нечетно, т. е. $N = 2q + 1$. Тогда периодограмма будет состоять из $q = \frac{N-1}{2}$ значений [13]:

$$I(f_i) = \frac{N}{2}(a_i^2 + b_i^2), \quad i = 1, 2, \dots, q, \quad (1)$$

где

$$a_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N z_t c_{it}, \quad i=1, 2, \dots, q, \quad (2)$$

$a_0 = \bar{z}$ – выборочное среднее значение ряда,

$$b_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N z_t s_{it} \quad (3)$$

являются оценками коэффициентов α_0 , α_i и β_i преобразования Фурье

$$z_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^q (\alpha_i c_{it} + \beta_i s_{it}) + e_t, \quad (4)$$

$$c_{it} = \cos 2\pi f_i t, \quad (5)$$

$$s_{it} = \text{sincos} 2\pi f_i t. \quad (6)$$

При $N = 2q$ алгоритм применяется для $i = 1, 2, \dots, q-1$.

Полученная периодограмма состоит из половины числа наблюдений в исходном гидроакустическом сигнале.

После определения основных частот можно вычислить основные периоды гармоник, которые составляют ряд, как обратные значения частот. Расчет спектра интенсивности предоставляет возможность применения теории спектрального анализа, а также нахождения оценок автоковариационной функции ряда.

Следующим методом построения периодограмм является схема Бюй-Балло [14]. Алгоритм описывается следующим образом. Пусть сигнал, полученный от приемника, состоит N наблюдений. Имеющаяся совокупность исходных данных разбивается на интервалы по m значений в каждом, где m – значение пробного периода, которое меняется в диапазоне с 1 до $\frac{N}{2}$. Если N нечетно, то остаток рассматриваемого ряда отбрасывается. В итоге получается p отрезков, содержащих по m значений. Затем определяются m средних арифметических, состоящих из p слагаемых

$$\bar{x}_m = \frac{1}{mp} \sum_{i=1}^p x_i^{(m)}, \quad (7)$$

где $x_i^{(m)}$ – m -й элемент каждого отрезка интервала.

Далее, среди полученных m средних значений определяются максимальное $\bar{x}_m(\max)$ и минимальное $\bar{x}_m(\min)$ значения. Из их разностей получаются величины d_m :

$$d_m = \bar{x}_m(\max) - \bar{x}_m(\min), \quad m = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}. \quad (8)$$

Количество отсчетов периодограммы определяется пробным значением периода m . В качестве значений периодограммы используются значения d_m , а наибольшие из них соответствуют главным значениям периодов сигнала.

Алгоритм голосования

Алгоритмы голосования входят в большой класс методов вычисления оценок для распознавания образов [15]. В данной работе по обучающей выборке вырабатывались эталоны по каждому классу как средние по значениям признаков из наборов классов. Следующим этапом является выбор значений чисел

ϵ_i , определяющих меру близости признака экспериментального объекта с эталонным. Отметим, что значения ϵ_i определяются экспериментально и могут варьироваться. Они позволяют выделить окрестности значений признака, принадлежащих тому или иному классу. Исходя из этого строятся векторы по всем признакам для каждого класса, с которыми сравнивают значения признаков новых объектов, в том числе из контрольной выборки. В случае попадания объекта в класс по данному признаку учитывается голос за этот класс. Окончательная классификация определяется максимумом голосов за тот или иной класс.

Экспериментальная установка и набор данных для исследований

Для проведения исследований использовался комплекс, состоящий из экспериментального бассейна и аппаратуры для генерации и приема гидроакустических сигналов, отраженных от исследуемых подводных объектов [16–18]. В состав экспериментального комплекса входят бассейн для проведения опытов, комплект источников и приемников гидроакустических сигналов и средства их расположения в бассейне.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1: балка, имеющая возможность перемещения, на которую подвешиваются погруженные в воду объекты (2), а также излучатель (1) и квадратный датчик, включающий четыре приемника (3).

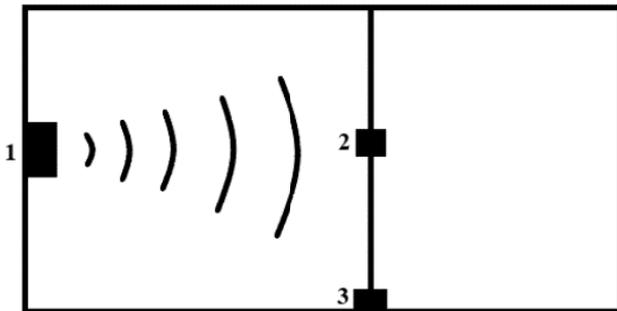
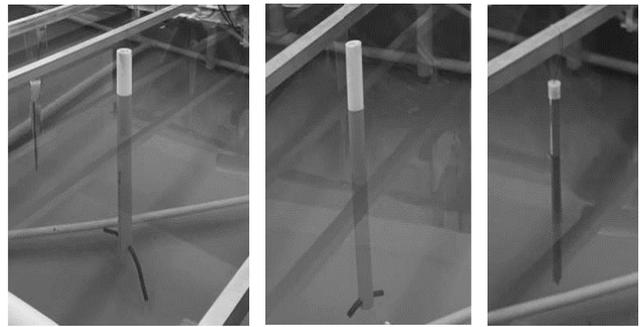


Рис. 1. Экспериментальная установка

Fig. 1. Experimental installation

Количество приемников гидроакустических сигналов и позиций их расположения позволяет варьировать особенности регистрации подводных объектов. Увеличение числа приемников гидроакустических сигналов увеличивает возможности системы получения экспериментальных данных и формирования достоверной информации о положении и гидроакустических характеристиках подводных объектов.

Для исследования возможности классификации объектов был подготовлен набор данных, содержащий информацию о сигналах, полученных от 3 объектов (рис. 2): полипропиленовый цилиндр диаметром 20 мм («PP20»), полипропиленовый цилиндр диаметром 32 мм («PP32»), алюминиевая трубка диаметром 10 мм («Al10»).



а б в

Рис. 2. Объекты исследования: полипропиленовая трубка диаметром 20 мм (а), полипропиленовая трубка диаметром 30 мм (б), алюминиевая трубка диаметром 10 мм (в)

Fig. 2. Objects of research: polypropylene tube with a diameter of 20 mm (a), polypropylene tube with a diameter of 30 mm (b), aluminum tube with a diameter of 10 mm (b)

Также сигналы, отраженные от объектов, снимались в 3 различных положениях со сдвигом по оси X на 25 мм (обозначены индексами 0, 1, 2) (рис. 3).

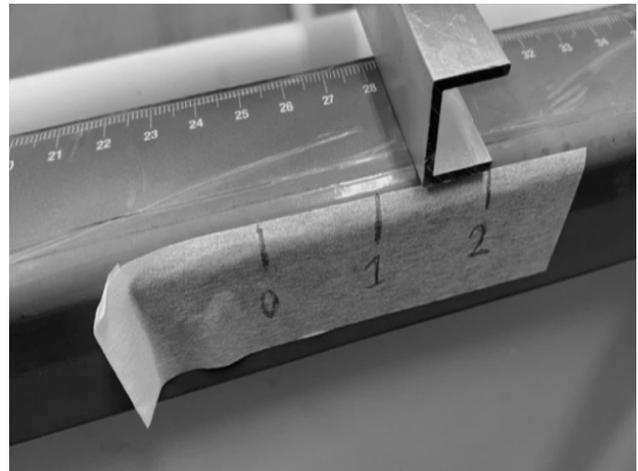


Рис. 3. Регулировка положения объектов

Fig. 3. Adjusting the position of objects

Сигналы отражений от объектов регистрировались в одном файле с разделением по времени регистрации. Для излучателя формируются сигналы 4 видов [19]: Sin8 – синусоидальный сигнал с постоянной амплитудой и длительностью 8 периодов (рис. 4, а), Sin32 – синусоидальный сигнал с постоянной амплитудой и длительностью 32 периода, Gauss8 – синусоидальный с амплитудой, меняющейся по нормальному закону, длительностью 8 периодов (рис. 4, б), Gauss32 – синусоидальный с амплитудой, меняющейся по нормальному закону, длительностью 32 периода.

На графике по горизонтальной оси отображены отсчеты сигнала, по вертикальной – соответствующие им значения амплитуд. Единицы отсчетов можно рассматривать в микросекундах, где 1 отсчет равен 0,1 мкс.



Рис. 4. Виды воздействующих сигналов. Синусоидальный сигнал с постоянной амплитудой длительностью 8 периодов (а), синусоидальный с амплитудой, меняющейся по нормальному закону, длительностью 8 периодов (б)

Fig. 4. Types of influencing signals a, б). A sinusoidal signal with a constant amplitude lasting 8 periods (a), a sinusoidal signal with an amplitude varying according to the normal law, lasting 8 periods (б)

При исследовании сигналов, отраженных от объектов, можно заметить в них отличия. Однако при увеличении количества сигналов, полученных от различных приемников, расположенных на разных расстояниях, и при разных типах воздействующих сигналов эти различия становятся недостаточно значимы [20, 21].

Далее объекты, представленные в табл. 1–9, будут обозначаться в виде Gauss8_A110_0, где Gauss8 – вид исходного сигнала, A110 – объект наблюдения, 0 – индекс положения объекта: «синусоидальный с амплитудой, меняющейся по нормальному закону и протяженностью 8 периодов» сигнал подается на объект «алюминиевая трубка диаметром 10 мм», который находится на расстоянии 25 см от излучателя.

Программный комплекс

Программный комплекс для обработки сигналов разработан на языке программирования C++. Пользователю предоставляется интерфейс с возможностями графического представления сигналов и последующим их анализом с помощью математических методов.

При нажатии кнопки «Открыть» будет предложено выбрать файл с расширением *.csv, в который записываются сигналы, и отобразить их в окне. Также предусмотрен выбор канала для просмотра сигналов от различных приемников (рис. 5).

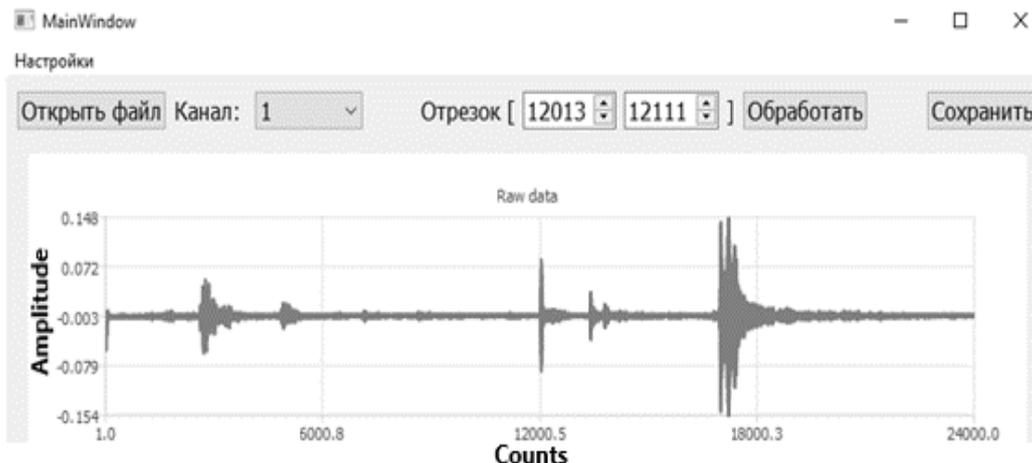


Рис. 5. Пример представления сигнала с помощью разработанной программы

Fig. 5. Example of signal representation using the developed program

Для наблюдения сигнала, отраженного от объекта, требуется проведение относительно длительного эксперимента, в результате которого полученный сигнал содержит в себе не только отражение от объекта исследования, но и фоновый шум.

В связи с этим возникает потребность в извлечении значимого фрагмента сигнала для последующего анализа и выявления закономерностей.

Пространство признаков

После анализа сигнала и его характеристик необходимо перейти к формированию пространства признаков, которое будет служить основой для идентификации объектов. Это включает в себя выбор наиболее информативных признаков, которые наилучшим образом отражают различия между объектами, то есть отклонения значений признаков одного класса объек-

тов относительно малые, а между объектами разных классов – относительно большие. Формирование пространства признаков позволяет перейти от исходных данных к компактному представлению объектов, которое далее будет использоваться для идентификации объектов на основе их характеристик.

В данной работе для различения подводных объектов по гидроакустическим сигналам были выделены следующие признаки.

Первичным признаком является длительность полезного сигнала.

Под полезным сигналом или под полезной частью сигнала понимается фрагмент сигнала, который содержит в себе информацию об объекте [22].

Для определения полезной части отраженного гидроакустического сигнала используют спектральный анализ и фильтрацию по частоте. Периодограммный анализ также является такого рода инструментом. Для обработки предполагается выделять фрагмент исходного сигнала, амплитудные значения которого значительно отличаются от амплитудных значений шума. Построенная периодограмма определяет наиболее выраженный период и частоту. Полученные результаты можно наложить на исходные данные эхосигнала и определить полезный сигнал с выделением значений амплитуд.

В процессе работы длительности экспериментальных полезных сигналов варьировались с целью наблюдения изменений в построении периодограмм.

Следующие признаки определяются из периодограммы, вычисленной по схеме Бюй-Балло.

$I_{\max}(T_1)_B$ – значение локального максимума интенсивности (рис. 6).

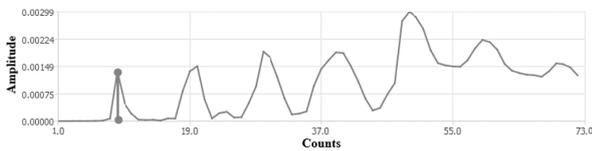


Рис. 6. $I_{\max}(T_1)_B$ – значение локального максимума интенсивности

Fig. 6. $I_{\max}(T_1)_B$ – value of the local intensity maximum

$I_{\max}(T)_B$ – максимальный показатель интенсивности на всей периодограмме (рис. 7).

$T(I_{\max})_B$ – значение пробного периода, соответствующее величине $I_{\max}(T)_B$ (рис. 7).

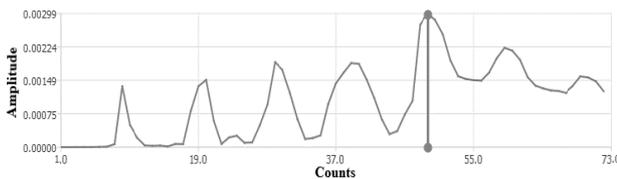


Рис. 7. $I_{\max}(T)_B$ – максимальный показатель интенсивности на всей периодограмме, $T(I_{\max})_B$ – значение пробного периода, соответствующее величине $I_{\max}(T)_B$

Fig. 7. $I_{\max}(T)_B$ – maximum intensity indicator on the whole periodogram $I_{\max}(T)_B$, $T(I_{\max})_B$ – the value of the trial period corresponding to the value of $I_{\max}(T)_B$

DP_{1B} – количество отсчетов (пробных периодов) в окрестности первого локального максимума периодограммы (рис. 8).

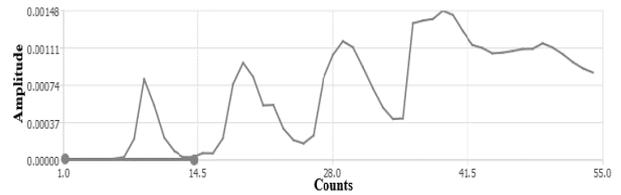


Рис. 8. DP_{1B} – количество отсчетов в окрестности первого локального максимума периодограммы

Fig. 8. DP_{1B} – number of samples in the vicinity of the first local maximum of the periodogram DP_{1B}

Следующие признаки выведены из периодограммы, вычисленной с помощью преобразования Фурье.

$I_{\max}(T)_F$ – максимальный показатель интенсивности на всей периодограмме (рис. 9).

$T(I_{\max})_F$ – значение периода, соответствующее величине $I_{\max}(T)_F$ (рис. 9).

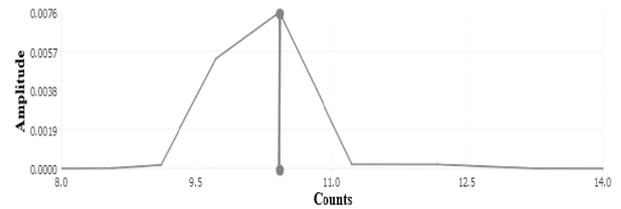


Рис. 9. $I_{\max}(T)_F$ – максимальный показатель интенсивности на всей периодограмме; $T(I_{\max})_F$ – значение периода, соответствующее величине $I_{\max}(T)_F$

Fig. 9. $I_{\max}(T)_F$ – the maximum intensity index on the whole periodogram, $T(I_{\max})_F$ – value of the period corresponding to the value of $I_{\max}(T)_F$

$T^-(I)_F$ и $T^+(I)_F$ – значения периодов, которые соответствуют значениям интенсивностей $I^-(I)_F$ и $I^+(I)_F$, находящихся на левом и правом изломах от значения $I_{\max}(T)_F$ (рис. 10).

$I^-(I)_F$ – значение интенсивности на левом изломе (рис. 10).

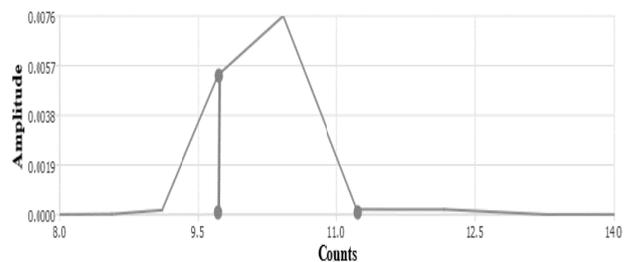


Рис. 10. $T^-(I)_F$, $T^+(I)_F$ – значения периодов, которые соответствуют значениям интенсивностей $I^-(I)_F$ и $I^+(I)_F$, находящихся на левом и правом изломах от значения $I_{\max}(T)_F$, $I^-(I)_F$ – значение интенсивности на левом изломе

Fig. 10. $T^-(I)_F$, $T^+(I)_F$ – values of periods, which correspond to the values of intensities $I^-(I)_F$ and $I^+(I)_F$, which are on the left and right breaks from the value $I_{\max}(T)_F$, $I^-(I)_F$ – intensity value at the left break

KI_F – количество изломов в периодограмме, которые образованы значениями интенсивностей от главных периодов (рис. 11).

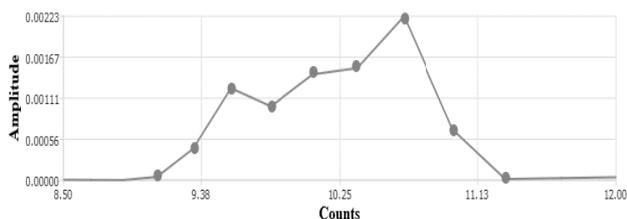


Рис. 11. KI_F – количество изломов в периодограмме, которые образованы значениями интенсивностей от главных периодов

Fig. 11. KI_F – number of breaks in the periodogram, which are formed by the values of intensities from the main periods

DP_F – количество отсчетов (периодов) периодограммы, при которых значение интенсивности больше 0 (рис. 12).

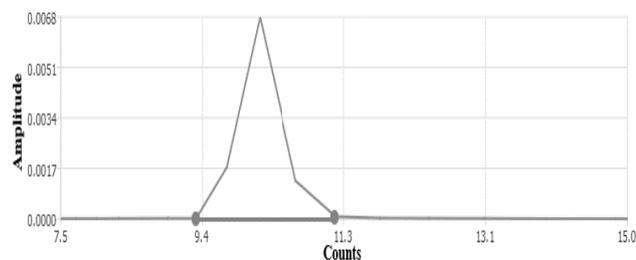


Рис. 12. DP_F – количество отсчетов периодограммы, при которых значение интенсивности больше 0

Fig. 12. DP_F – number of periodogram samples, at which the intensity value is greater than 0

Помимо выбранных признаков для идентификации объектов были выделены другие признаки: среднее выборочное, выборочная дисперсия, среднее квадратическое отклонение, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса для периодограммы, вычисленной с применением преобразования Фурье.

Из периодограммы, полученной по вычислительной схеме Бью-Балло, разности между максимальным значением интенсивности и значениями на изломах слева и справа, а также разности между соответствующими значениями пробных периодов. Перечисленные признаки, кроме первого, оказались малоэффективными в задаче идентификации для данной группы объектов, поэтому в дальнейшем не использовались.

Реализация метода идентификации

Итоговым этапом исследования является идентификация объектов. Рассматриваются три класса, которым соответствуют ранее упомянутые объекты исследования (рис. 2). Обучающая выборка содержала 36 сигналов, контрольная – 12. Сигналами, входящими в обучающую выборку, являлись сигналы, полученные с расстояний, обозначенных индексами 0, 1, а в контрольную – индексом 2.

Приведем пример применения данной схемы для признака «длительность полезного сигнала» относи-

тельно трех заявленных объектов с исходным сигналом Gauss8 (табл. 1–3).

Таблица 1. Обучающая выборка, Gauss8_AI10_

Table 1. Training sample, Gauss8_AI10_

Сигнал	Приемник	Длительность полезного сигнала
Gauss8_AI10_0	1	223
Gauss8_AI10_0	2	217
Gauss8_AI10_0	3	232
Gauss8_AI10_0	4	218
Gauss8_AI10_1	1	229
Gauss8_AI10_1	2	217
Gauss8_AI10_1	3	219
Gauss8_AI10_1	4	224
Эталон. значение		222,375

Таблица 2. Обучающая выборка, Gauss8_PP20_

Table 2. Trainingsample, Gauss8_PP20_

Сигнал	Приемник	Длительность полезного сигнала
Gauss8_PP20_0	1	102
Gauss8_PP20_0	2	93
Gauss8_PP20_0	3	103
Gauss8_PP20_0	4	103
Gauss8_PP20_1	1	110
Gauss8_PP20_1	2	103
Gauss8_PP20_1	3	100
Gauss8_PP20_1	4	100
Эталон. значение		101,75

Таблица 3. Обучающая выборка, Gauss8_PP32_

Table 3. Trainingsample, Gauss8_PP32_

Сигнал	Приемник	Длительность полезного сигнала (число отсчетов)
Gauss8_PP32_0	1	88
Gauss8_PP32_0	2	93
Gauss8_PP32_0	3	97
Gauss8_PP32_0	4	93
Gauss8_PP32_1	1	90
Gauss8_PP32_1	2	91
Gauss8_PP32_1	3	99
Gauss8_PP32_1	4	96
Эталон. значение		93,375

На основании данных из обучающей выборки подбирается значение ε , которое позволяет определить окрестность, содержащую значения признаков того или иного класса (табл. 4).

Таблица 4. Окрестность по признаку для каждого класса, $\varepsilon = 20$

Table 4. Neighborhood by attribute for each class, $\varepsilon = 20$

Номер класса	Название класса	Окрестность
1	Gauss8_AI10_	[202,375;242,375]
2	Gauss8_PP20_	[81,75;121,75]
3	Gauss8_PP32_	[73,375;113,375]

В табл. 5 показаны значения признака объектов контрольной выборки, принадлежность которых к классам заранее известна. В последний столбец внесены номера классов, к которым относятся значения, полученные с помощью алгоритма голосования. Аналогичные действия производились относительно всех выделенных признаков. По признакам классифицируем каждый сигнал из контрольной выборки. Для этого составим таблицу, в которой будут прописаны окрестности признаков для каждого класса (табл. 6).

Таблица 6. Окрестности признаков для классов

Table 6. Neighborhood features for classes

№	Признак	Наименование класса		
		Gauss_AI10_	Gauss_PP20_	Gauss_PP32_
Первичный признак				
1.	Длительность полезного сигнала	[202,375;242,375]	[81,75;121,75]	[73,375;113,375]
Вычислительная схема Бюй-Балло				
2.	$I_{\max}(T_1)_B$	[0,0004;0,0007]	[0,00019;0,00049]	[0,00043;0,00073]
3.	$I_{\max}(T)_B$	[0,00092;0,00132]	[0,00045;0,00085]	[0,00094;0,00134]
4.	$T(I_{\max})_B$	[95,875;111,875]	[88,75;104,75]	[82,375;98,375]
5.	DP_{1B}	[15;16,5]	[13,375; 14,875]	[12,75;14,25]
Преобразование Фурье				
6.	$I_{\max}(T)_F$	[0,000996;0,001796]	[0,000724;0,001524]	[0,002681;0,003481]
7.	$T(I_{\max})_F$	[10,11875;10,81875]	[9,83;10,53]	[9,885;10,585]
8.	$T(\Gamma)_F$	[9,59625;10,39625]	[8,85;9,65]	[8,95;9,75]
9.	$T^+(\Gamma^+)_F$	[10,7575;11,3575]	[10,89;11,49]	[11,19875;11,79875]
10.	$\Gamma(T)$	[0,000404;0,000704]	[0,000096;0,000396]	[0,000503;0,000803]
11.	KI_F	[5,5;9,5]	[2,75;6,75]	[2,375;6,375]
12.	DP_F	[3,4375; 4,2375]	[4,2125; 5,0125]	[4,575; 5,375]

Сформируем таблицы (табл. 7, 8) принадлежности сигналов к классам по признакам.

Таблица 5. Контрольная выборка и голос за класс

Table 5. Control sample and class vote

Сигнал	Приемник	Длительность полезного сигнала	Голос за класс
Gauss8_AI10_2	1	235	1
Gauss8_AI10_2	2	223	1
Gauss8_AI10_2	3	234	1
Gauss8_AI10_2	4	232	1
Gauss8_PP20_2	1	96	2 3
Gauss8_PP20_2	2	103	2 3
Gauss8_PP20_2	3	103	2 3
Gauss8_PP20_2	4	100	2 3
Gauss8_PP32_2	1	90	2 3
Gauss8_PP32_2	2	99	2 3
Gauss8_PP32_2	3	89	2 3
Gauss8_PP32_2	4	110	2 3

Таблица 7. Принадлежность сигналов к классам по признакам, 1

Table 7. Belonging of signals to classes by signs, 1

Сигнал	Приемник	Признаки				DP_{1B}
		Длительность полезного сигнала	$I_{\max}(T)_{B}$	$I_{\max}(T)_{B}$	$T(I_{\max})_{B}$	
Gauss_A110_2	1	1	12	2	–	1
Gauss_A110_2	2	1	13	13	23	1
Gauss_A110_2	3	1	13	13	23	1
Gauss_A110_2	4	1	2	2	–	1
Gauss_PP20_2	1	23	2	2	123	23
Gauss_PP20_2	2	23	2	2	12	23
Gauss_PP20_2	3	23	2	2	1	23
Gauss_PP20_2	4	23	2	2	12	23
Gauss_PP32_2	1	23	12	2	123	23
Gauss_PP32_2	2	23	13	13	12	23
Gauss_PP32_2	3	23	13	13	123	3
Gauss_PP32_2	4	23	13	13	23	23

Таблица 8. Принадлежность сигналов к классам по признакам, 2

Table 8. Belonging of signals to classes by signs, 2

Сигнал	Приемник	Признаки						DP_F
		$I_{\max}(T)_F$	$T(I_{\max})_F$	$T(I)_F$	$T^*(I^*)_F$	$I(T)_F$	KI_F	
Gauss_A110_2	1	12	1	1	12	1	1	23
Gauss_A110_2	2	1	1	1	12	13	1	1
Gauss_A110_2	3	1	1	1	12	13	1	1
Gauss_A110_2	4	12	13	13	12	3	23	–
Gauss_PP20_2	1	–	–	–	–	–	23	–
Gauss_PP20_2	2	12	123	23	23	1	23	2
Gauss_PP20_2	3	12	123	23	23	2	23	2
Gauss_PP20_2	4	12	23	23	12	2	23	1
Gauss_PP32_2	1	–	23	23	123	2	23	23
Gauss_PP32_2	2	3	23	23	12	2	23	–
Gauss_PP32_2	3	–	23	2	12	–	23	1
Gauss_PP32_2	4	–	23	23	12	2	23	23

В табл. 9 приведено количество голосов за каждый класс по всем признакам для каждого сигнала из контрольной выборки и выбран класс объекта, за который

было больше голосов (в последнем столбце жирным шрифтом выделены строчки, соответствующие объектам, правильно распознанным данным алгоритмом).

Таблица 9. Количество голосов за каждый класс

Table 9. Number of votes for each class

Сигнал	Приемник	Количество голосов за класс			Большинство голосов за класс
		1	2	3	
Gauss_A110_2	1	9	5	1	1
Gauss_A110_2	2	11	2	4	1
Gauss_A110_2	3	11	2	4	1
Gauss_A110_2	4	6	5	4	1
Gauss_PP20_2	1	1	6	4	2
Gauss_PP20_2	2	4	11	6	2
Gauss_PP20_2	3	3	11	6	2
Gauss_PP20_2	4	4	11	5	2
Gauss_PP32_2	1	3	11	8	2
Gauss_PP32_2	2	4	8	8	2 3
Gauss_PP32_2	3	5	6	7	3
Gauss_PP32_2	4	3	9	9	2 3

Таким образом, 9 из 12 сигналов однозначно отнесены по классам объектов по выбранным признакам. Это значит, что предлагаемое пространство признаков является пригодным для различения данных объектов, процент правильного распознавания составил более 75 %. Если учитывать, что объекты 2-го и 3-го классов (полипропиленовые трубки разных диаметров) достаточно похожи, то это еще больше подчеркивает, что выделенное пространство признаков дает успешный результат распознавания.

Выводы

Проведенный анализ гидроакустических сигналов для целей выявления закономерностей в отраженных гидроакустических сигналах показал, что метод периодограммного анализа позволяет сформировать систему признаков для различения подводных объектов. Объект может быть идентифицирован по характеристикам периодограмм, построенных методами Фурье и Бюй-Балло. В качестве алгоритма идентификации был использован алгоритм голосования, который позволил успешно различить исследуемые объекты и их сигналы по выделенным признакам. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о перспективности использованных методов периодограммного анализа и алгоритмов распознавания с целью идентификации подводных объектов по отраженным гидроакустическим сигналам.

Библиографические ссылки

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А. В. Инзарцев, Л. В. Киселев, В. В. Костенко, Ю. В. Матвиенко, А. М. Павин, А. Ф. Щербатюк [отв. ред. Л. В. Киселев]. Владивосток : Дальнаука, 2018. 368 с.
2. Мартынов В. Л., Снек Ю. Л., Борисов А. Н. Оптимизация информационно-измерительных и управляющих систем подводных аппаратов для повышения эффективности подводного поиска // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4-2(58). С. 109–116. DOI 10.37220/МИТ.2022.58.4.014.
3. Обеспечение экологической безопасности акваторий Российского Арктического шельфа и повышение безопасности морских экосистем за счет снижения шумового загрязнения / В. А. Калью, Д. А. Смирнов, В. И. Таровик [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. № 2 (404). С. 140–153. DOI 10.24937.2542-2324-2023-2-404-140-153.
4. Особенности технологии использования параметрических гидроакустических средств для поиска, идентификации и мониторинга объектов в придонном слое / А. А. Шрейдер, А. А. Шрейдер, М. С. Клюев [и др.] // Процессы в геосредах. 2018. № 2(15). С. 920–927.
5. Обнаружение и обследование локальных донных объектов с помощью группы специализированных автономных подводных роботов / А. В. Инзарцев, А. М. Павин, Г. Д. Елисеенко, М. А. Панин // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 40–51. DOI 10.23683/2311-3103-2018-1-40-51.
6. Легуша Ф. Ф., Попов Ю. Н. Численное моделирование распространения акустического сигнала в подводном звуковом канале // Труды Крыловского государственного научного

центра. 2021. № 2 (396). С. 122–133. DOI 10.24937/2542-2324-2021-2-396-122-133.

7. Бутырский Е. Ю., Васильев В. В., Рахуба В. П. Система взглядов на совершенствование обработки гидроакустических сигналов // Морской сборник. 2021. № 7 (2092). С. 57–64.

8. Бутырский Е. Ю. Математические модели гидроакустических сигналов и методы их обработки. СПб.: Информационный издательский учебно-научный центр «Стратегия будущего», 2018. 649 с. ISBN 978-5-4268-0028-1.

9. Раушер К., Йансен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа / пер. с англ. С. М. Смольского; под ред. Ю. А. Гребенко. М.: Горячая линия–Телеком, 2006. 224 с.: ил. ISBN 5-93517-294-1.

10. Комиссаров Д. Р., Доровской В. А. Использование процедуры компенсации при распознавании акустических образов и сцен необитаемых подводных аппаратов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2020. № 2. С. 110–125.

11. Карабанов И. В., Миронов А. С. Алгоритмы обработки гидроакустических сигналов. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2018. 140 с.

12. Осипов О. В. Спектральный анализ дискретных сигналов с высоким частотным разрешением // Вычислительные методы и программирование. 2019. Т. 20, № 3. С. 270–282. DOI 10.26089/NumMet.v20r324.

13. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление / пер. с англ. под ред. В. Ф. Писаренко. М.: Мир, 1974, кн. 1. 406 с.

14. Колмогоров В. Г. Современная геодинамика Сибири по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований: монография. Новосибирск: СГГА, 2013. 236 с. ISBN 978-5-87693-602-8.

15. «Распознавание». Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю. И. Журавлев, В. В. Рязанов, О. В. Сенько; Ю. И. Журавлев, В. В. Рязанов, О. В. Сенько. М.: ФАЗИС, 2006. 176 с. ISBN 5-7036-0108-8.

16. Широков В. А., Милч В. Н. Экспериментальный комплекс для исследования возможностей использования гидроакустических датчиков в системах подводного видения // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 4. С. 54–64. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-4-54-64>.

17. Мишуров В. Ж., Рязанов В. А. Многофункциональный акустический стенд для лабораторных исследований // Актуальные проблемы контроля окружающей среды: материалы семинара, Севастополь, 10–11 ноября 2020 года. Севастополь: ИП Куликов А. С., 2020. С. 30.

18. Греков А. Н., Греков Н. А., Сычев Е. Н. Метрологическое обеспечение акустических измерительных приборов среднечастотного диапазона // Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. 2 (40). С. 117–126. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2020-2-117-126>.

19. Спектральный метод измерения изменений временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов / А. А. Шейников, А. В. Исаев, В. В. Зеленко, Ю. В. Суходолов // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10, № 2. С. 178–184. DOI 10.21122/2220-9506-2019-10-2-178-184.

20. Вероятностно-статистический критерий оценки состояния виброакустического сигнала / И. С. Кудрявцева, А. П. Науменко, А. М. Демин, А. И. Одинец // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. С. 113–122. DOI 10.25206/2310-9793-7-2-113-122.

21. Генпенер В. В., Мандрикова Б. С. Обнаружение и идентификация аномальных эффектов в сложном сигнале // Автоматика и телемеханика. 2021. № 10. С. 46–59. DOI 10.31857/S0005231021100056.

22. Различение подводных объектов на основе периодического анализа отраженных гидроакустических сигналов /

А. С. Тугбаева, А. Г. Ицков, В. Н. Милч, В. А. Широков // Химическая физика и мезоскопия. 2022. Т. 24, № 3. С. 388–399. DOI 10.15350/17270529.2022.3.32.

References

1. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Y.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. *Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sis-temy, tekhnologii, primeneniye* [Underwater robotic complexes: systems, technologies, application]. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2018. 368 p. (in Russ.).

2. Martynov V.L., Siek Y.L., Borisov A.N. [Optimization of information-measuring and control systems of underwater vehicles to improve the efficiency of underwater search]. *Marine Intelligent Technologies*. 2022. No. 4-2. Pp. 109-116 (in Russ.). DOI 10.37220/MIT.2022.58.4.014.

3. Kal'u V.A., Smirnov D.A., Tarovik V.I. [et al.] *Obespecheniye ekologicheskoi bezopasnosti akva-torii Rossiiskogo Arkticheskogo shelf'a i povysheniye bezopasnosti morskikh ekosistem za schet snizheniya shu-movogo zagryazneniya* [Ensuring environmental safety of the Russian Arctic shelf water areas and increasing the safety of marine ecosystems by reducing noise pollution]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Proc. of the Krylov State Research Center]. 2023. No. 2. Pp. 140-153 (in Russ.). DOI 10.24937.2542-2324-2023-2-404-140-153.

4. Shrader A.A., Shrader A.A., Klyuev M.S. [et al.] [Features of the technology of using parametric hydroacoustic means for search, identification and monitoring of objects in the bottom layer]. *Processes in geosphere*. 2018. No. 2. Pp. 920-927 (in Russ.).

5. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Eliseenko G.D., Panin M.A. [Detection and survey of local bottom objects using a group of specialized autonomous underwater robots]. *Izvestia YuFU. Technical Sciences*. 2018. No. 1. Pp. 40-51. DOI 10.23683/2311-3103-2018-1-40-51.

6. Legusha F.F., Popov Y.N. *Chislennoye modelirovaniye raspostraneniya akusticheskogo signala v podvodnom zvukovom kanale* [Numerical modeling of acoustic signal propagation in an underwater sound channel]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Proc. of the Krylov State Research Center]. 2021. No. 2. Pp. 122-133 (in Russ.). DOI 10.24937/2542-2324-2021-2-396-122-133.

7. Butyrsky E.Yu., Vasiliev V.V., Rakhuba V.P. [System of views on the hydroacoustic signal processing improvement]. *Marine Collection*. 2021. No. 7. Pp. 57-64 (in Russ.).

8. Butyrsky E.Yu. *Matematicheskie modeli gidroakusticheskikh signalov i metody ikh obrabotki* [Mathematical models of hydroacoustic signals and methods of their processing]. Saint-Petersburg: Information publishing educational and research center "Strategy of the Future", 2018. 649 p. ISBN 978-5-4268-0028-1 (in Russ.).

9. Rauscher K., Janssen F., Minichold R. *Osnovy spektral'noy analiza* [Fundamentals of Spectral Analysis]. Moscow: Hot Line-Telecom, 2006. 224 p. ISBN 5-93517-294-1 (in Russ.).

10. Komissarov D.R., Dorovskoy V.A. [Using the compensation procedure for recognizing acoustic images and scenes of uninhabited underwater vehicles]. *Bulletin of Kerch State Marine Technological University*. 2020. No. 2. Pp. 110-125 (in Russ.).

11. Karabanov I.V., Mironov A.S. *Algoritmy obrabotki gidroakusticheskikh signalov* [Algorithms of hydroacoustic signals processing]. Khabarovsk: TOGU Publ., 2018. 140 p. (in Russ.).

12. Osipov O.V. [Spectral analysis of discrete signals with high frequency resolution]. *Computational Methods and Programming*. 2019. Vol. 20, no. 3. Pp. 270-282 (in Russ.). DOI 10.26089/NumMet.v20r324.

13. Box J., Jenkins G. *Analiz vremennykh ryadov, prognoz i upravleniye* [Analysis of Time Series, Forecasting and Management]. Moscow: Mir Publ., 1974, book 1. 406 p. (in Russ.).

14. Kolmogorov V.G. Modern geodynamics of Siberia based on the results of geodetic and geological-geophysical studies. Novosibirsk : SGGA, 2013. – 236 p. ISBN 978-5-87693-602-8.
15. Zhuravlev Y.I., Ryazanov V.V., Senko O.V.; Zhuravlev Yu.I., Ryazanov V.V., Senko O.V. *Matematicheskie metody. Programmnaya sistema. Prakticheskie primeneniya* [Recognition. Mathematical methods. Program system. Practical applications]. Moscow : FAZIS, 2006. 176 p. ISBN 5-7036-0108-8 (in Russ.).
16. Shirokov V.A., Milich V.N. [Experimental complex for investigation of hydroacoustic sensors use in underwater vision systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2021. Vol. 24, no. 4. Pp. 54-64 (in Russ.). <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-4-54-64>.
17. Ishurov V.J., Ryazanov V.A. [Multifunctional acoustic stand for laboratory research]. Actual problems of environmental control: proceedings of the seminar, Sevastopol, November 10-11, 2020. Sevastopol: IP Kulikov A.S., 2020. P. 30 (in Russ.).
18. Grekov A.N., Grekov N.A., Sychev E.N. [Metrological support of acoustic measuring devices of medium-frequency range]. *Environmental Control Systems*. 2020. Vol. 2. Pp. 117-126 (in Russ.). <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2020-2-117-126>.
19. Sheinikov A.A., Isaev A.V., Zelenko V.V., Sukhodolov Yu.V. [Spectral method for measuring changes in time intervals between periodic pulse sequences]. *Instruments and measurement methods*. 2019. Vol. 10, no. 2. Pp. 178-184 (in Russ.). DOI 10.21122/2220-9506-2019-10-2-178-184.
20. Kudryavtseva I.S., Naumenko A.P., Demin A.M., Odinets A.I. [Probabilistic-statistical criterion of the vibroacoustic signal state estimation]. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2019. Pp. 113-122 (in Russ.). DOI 10.25206/2310-9793-7-2-113-122.
21. Geppener V.V., Mandrikova B.S. [Detection and identification of anomalous effects in a complex signal]. *Automation and Telemekhanics*. 2021. No. 10. Pp. 46-59 (in Russ.). DOI 10.31857/S0005231021100056.
22. Tugbaeva A.S., Itskov A.G., Milich V.N., Shirokov V.A. [Distinguishing underwater objects based on periodogram analysis of reflected hydroacoustic signals]. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2022. Vol. 24, no. 3. Pp. 388-399 (in Russ.). DOI 10.15350/17270529.202

* * *

Underwater Object Identification by Means of Reflected Sonar Signals

A. S. Tugbaeva, Research Engineer, Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of RAS, Izhevsk, Russia

A. G. Itskov, PhD in Physics and mathematics, Senior Research Associate, Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of RAS, Izhevsk, Russia

V. N. Milich, PhD in Engineering, Leading Researcher, Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of RAS, Izhevsk, Russia

V. A. Shirokov, PhD in Engineering, Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of RAS, Izhevsk, Russia

The paper presents the research results of the underwater object identification method on the basis of periodogram analysis of hydroacoustic signals reflected from them with the application of voting algorithm. The identification of an object in the article means making a decision to distinguish it from other objects. Hydroacoustic signals are the main means of obtaining information about the underwater environment, they are also widely used to detect and identify underwater objects, including ships, submarines and underwater structures. The identification of underwater objects is an important task to ensure the safety of underwater exploration and the efficient utilization of marine resources in a noisy and complex underwater environment, including the presence of several natural objects and the use of various underwater exploitation techniques.

The study proposes an approach that uses periodogram analysis followed by a voting algorithm to solve the problem of underwater object identification. Periodogram analysis is a method that identifies characteristic time and frequency features in hydroacoustic signals reflected from different types of objects. The proposed approach takes into account different characteristics of the signal periodogram to identify the unique features of each underwater object.

The main purpose of this work is to develop and investigate a set of features using periodograms that take into account the specificity of hydroacoustic signals and the unique properties of different types of underwater objects under study. This approach allows to achieve a sufficiently high accuracy of identification.

The paper presents the results of experiments conducted on real hydroacoustic signals. These results allow us to conclude about the effectiveness of the underwater object identification method by reflected hydroacoustic signals on the basis of periodogram analysis. The results of the study have practical significance and can be applied in applications related to underwater research.

Keywords: hydroacoustics, underwater object, echo signal, periodogram analysis, identification.

Получено: 06.10.23

Образец цитирования

Идентификация подводных объектов по отраженным гидроакустическим сигналам / А. С. Тугбаева, А. Г. Ицков, В. Н. Милич, В. А. Широков // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 4. С. 31-41. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-31-41.

For Citation

Tugbaeva A.S., Itskov A.G., Milich V.N., Shirokov V.A. [Underwater Object Identification by Means of Reflected Sonar Signals]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 31-41 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-31-41.