



DOI [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19\(2\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19(2)-6)

EDN <https://elibrary.ru/pchktj>

УДК 681.883.05

© В. А. Широков*, А. И. Баженова, В. Н. Милич, 2026

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34

*shirokovva@udman.ru

Экспериментальное исследование возможностей локализации подводных объектов в зоне Френеля с использованием виртуальной линейной антенной решетки в опытовом бассейне

Статья поступила в редакцию 21.11.2025, после доработки 08.05.2026, принята в печать 20.06.2026

Аннотация

Рассмотрены процедура и результаты построения акустической картины акватории, содержащей одиночные, множественные и составные подводные объекты, с помощью гидроакустической системы подводного видения. Исследование проведено в масштабной модели водоема, реализованной в опытовом бассейне. Объекты размещались в зоне Френеля модели протяженной линейной акустической решетки, реализованной в виде линейно перемещаемого по заданной программе гидроакустического приемника. Акустическая «светимость» подводных объектов обеспечивалась за счет одиночного акустического источника подсветки. Используемый метод локализации подводных объектов основан на учете кривизны волнового фронта в зоне Френеля. Акустическая «светимость» точки расположения предполагаемого объекта определялась путем интегрирования пространственно-временного поля сигналов вдоль образующих, формируемых с учетом задержек волнового фронта отраженного от объекта сигнала. Показана возможность построения акустической картины акватории и дальнейшего распознавания объектов (одиночный, составной, множественный), а также разделения объектов в составе группы в поле зрения гидроакустической системы подводного видения. Подтверждено экспериментально увеличение контраста акустического изображения объектов за счет накопления энергии волны по всему полю сигналов.

Ключевые слова: когерентная гидроакустика, линейная антенная решетка, зона Френеля, пространственно-временное поле сигналов, картина акустической «светимости»

© V. A. Shirokov*, A. I. Bazhenova, V. N. Milich, 2026

Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34, T. Baramzina Str., Izhevsk, 426067, Russia

*shirokovva@udman.ru

Experimental study of the possibilities of localizing underwater objects in the Fresnel Zone based on the virtual linear antenna array modeling in a test tank

Received 21.11.2025, Revised 08.05.2026, Accepted 20.06.2026

Abstract

The procedure and results of constructing an acoustic map for water area containing single, multiple, and composite underwater objects using an underwater hydroacoustic vision system are considered in the article. The study was conducted in a scale model of a reservoir implemented in the test tank. The objects were located in the Fresnel zone of an extended linear acoustic array

Ссылка для цитирования: Широков В.А., Баженова А.И., Милич В.Н. Экспериментальное исследование возможностей локализации подводных объектов в зоне Френеля с использованием виртуальной линейной антенной решетки в опытовом бассейне // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2026. Т. 19, № 2. С. 64–76. EDN PCHKTJ.
[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19\(2\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19(2)-6)

For citation: Shirokov V.A., Bazhenova A.I., Milich V.N. Experimental study of the possibilities of localizing underwater objects in the Fresnel Zone based on the virtual linear antenna array modeling in a test tank. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2026;19(2);64–76. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19\(2\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19(2)-6)

model implemented as a hydroacoustic receiver linearly movable according to a predetermined program. The acoustic reflectivity of the underwater objects was ensured by a single acoustic illumination source. The method for localizing underwater objects is based on wavefront curvature in the Fresnel zone. The acoustic reflectivity of the suspected object location was determined by integrating the spatio-temporal signal field along generating line determined taking into account the delays of the signal wavefront reflected from the object. The feasibility of constructing an acoustic map of the water area and subsequent objects recognition (single, composite, multiple) as well as separating objects from group within the view field of the underwater hydroacoustic vision system are demonstrated. An increase in the contrast of objects acoustic images due to the accumulation of wave energy across the entire signal field has been experimentally confirmed.

Keywords: coherent hydroacoustics, linear antenna array, Fresnel zone, spatio-temporal signal field, acoustic reflectivity picture

1. Введение

Средства регистрации и визуализации взаимного размещения подводных объектов востребованы при охране защитных зон акваторий, обслуживании машин и механизмов разработки подводных месторождений и мониторинге состояния морских сооружений. Одной из комплексных задач, решаемых при освещении подводной обстановки, является формирование картины расположения подводных объектов [1]. Основные цели формирования картины подводной обстановки системой подводного видения:

- создание и визуализация общей картины подводной акватории в зоне контроля;
- определение пространственных координат и формы подводных объектов в зоне контроля;
- формирование цифрового представления акустической картины взаимного размещения подводных объектов.

Исторически функции визуализации состояния акватории обеспечивались телевизионными системами подводного видеонаблюдения [2]. Однако быстрое затухание светового излучения в водной среде ведет к ограниченности размеров анализируемой акватории. Увеличение дальности регистрации подводных объектов достигается за счет использования гидроакустических средств, для которых характерен значительно меньший уровень пространственного затухания при распространении звуковых волн в воде. На основе гидроакустических принципов созданы системы звуковидения, которые являются гидролокаторами с высоким пространственным разрешением и позволяют преобразовать акустическое изображение в форме пространственного распределения звукового давления в оптическое изображение на экране монитора [3]. Дальность действия звуковизоров существенно превышает дальность действия телевизионных систем видеонаблюдения. Однако звуковизоры имеют низкое угловое разрешение и низкое разрешение по дальности, что не позволяет производить детальную оценку пространственных и динамических параметров подводных объектов в зоне контроля.

Такие распространенные гидроакустические устройства, как многолучевые эхолоты [4], имеющие высокую разрешающую способность, позволяют формировать изображение дна акватории и структуру гидротехнических сооружений с высоким разрешением и определять пространственные характеристики деталей объекта. Но изображение формируется путем механического перемещения носителя антенны с последующим формированием изображения на основе последовательности отражений зондирующих гидроакустических сигналов. То есть режим «реального времени» при подводном наблюдении с помощью таких устройств невозможен.

Современная идеология мультистатистических гидролокационных систем подводного наблюдения предполагает использование набора пространственно распределенных гидроакустических станций, работающих как в режиме приема, так и в режиме излучения, которые производят поиск, обнаружение, классификацию и определение координат выбранных классов подводных объектов и передачу полученных данных в систему управления [5]. Системы подводного наблюдения предназначены для оперативного обеспечения заданной вероятности обнаружения подводного объекта заданного класса при заданной вероятности ложной тревоги при нахождении объекта в любой точке контролируемого района [6]. Но в условиях многобликовости акустических отражений от подводных объектов и явлений переотражения и многолучевости распространения акустических волн в подводной среде задача формирования и визуализация картины подводной акватории в зоне контроля, представляется для этих систем труднореализуемой. Наличие множества объектов в зоне контроля усложняет решение этой задачи многократно.

Гидроакустическая система подводного видения должна обеспечить обнаружение, классификацию и определение координат подводных объектов в анализируемой подводной обстановке и представление

полученных результатов в виде акустической картины подводной обстановки, удобной для визуального восприятия оператором, и в виде цифрового представления, которое является исходными данными для работы компьютерных систем контроля зоны наблюдения в реальном масштабе времени.

Информация о состоянии содержания подводной акватории может быть получена путем регистрации и интерпретации сонограмм — одномерных гидроакустических сигналов (в данном случае — массива последовательно измеренных значений звукового давления в гидроакустическом сигнале). Однако, регистрация и анализ одномерных сонограмм не позволяет осуществлять реконструкцию содержания всей анализируемой подводной акватории с локализацией всех подводных объектов. Известны исследования, которые доказывают перспективность использования линейной акустической решетки (ЛАР) для локализации и распознавания подводных объектов [7]. Кроме того, установлено, что применение протяженной ЛАР при использовании разностно-дальномерного метода локализации источников отражения эхосигналов позволяет осуществлять определение координат этих источников по кривизне волнового фронта [8–10]. В работе [11] рассмотрены результаты исследования вопросов использования вертикальных антенн для определения дальности и глубины источников акустического отражения.

По результатам исследований в работе [12] сделан вывод о том, что «упругие колебания волнового (временного) фронта сигнала при распространении в неоднородной и подвижной среде» приводят к отклонениям в оценке координат подводных объектов при расчетах с использованием трехэлементных приемных систем, что вызывает необходимость использования многоэлементных ЛАР. Однако при наличии в анализируемой подводной акватории не одного, а множества объектов, использование взаимной корреляционной функции отраженных сигналов для всего множества пар используемых приемников ЛАР в целях определения разностей времен прихода этих сигналов от каждого источника становится труднореализуемым [8].

Авторам статьи представляется, что решение задачи локализации многих источников отраженных эхосигналов по кривизне волнового фронта поля этих источников может быть достигнуто следующими путями:

- регистрация картины волновых фронтов множества источников отраженных эхосигналов в исследуемой акватории с помощью ЛАР в виде изображения пространственно-временного поля сигналов;
- преобразование изображения пространственно-временного поля сигналов в акустическую картину источников отраженных эхосигналов в исследуемой подводной акватории с последующей визуализацией этой карты для оператора.

Целью настоящей работы является исследование возможностей метода синфазного суммирования пространственно-временного поля отраженных от объектов эхосигналов с помощью ЛАР в зоне Френеля для оценки акустической «светимости» всех точек анализируемой подводной акватории и последующей реконструкции общей картины подводной обстановки (взаимного размещения гидролокационных объектов) в зоне контроля. Регистрация пространственно-временного поля сигналов осуществляется с помощью одиночного ненаправленного приемника, последовательно перемещаемого по горизонтальной линии в фиксированные точки, моделируя таким образом ЛАР. Акустическая «светимость» подводных объектов обеспечивалась за счет одиночного источника акустической подсветки.

2. Выполнение экспериментальных исследований

База исследований — гидроакустический исследовательский комплекс (далее — «комплекс»), описанный в [13, 14]. Параметры комплекса (размеры: $3 \times 1,5 \times 0,75$ м, частота сигналов 1 МГц) выбраны для реализации возможности его использования в качестве масштабной натурной модели реального водоема в масштабе 1:100. Оснастка бассейна позволяет конфигурировать для проведения экспериментальных исследований достаточно большое разнообразие измерительных схем и сценариев.

Измерительная схема опытового бассейна (рис. 1) в описываемом исследовании включает источник излучения зондирующего импульса, поле объектов, и приемник в виде виртуальной линейной гидроакустической решетки (ВЛАР). Излучатель и объекты закреплены на глубине измерений в индивидуальных подвесах так, чтобы объекты находились в зоне действия излучателя.

ВЛАР реализована в виде одиночного гидроакустического приемника, перемещаемого по линейной направляющей в старт-стопном режиме, причем величина шага перемещения, количество шагов и длительность паузы между измерениями задаются в сценарии измерений, реализованном в управляющем компьютере. Цикл измерений, состоящий из излучения зондирующего сигнала, регистрации отраженного сигнала и последующего сдвига приемника на заданный шаг, повторяется заданное число раз, что позволяет зарегистрировать сигналы во всех точках фиксации перемещения приемника, и таким образом получить

массив сигналов реальной ЛАР. При этом возможно моделирование ЛАР с произвольным шагом расположения приемных элементов. Точная повторяемость измерений в последовательных положениях приемника обеспечивается введением в сигнал специальной метки времени [15].

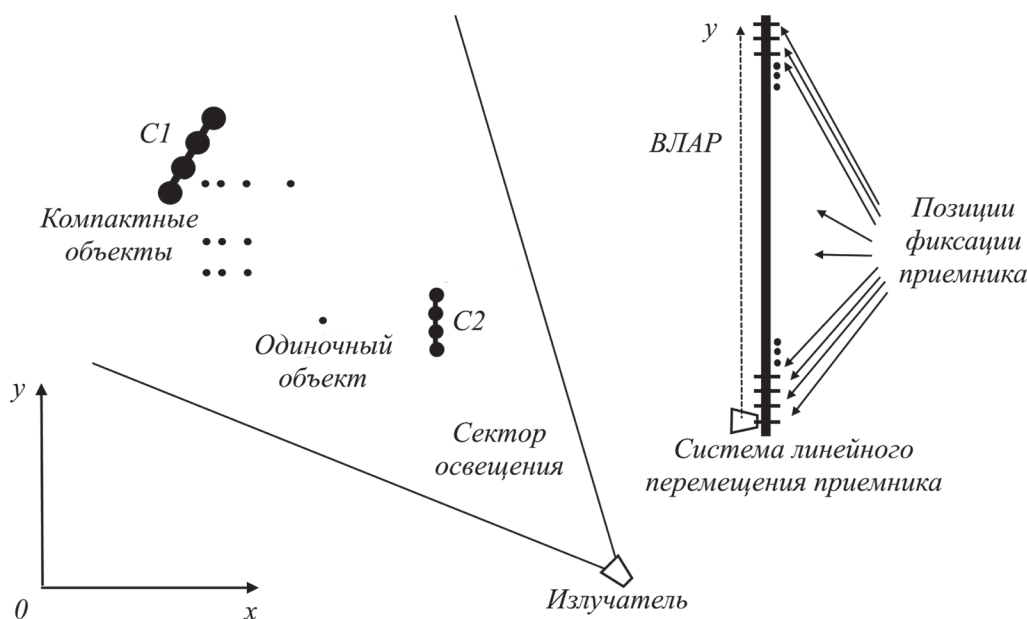


Рис. 1. Расстановка компонентов измерительной схемы (излучателя, объектов, приемника и системы линейного перемещения) в опытном бассейне. Буквами обозначены: C1 — составной объект 1, C2 — составной объект 2

Fig. 1. Arrangement of the measuring circuit components (emitter, objects, receiver and linear displacement system) in the test tank. The letters indicate: C1 — composite object 1, C2 — composite object 2

Длина и расположение ВЛАР в опытном бассейне выбраны так, чтобы по оси Y объекты находились вблизи средней части зоны Френеля ВЛАР, а кривизна фронта отраженной волны была бы достаточна для устойчивого определения положения объекта по форме фронта волны. Длина ВЛАР в настоящем исследовании составляет 500 мм, расстояние от линии перемещения приемника до группы объектов составляет от 850 мм до 1050 мм.

Компоненты измерительной схемы расположены так, чтобы генерируемый излучателем зондирующий сигнал при своем распространении отражался от каждого из объектов, и отраженные объектами гидроакустические волны проходили бы через область пространства ВЛАР. Глубина погружения объектов, излучателя и приемника составляла 300 мм. Ширина диаграммы направленности излучателя и приемника в вертикальном направлении составляет 11 градусов, что позволяет избежать помех, связанных с переотражением звуковых волн от дна и поверхности воды. Зондирующий гидроакустический сигнал в настоящем исследовании создается подачей на излучатель короткого цуга колебаний с несущей частотой 1 МГц и гауссовой огибающей:

$$U(t) = \begin{cases} A \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(t - \frac{N}{2F} \right)^2 / \sigma^2 \right] \cdot \sin(2\pi Ft), & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{N}{F}, \\ 0, & \text{при } t > \frac{N}{F} \end{cases} \quad (1)$$

где N — число периодов (в эксперименте $N = 8$), F — частота сигнала ($F = 10^6$ Гц), A — амплитуда сигнала, $\sigma = 3$ (среднеквадратичное отклонение). При таких параметрах сигнала длина цуга зондирующего сигнала в воде (8 длин волн) составляет около 15 мм.

Перечень и координаты объектов приведены в таблице, фотография их размещения в опытном бассейне показана на рис. 2. Конфигурация размещения объектов была составлена так, чтобы проверить способность метода разделять близкорасположенные компактные и составные объекты при различном их взаимном расположении и сочетаниях.

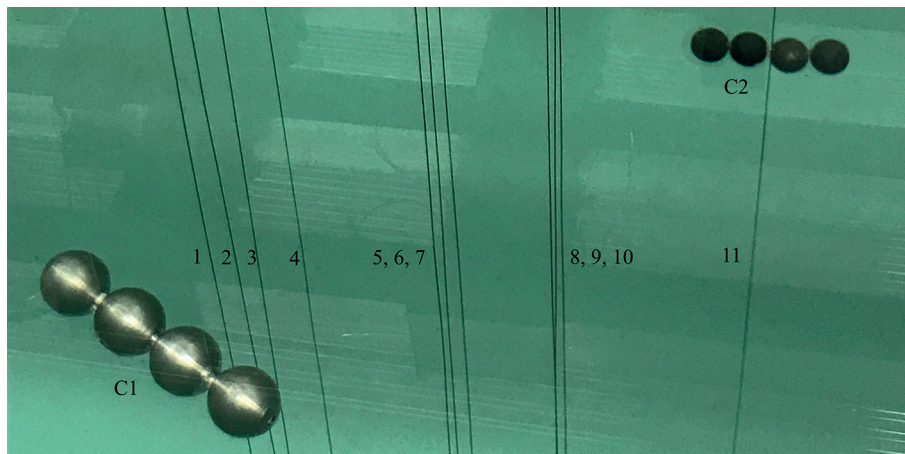


Рис. 2. Фотография фрагмента бассейна с размещенными объектами: составными (C1 и C2) и компактными (одиночный — 11 и три группы — 1,2,3,4; 5,6,7; 8,9,10)

Fig. 2. Photo fragment of the tank with objects: composite (C1 and C2) and compact (single — 11 and three groups — 1,2,3,4; 5,6,7; 8,9,10)

Таблица

Table

Перечень объектов, используемых в исследовании, с их координатами и условными обозначениями

List of objects used in the study with its coordinates and symbols

Номер	Тип	Координата X, мм	Координата Y, мм	Примечание
1	компактный	670	450	№ 11, одиночный
2	компактный	575	605	№ 1, группа1
3	компактный	585	605	№ 2, группа1
4	компактный	605	605	№ 3, группа1
5	компактный	645	605	№ 4, группа1
6	компактный	575	540	№ 5, группа2
7	компактный	585	540	№ 6, группа2
8	компактный	605	540	№ 7, группа2
9	компактный	575	505	№ 8, группа3
10	компактный	585	505	№ 9, группа3
11	компактный	605	505	№ 10, группа3
12	составной	560	620	Объект C1 составной
13	составной	750	450	Объект C2 составной
Излучатель	пьезокерамический	100	1280	US1000–21A
ВЛАР		1600	200...700	Шаг программируется

В качестве компактных (однобликовых) объектов использованы тонкие медные цилиндры с диаметром $1/5$ длины звуковой волны зондирующего импульса (одножильный медный провод с диаметром 0,31 мм, подвешенный вертикально к креплениям на балках и натянутый весом свинцового груза). Составные (многобликовые) объекты представляли собой ряды из 4-х металлических сфер каждый, скрепленных в линию, подвешенные к креплениям на балках на тонкую лавсановую леску диаметром 0,08 мм с пренебрежимо малой отражающей способностью по сравнению с объектами. Диаметры сфер (22 и 13 мм для первого и второго объекта соответственно) многократно превышали длину волны, составляющую 1,48 мм для частоты 1 МГц. Длина составных объектов равна 95 и 52 мм.

Для анализа пространственной разрешающей способности описанной методики измерения, тестовые объекты № 1, № 2, № 3 и № 4 были размещены на расстояниях 10, 20 и 40 мм друг от друга соответственно. Кроме того, для анализа взаимовлияния отраженных волн объекты № 1, № 2, № 3 и № 4 были установлены в зоне прохождения переотраженной волны объекта C1, а объект № 11 — в зоне акустической тени составного объекта C2.

Процесс измерения заключается в циклическом повторении процедуры гидролокационной подсветки области размещения подводных объектов короткими (8 мкс) зондирующими импульсами с измерением и регистрацией отраженных эхосигналов приемником ВЛАР с последующим шаговым перемещением приемника вдоль горизонтальной оси (рис. 1), что задается сценарием измерений. Таким способом обеспечивается моделирование многоэлементной ЛАР с возможностью программирования числа и шага расположения приемников ВЛАР.

Регистрация отраженного объектом эхосигнала при пошаговом перемещении приемника позволяет имитировать работу многоэлементной линейной приемной антенны, причем количество и расположение позиций приемника при проведении каждого измерения можно устанавливать программным путем в соответствии с требуемой конфигурацией модели ЛАР. В настоящем исследовании шаг перемещения был установлен постоянным и равным 2 мм, число позиций M было установлено равным 250.

Зарегистрированные сигналы, сведенные в единый массив, можно рассматривать как пространственно-временное поле сигналов $S_i(t)$, в котором по оси Y откладывается номер сигнала $i = 1...M$, а по оси X — время задержки сигнала t_j от момента излучения до момента оцифровки. Такое пространственно-временное поле сигналов удобно трактовать как изображение специального вида. Подход к анализу матрицы пространственно-временного поля как к анализу изображения открывает возможность применения алгоритмов цифровой обработки изображений и распознавания визуальных образов с использованием нейронных сетей и искусственного интеллекта.

Примеры пространственно-временного поля сигнала отражения от компактного объекта и от составного объекта показаны на рис. 3 и 4. Яркость пикселя картины пространственно-временного поля (рис. 3, *a*) и высота гребней (рис. 3, *б*) соответствуют значению сигнала $S_i(t)$.

Каждый **одиночный компактный** объект порождает в изображении пространственно-временного поля паттерн характерной гиперболической формы (рис. 3). Форма паттерна однозначно определяется расположением объекта, пространственной конфигурацией схемы измерений и координатами точек расположения приемника ВЛАР и скоростью звука.

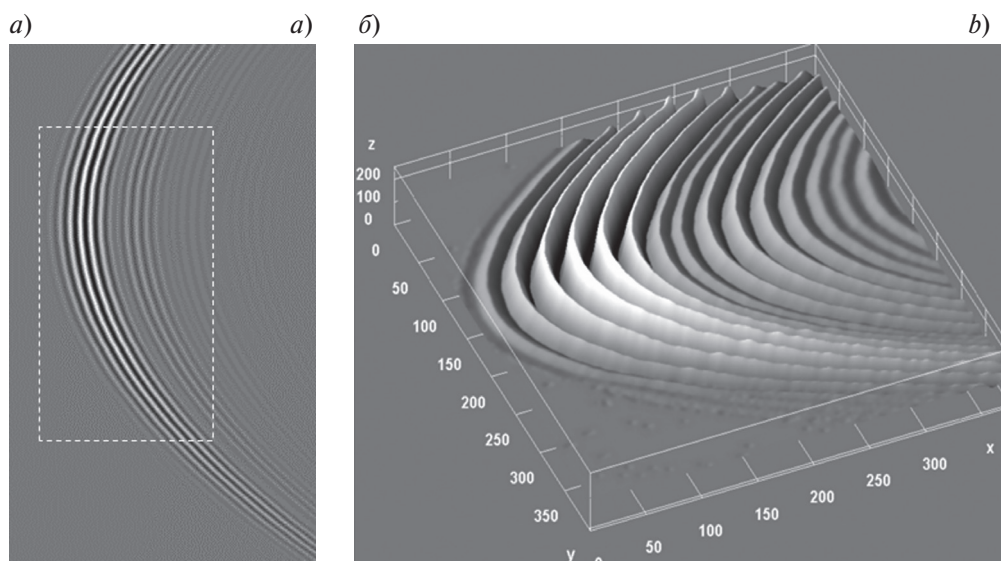


Рис. 3. Фрагмент пространственно-временного поля компактного одиночного объекта в 2d отображении (*a*); выделенная рамкой область поля в 3d отображении (*б*)

Fig. 3. The spatio-temporal field fragment of the compact single object in 2D mapping (*a*); the area of the field highlighted by a frame in 3D mapping (*b*)

Составной объект, обладающий развитой формой отражающей поверхности и, соответственно многоблочной структурой отраженного сигнала, порождает значительно более сложный паттерн в пространственно-временных координатах. Пример фрагмента отображения составного объекта в пространственно-временном поле приведен на рисунках рис. 4, *a* и *б*.

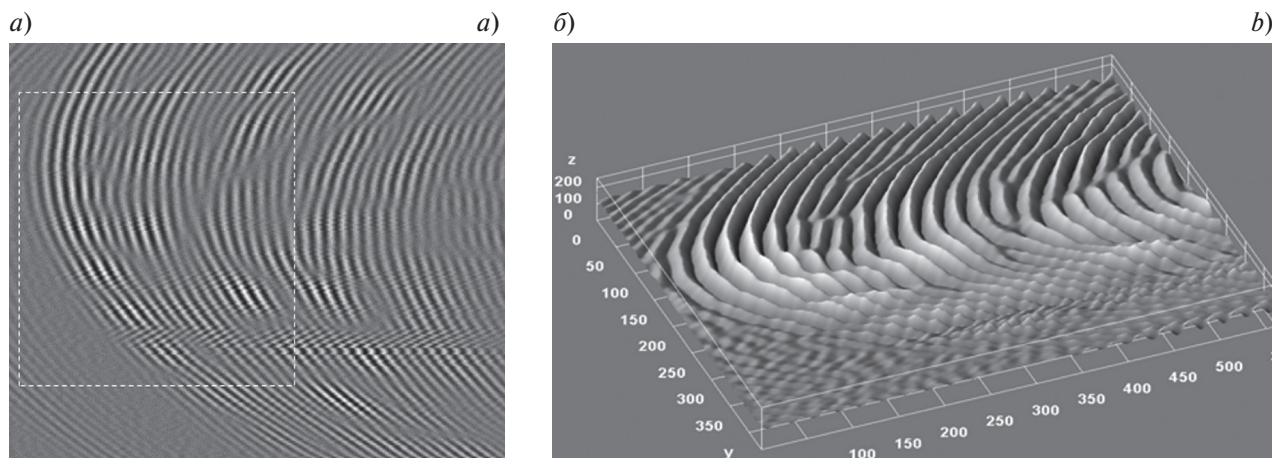


Рис. 4. Фрагмент пространственно-временного поля составного объекта в 2d отображении (а); выделенная рамкой область в 3d отображении (б)

Fig. 4. The spatio-temporal field fragment of the composite object in 2D display (a); the area highlighted by a frame in 3D display (b)

3. Построение поля акустической картины акватории

Сигналы, отраженные от каждого объекта, формируют в пространственно-временном поле индивидуальный паттерн, форма и положение которого однозначно определяют положение объекта в пространстве объектов. Так на рис. 5 схематически представлен паттерн (в виде фронта волны) в поле сигналов, полученный в результате отражения от объекта А. Амплитуда сигнала паттерна характеризует акустическую отражающую способность формирующего этот паттерн объекта. Поэтому массив данных пространственно-временного поля в пространстве сигналов (например, поле сигналов на рис. 6) однозначно связан с картиной расположения акустически заметных объектов в пространстве акватории.

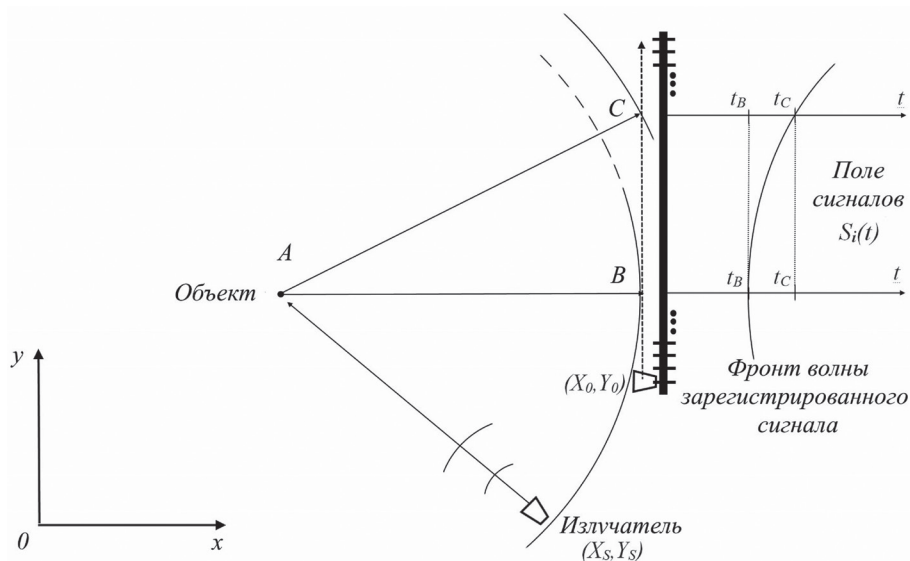


Рис. 5. Формирование пространственно-временного поля сигналов, получаемого в результате измерений ВЛАР. Буквами обозначены: (X_0, Y_0) — начальные координаты линейного перемещения приемника; t_B, t_C — времена прохождения звуковой волны от объекта (точка А) до положений приемника В и С; $S_i(t)$ — измеренный сигнал в положении приемника (X_0, Y_i) ; (X_s, Y_s) — координаты излучателя

Fig. 5. Obtaining of a spatio-temporal field of signals as a result of VLAR measurements. The letters indicate: (X_0, Y_0) — initial coordinates of the receiver linear movement; t_B, t_C — travel times of the sound wave from the object (point A) to receiver positions B and C; $S_i(t)$ — signal measured at the receiver position (X_0, Y_i) ; (X_s, Y_s) — coordinates of the emitter

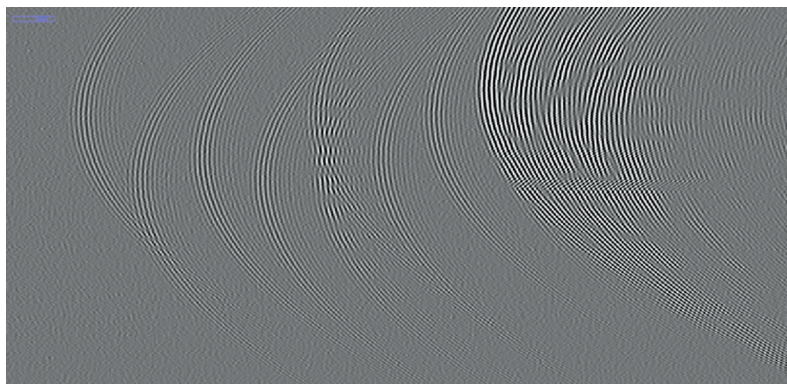


Рис. 6. Фрагмент пространственно-временного поля сигналов, полученного для поля объектов 1...10, C1, представленных в табл. 1

Fig. 6. The spatio-temporal field fragment of signals obtained for the field of objects 1...10, C1 presented in Table 1

Процесс формирования поля акустической картины акватории по данным пространственного временного поля сигналов использует фокусировку мощности всего поля сигналов в единый консолидированный сигнал посредством учета задержки времени распространения сигнала от объекта до линии ВЛАР, координаты которой заданы условиями измерений. Пример фокусировки приведен на рис. 7. Фактически это накапливающее суммирование фрагментов отраженной волны конкретного объекта из всех сигналов пространственно-временного поля с учетом фазы волнового фронта.

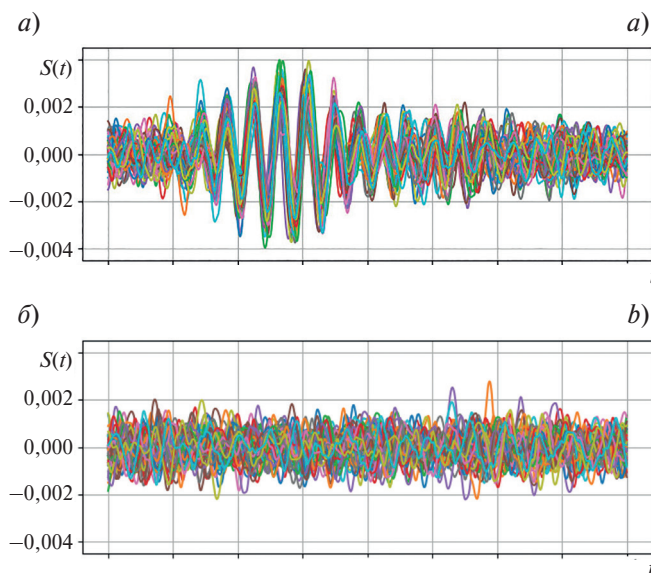


Рис. 7. Примеры фокусировки множества сигналов: *a* — для точки с присутствием объекта; *б* — для точки, в которой объект с акустической «светимостью» отсутствует

Fig. 7. Examples of focusing multiple signals: *a* — for point with the object; *b* — for point without object with acoustic reflectivity

Вычисление полной картины акустического поля происходит следующим образом. Формируется координатная сетка $M \times N$ пространства объектов, покрывающая область наблюдения. Каждый узел сетки можно интерпретировать как центр соответствующего пикселя акустической картины (размером $M \times N$ пикселей). Для каждой точки (x_m, y_n) координатной сетки делается предположение о присутствии в ней отражающего объекта. Расчет величины задержки времени прихода сигнала, отраженного от объекта в точке (x_m, y_n) , в i -й приемник ВЛАР выполняется по формуле:

$$\tau_{m,n,i} = \left(\sqrt{(x_m - X_s)^2 + (y_n - Y_s)^2} + \sqrt{(x_m - X_0)^2 + (y_n - (Y_0 + i * L / K))^2} \right) / C, \quad (2)$$

где X_s, Y_s — координаты излучателя, X_0, Y_0 — начальные координаты линейно-перемещаемого приемника, L — длина ВЛАР, K — число виртуальных приемников ВЛАР (число шагов перемещения приемника по координате Y), C — скорость звука в воде.

В результате фокусировки и синфазного суммирования фрагментов сигналов $S_i(t)$ заданной длительности T согласно полученным задержкам $\tau_{m,n,i}$ получается консолидированный сигнал $U(t, x_m, y_n)$, мощность которого $P(x_m, y_n)$ может служить характеристикой акустической «светимости» точки (x_m, y_n) пространства объектов и яркостью соответствующего пикселя акустической картины:

$$P(x_m, y_n) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N S_i(\tau_{m,n,i} + t) \right)^2. \quad (3)$$

Выполнение описанной выше процедуры для каждой точки сетки пространства объектов позволяет получить массив данных, формируемый отдельно в каждом пикселе, представимый в виде растрового изображения и характеризующий акустическую «светимость» поля объектов. Такая процедура не требует априорной информации об объектах и их расположении и позволяет получить общую картину сразу для всего поля объектов.

Дальнейшая обработка получаемого изображения производится методами цифровой обработки изображений в соответствии с задачей. В данном случае объект может быть выделен на изображении простым пороговым преобразованием и вычислением центра тяжести получаемого пятна.

4. Результаты

Экспериментальная проверка возможности восстановления акустической картины расположения множества различных по форме и размерам объектов была проведена с помощью размещения в акватории 13 объектов, установленных на разном расстоянии друг от друга согласно таблице. Результат вычисления карты акустической «светимости», полученный на сетке 1 мм в пространстве объектов, показан на рис. 8.

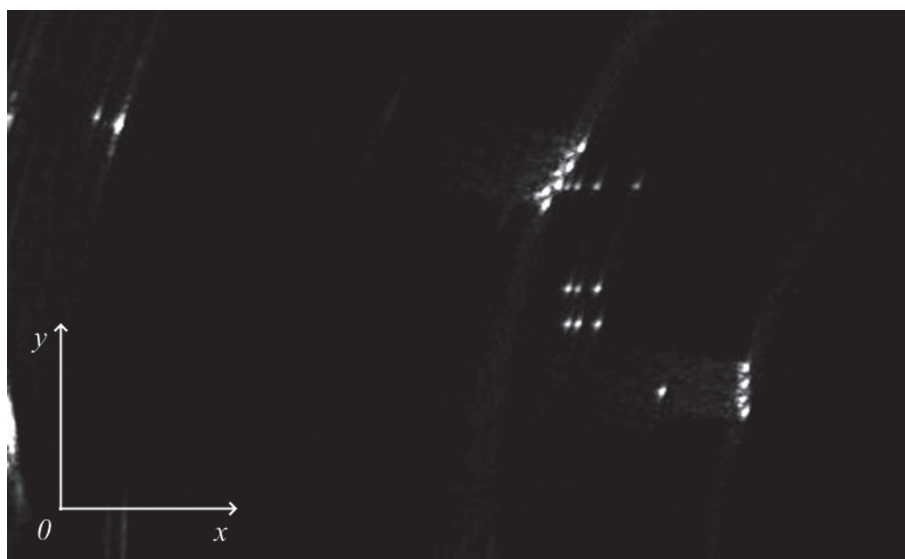


Рис. 8. Картина акустической «светимости» точек акватории, вычисленная по результатам измерения пространственно-временного поля сигналов с описанной выше расстановкой тестовых объектов

Fig. 8. The acoustic reflectivity picture of points in the water area calculated based on the results of measuring the spatio-temporal field of signals with the arrangement of test objects described above

Анализ графика яркости (рис. 9, б) изображения одиночных компактных объектов (например, № 1, № 2, № 3 и № 4 в таблице и соответственно 1, 2, 3 и 4 на рис. 9, а) показывает, что поперечник получаемого изображения объекта при указанных параметрах измерения составляет 3...5 мм, а сам объект легко обнаруживается пороговым преобразованием. Увеличенный фрагмент на рис. 9, а иллюстрирует высокое разрешение и пиксельную структуру получаемого изображения.

Наличие в поле зрения ВЛАР множества объектов порождает сложную картину измеряемого отраженного сигнала. Акустические изображения компактных объектов 1, 2, 3 и 4, расположенных в непосред-

ственной близости от значительно более крупного составного объекта С1, разрешаются в достаточной степени несмотря на значительное перекрытие паттернов. Это подтверждает график сигнала на рис. 9, б, построенный для сечения АВ. Расстояния между пиками яркости, которые соотнесены с объектами 1, 2, 3, 4, соответствуют установленным при планировании эксперимента расстояниям (10 мм, 20 мм, 40 мм). Ширина пиков составляет 3–4 пикселя (3–4 мм при цене пикселя $1 \times 1 \text{ мм}^2$).

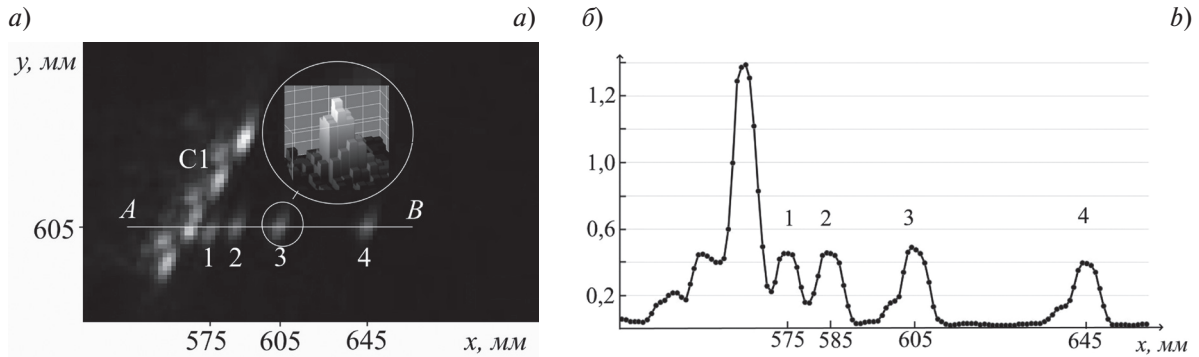


Рис. 9. Акустическая картина группы объектов (а) и график яркости по сечению АВ (б). Пики яркости, соответствующие объектам № 1, № 2, № 3 и № 4 расположены на расстояниях 10, 20 и 40 мм друг от друга соответственно

Fig. 9. The acoustic picture of a group of objects (a) and brightness graph along AB (b). Brightness peaks corresponding to objects No. 1, No. 2, No. 3 and No. 4 are located at distances of 10, 20 and 40 mm from each other, respectively

Кроме того, внимательный анализ полученного акустического изображения составного (многобликового) объекта показывает хорошую коррелированность акустического изображения с формой объекта, что иллюстрируется рис. 10, где показан фрагмент акустической картины, фото объекта и наложение контура объекта на его акустическое изображение.

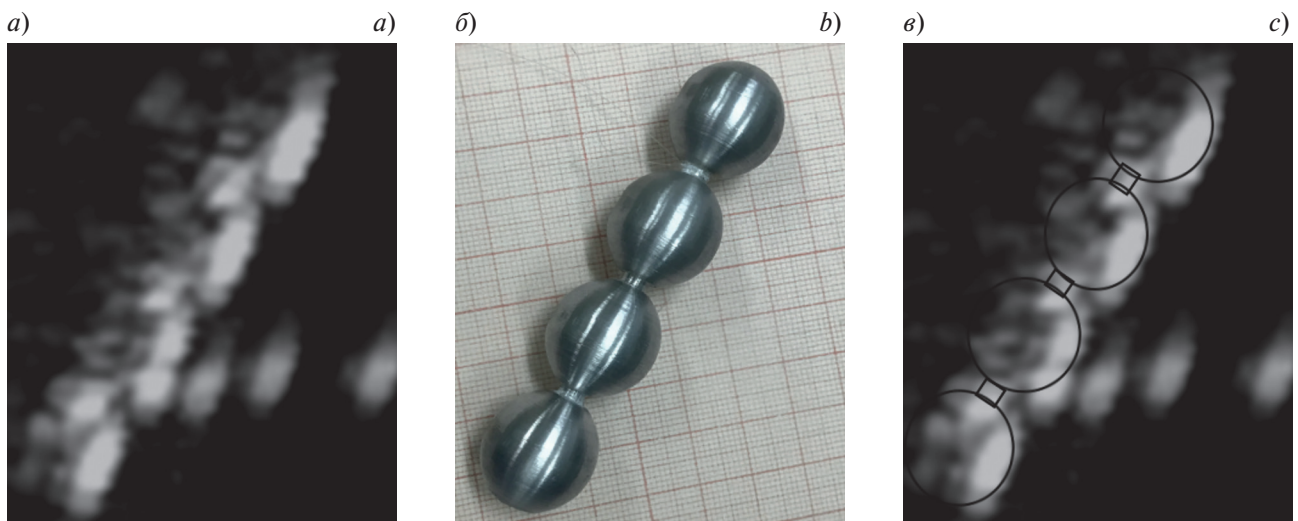


Рис. 10. Иллюстрация возможности реконструкции формы составного объекта С1 по его акустическому изображению: а — акустическое изображение объекта; б — фото объекта; в — наложение контура объекта на акустическое изображение

Fig. 10. Illustration of the possibility of reconstructing the composite object C1 shape based on its acoustic picture: a — acoustic picture of the object; b — photo of the object; c — overlay of the object's outline on the acoustic picture

Для экспериментальной оценки эффективности процедуры накопления сигнала, амплитуда зондирующего сигнала была уменьшена до такой величины, при которой переотраженный тест-объектами сигнал становился визуально не заметен на уровне шумов и помех, после чего производилось измерение и регистрация пространственно-временного поля. На рис. 11, а, б показаны фрагменты пространственно-времен-

ных полей сигналов для объектов различной отражающей способности. Визуальный анализ не позволяет выявить индивидуальный паттерн для объекта на рис. 11, б. Однако в результате вычислительной процедуры с накапливанием фрагментов сигналов, взятых с вычисленными задержками, данный объект отчетливо идентифицируется на карте акустической «светимости», что показано на рис. 11, в, г. Таким образом, проведенное исследование также подтвердило эффективность накопления фрагментов отраженного из каждой конкретной точки пространства акватории сигнала по всему пространственно-временному полю сигнала с целью концентрации силы отклика и отделения этого сигнала от шумов и сигналов из других точек акватории. Анализ яркости точек пространства, где располагались тест-объекты, подтверждает возможность значительного снижения влияния шумов и помех на возможность анализа акустической картины.

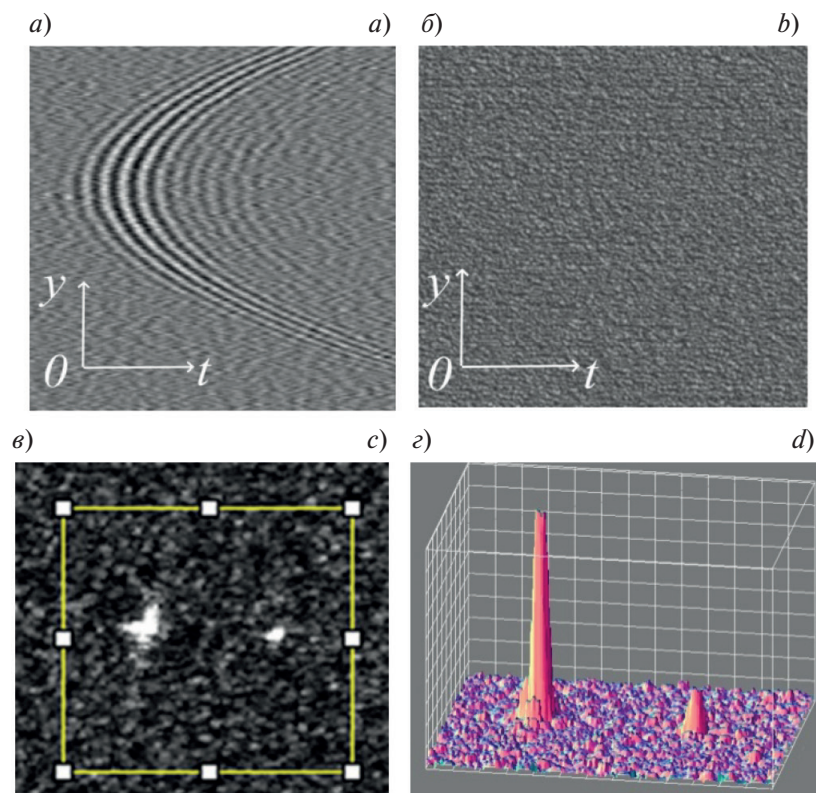


Рис. 11. Пространственно-временное поле двух рядом расположенных одиночных объектов различной отражающей способности на фоне шумов и помех (а), б); фрагмент вычисленной картины акустической «светимости» (в) и 3D график «светимости» для этого фрагмента (г)

Fig. 11. Spatio-temporal field of two nearby single objects of different reflectivity against a background of noise and interference (a), б); fragment of the calculated acoustic reflectivity picture (c) and 3D brightness graph for this fragment (d)

5. Заключение

Экспериментально исследован метод получения акустической картины подводной обстановки в опытном бассейне по результатам измерения пространственно-временного поля переотраженных от тестового множества объектов гидроакустических сигналов с использованием ВЛАР.

Суть метода — последовательная проверка гипотез об акустической «светимости» всех точек анализируемого подводного пространства независимо от наличия в этой точке отражающего объекта. Общая картина складывается как результат анализа акустических «светимостей» всех точек анализируемой подводной акватории. Таким образом, формируется не перечень отражающих объектов, а изображение акустической картины всего анализируемого пространства. Такой подход позволяет анализировать подводную акваторию в зоне Френеля ВЛАР с практически неограниченным количеством присутствующих в зоне контроля объектов.

Проведенные в опытовом бассейне измерения подтвердили высокую пространственную разрешающую способность метода, а также продемонстрировали возможность пространственной реконструкции формы составных подводных объектов.

Кроме того, показан потенциал накопления содержательной информационной составляющей по всему регистрируемому пространственно-временному полю, что делает перспективным увеличение числа приемников ЛАР для выделения слабоотражающих объектов на фоне помех.

Результаты исследования планируется использовать в процессе создания гидроакустической системы подводного видения.

Литература

1. Криницкий С.А., Лопатиев О.А., Охрименко С.Н., Паришуков В.Н., Рубанов И.Л. Сетевая система освещения подводной обстановки // Морской сборник. 2021. Т. 2096, № 11. С. 71–77. EDN XXXQAG
2. Сергеев В.В., Карпов В.Н., Прибылов Ю.С., Пшеничная О.К., Соколов В.А. Современные технологии подводного видения. Адаптивная система фото и видео регистрации для автономных необитаемых подводных аппаратов // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2020. Т. 104, № 8. С. 40–45. EDN VGGGXU
3. Лекомцев В.М. Гидроакустические средства визуализации для необитаемых подводных аппаратов // Современные технологии автоматизации. 2013. № 3. С. 78–82.
4. Колосков Е.Н., Корнипаев Б.А. Способы сбора данных обратного рассеивания морского дна, реализованные в современных многолучевых эхолотах // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2016. Т. 40, № 6. С. 96–105. EDN XHLRKV
5. Коваленко В.В., Корчак В.Ю., Хилько А.И., Чулков В.Л. Требования к сетевым системам подводного наблюдения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 2. С. 22–26. EDN TAQWGB
6. Машошин А.И., Шафранюк А.В. Распределенная система подводного наблюдения: Патент РФ 2713005 С1 // Б. 2020. № 4.
7. Шейнман Е.Л., Бобриков И. Распознавание обнаружения одиночного объекта в режиме пеленгования при использовании линейной антенны // Гидроакустика. 2024. Т. 4, № 60. С. 41–54. EDN KYFHGK
8. Гампер Л.Е., Ермоленко А.С., Манов К.В. Способ пассивного определения координат источников излучения. Патент РФ 2507531 // Б. 2014 № 5. EDN WTYCYL
9. Иванов С.С., Лободин И.Е., Новиков Н.А., Пичугин В.А. Способ определения координат шумящих морских объектов. Патент РФ 2810106 // Б. 2023. № 36. EDN QBCAQF
10. Консон А.Д., Волкова А.А. Метод локализации источника широкополосного шумового сигнала горизонтальной линейной антенной в зоне Френеля вблизи границы «вода-воздух» // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 1. С. 84–94. EDN REYIKX. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(1\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(1)-7)
11. Гампер Л.Е. Пассивная гидролокация источников шумоизлучения с использованием бортовых протяженных фокусирующих приемных систем // Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, 2018. С. 40–42. EDN UZYKWI
12. Драченко В.Н., Кузнецов Г.Н., Михнюк А.Н. Оценка координат широкополосного источника звука в океане комбинированным методом с использованием углов скольжения и интерференционной структуры на апертуре антенны // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 2. С. 96–110. EDN LFMQOJ. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-7)
13. Липанов А.М., Альес М.Ю., Милич В.Н., Широков В.А. Комплекс для исследования и разработки компонентов системы мониторинга подводной акватории // Труды XXV Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. М.: ГУ РАРАН, 2022. С. 253–258. EDN BAQEQD
14. Широков В.А., Милич В.Н. Экспериментальный комплекс для исследования возможностей использования гидроакустических датчиков в системах подводного видения // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 4. С. 54–64. EDN TLBSSJ. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-4-54-64>
15. Баженова А.И., Милич В.Н., Широков В.А. Увеличение точности определения местоположения подводных объектов в задаче пеленгации с ультракороткой базой // Приборы и методы измерений. 2025. Т. 16, № 3. С. 254–264. EDN GVOSHO. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2025-16-3-254-264>

References

1. Krinitski SA, Lopatyev OA, Ohrimenko SN, Parshukov VN, Rubanov IL. Network-centric underwater lighting system. *Marine Collection*. 2021;11(2096):71–77. (In Russ)

2. Sergeev VV, Karpov VN, Pribylov YS, Pshenichnaya OK, Sokolov VA. Modern underwater vision technologies. Adaptive photo and video recording system for autonomous unmanned underwater vehicles. *Business Magazine Neftegaz.RU*. 2020;8(104):40–45. (In Russ)
3. Lekomtsev VM. Hydroacoustic visualization tools for unmanned underwater vehicles. *Modern Automation Technologies*. 2013;(3):78–82. (In Russ)
4. Koloskov EN, Kornipaeв BA. Data backscatter seabed image in modern multibeam echo sounders. *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. 2016;6(40):96–105. (In Russ)
5. Kovalenko VV, Korchak VY, Khilko AI, Chulkov VL. Requirements for network-centric underwater surveillance systems. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2014;7(2):22–26. Available from: <https://hydrophysics.spbrc.ru/jour/article/view/976> (In Russ)
6. Mashoshin AI, Shafranyuk AV. Distributed underwater surveillance system: Patent 2713005 C1 RF. 2020;(4). (In Russ)
7. Sheinman EL, Bobrikov I. Recognition of single object detection in direction finding mode using a linear antenna. *Hydroacoustics*. 2024;60(4):41–54. (In Russ)
8. Gamper LE, Ermoolenko AS, Manov KV. Method for passive determination of coordinates of radiation sources: Patent 2507531 RF. 2014;(5). (In Russ)
9. Ivanov SS, Lobodin IE, Novikov NA, Pichugin VA. Method for determining the coordinates of noisy marine objects: Patent 2810106 RF. 2023;(36). (In Russ)
10. Konson AD, Volkova AA. Broadband noise signal source positioning method using flat linear antenna in Fresnel zone near ‘water-air’ boundary. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(1):84–94. (In Russ). [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(1\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(1)-7)
11. Gamper LE. Passive sonar detection of noise emission sources using onboard extended focusing receiving systems. In: *Proceedings of the XIV All-Russian Conference “Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics”*. St. Petersburg: St. Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2018. p. 40–42. (In Russ)
12. Drachenko VN, Kuznetsov GN, Mikhnyuk AN. Estimation of coordinates of a broadband sound source in the ocean by a combined method using grazing angles and interference structure at the antenna aperture. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(2):96–110. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-7)
13. Lipanov AM, Alies MY, Milich VN, Shirokov VA. Complex for research and development of components of an underwater monitoring system. In: *Proceedings of the XXV All-Russian Scientific and Practical Conference of the Russian Academy of Rocket and Missile Sciences*. Moscow: LLC “GU RARAN”; 2022. p. 253–258. (In Russ)
14. Shirokov VA, Milich VN. Experimental complex for studying the possibilities of using hydroacoustic sensors in underwater vision systems. *Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov*. 2021;4(24):54–64. (In Russ). <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-4-54-64>
15. Bazhenova AI, Milich VN, Shirokov VA. Improving the accuracy of underwater object location determination in the ultra-short baseline direction finding task. *Devices and Methods of Measurements*. 2025;16(3):254–264. (In Russ). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2025-16-3-254-264>

Об авторах

ШИРОКОВ Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, ORCID: 0000-0002-1429-3057, WoS ResearcherID: R-2922-2018, SPIN-код (РИНЦ): 9007-5928, e-mail: shirokovva@udman.ru

БАЖЕНОВА Айгуль Илсуровна, кандидат технических наук, научный сотрудник, ФГБУН Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, ORCID: 0000-0001-8618-5285, Scopus Author ID: 57218900513, WoS ResearcherID: N-3690-2017, SPIN-код (РИНЦ): 5641-9184, e-mail: aigul_bazh@udman.ru

МИЛИЧ Владимир Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, ORCID: 0000-0002-6038-6668, Scopus AuthorID: 6507247301, WoS ResearcherID: G-3269-2016, SPIN-код (РИНЦ): 5612-2634, e-mail: mili@udman.ru