

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-254-264

Увеличение точности определения местоположения подводных объектов в задаче пеленгации с ультракороткой базой

А.И. Баженова, В.Н. Милич, В.А. Широков

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 27.03.2025

Принята к печати 09.07.2025

Средства регистрации состояния подводной обстановки востребованы при охране защитных зон акваторий, обслуживании механизмов разработки подводных месторождений и мониторинге состояния морских сооружений. В статье рассматривается решение вопроса повышения точности пеленгации подводного объекта посредством введения метки времени и дополнительной модификации измерительной схемы в условиях обнаружения подводных объектов с использованием гидроакустической подсветки. При наличии нескольких излучателей гидроакустической подсветки возникает возможность создания многоракурсной системы подводного видения, которая позволяет установить не только точное пространственное положение подводных объектов анализируемой акватории, но и характеристики размеров и формы этих объектов. Ключевой задачей при этом является задача синхронизации регистрации сигналов, отражённых объектами от разных излучателей. В работе описан подход к уменьшению ошибки пеленгации объектов, вызванной погрешностями оцифровки сигнала датчика, использующий врезку в сигнал специальной метки времени, виртуальное дробление периода (интервала) дискретизации и более точную синхронизацию старта генерации зондирующего сигнала и моментов оцифровки сигнала датчика. Приведены результаты экспериментальной проверки описываемого подхода на примере пеленгации подводного объекта с использованием стереодатчиков, ориентированных в горизонтальной и вертикальной плоскостях, с многократным повторением измерений. Показано, что в результате применения предлагаемого подхода точность определения пеленга для приведённого в статье примера увеличилась более чем в 8 раз.

Ключевые слова: гидроакустическая подсветка, пеленгация, опорный сигнал, исследовательский гидроакустический комплекс, подводное видение

Адрес для переписки:

Широков В.А.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН

ул. Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

e-mail: ashirokovva@udman.ru

Address for correspondence:

Shirokov V.A.

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

e-mail: shirokovva@udman.ru

Для цитирования:

А.И. Баженова, В.Н. Милич, В.А. Широков.

Увеличение точности определения местоположения подводных объектов в задаче пеленгации с ультракороткой базой.

Приборы и методы измерений.

2025. Т. 16. № 3. С. 254–264.

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-254-264

For citation:

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.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-254-264

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-254-264

Improving the Accuracy of Underwater Object Location Determination in the Ultra-Short Baseline Direction Finding Task

A.I. Bazhenova, V.N. Milich, V.A. Shirokov

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

Received 27.03.2025

Accepted for publication 09.07.2025

Abstract

Software and hardware systems for recording the underwater environment are necessary for observing the protective zones of water areas, servicing the mechanisms for developing underwater deposits and monitoring the state of offshore structures. The problem of increasing the accuracy of underwater object direction finding in conditions of underwater object detection using hydroacoustic illumination is considered in the article. For solution this problem introducing a time mark and additional modification of the measuring circuit are used. With several hydroacoustic illumination emitters it becomes possible to create a multi-angle underwater vision system that allows establishing not only the exact spatial position of underwater objects in the analyzed water area, but also the size and shape characteristics of these objects. The key task here is the task of synchronizing the registration of signals reflected by objects from different emitters. The paper describes an approach to reduce the error in the direction finding of objects caused by errors in the digitalization of the sensor signal, using the insertion of a special time mark into the signal, resampling, and more accurate synchronization of the start of the probing signal generation and the moments of digitalization of the sensor signal. The results of experimental verification of the described approach using the example of an underwater object direction finding applying stereo sensors oriented in the horizontal and vertical planes with multiple repetition of measurements are presented. It is shown that applying the proposed approach for the example given in the article increases the accuracy of direction finding by more than 8 times.

Keywords: hydroacoustic backlighting, direction finding, reference signal, research hydroacoustic complex, underwater vision

Адрес для переписки:

Широков В.А.
Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского
отделения РАН
ул. Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия
e-mail: shirokovva@udman.ru

Address for correspondence:

Shirokov V.A.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: shirokovva@udman.ru

Для цитирования:

А.И. Баженова, В.Н. Милич, В.А. Широков.
Увеличение точности определения местоположения подводных
объектов в задаче пеленгации с ультракороткой базой.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 3. С. 254–264.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-254-264

For citation:

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.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-254-264

Введение

Необходимость освоения ресурсов Мирового океана требует создания систем подводного видения, которые могут обеспечить пространственную навигацию подводных аппаратов, учитывающую расположение окружающих подводных объектов. Решение задачи обнаружения объектов в подводной акватории позволяет повысить эффективность работ при обслуживании механизмов разработки подводных месторождений полезных ископаемых и обеспечения логистики в ограниченных подводных акваториях. Ввиду высокой степени поглощения электромагнитного излучения в водной среде эффективным является использование гидроакустических сигналов.

Возможность создания системы подводного видения обеспечивается при использовании гидроакустических излучателей сигналов подсветки и гидроакустических приёмников сигналов, отражённых от объектов подводной среды [1, 2]. Для исследования характеристик аппаратуры подсветки и приёмников, а также алгоритмов обработки регистрируемых сигналов используются экспериментальные гидроакустические бассейны [3, 4]. Зондирующие сигналы излучателей подсветки позволяют по отражениям этих сигналов анализировать пространственное положение подводных объектов исследуемой акватории и свойства этих объектов. В качестве исходной информации для такого анализа может служить разница времён прихода отражённых сигналов в две разнесённые точки приёма. Поэтому достаточно широко при определении пеленга на подводный объект применяется бистатистический гидролокатор [5] или фазовый пеленгатор [6], которые используют для определения пеленга два гидроакустических приёмника. При наличии двух пар приёмников, ориентированных перпендикулярно в плоскости приёма сигналов, возникает возможность определения пространственного пеленга на объект. Таким образом, приём отражённого гидроакустического сигнала на датчики горизонтальной и вертикальной стереопар позволяет решать задачу пространственной пеленгации подводных объектов [7, 8]. Ясно, что в случае одного источника зондирующего сигнала может быть измерен фазовый сдвиг двух принятых сигналов стереопарой приёмников. Если же

информация для определения пеленга извлекается из анализа сдвига двух сигналов, полученных при разных запусках одного осветителя, или сигналов различных источников подсветки, то необходимо обеспечить синхронизацию процессов излучения этих зондирующих сигналов. То есть при наличии нескольких осветителей (генераторов сигналов) возникает вопрос синхронизации гидроакустических сигналов, который отражён в работе [9].

Обычно синхронизация времени в сложных системах достигается созданием метки времени, которая врежется в измеряемый сигнал и позволяет привязать все измеренные данные к моменту начала зондирования [10].

В настоящей работе пространственная пеленгация объекта по горизонтали и вертикали осуществляется с помощью набора стереопар – горизонтальных и вертикальных – объединённых в квадратичек. Пеленг определяется путём измерения фазового сдвига принятых датчиками стереопар сигналов от объекта. Точность измерения задержки распространения звукового сигнала от подводного объекта до приёмной площадки датчика является главным фактором, определяющим точность пеленгации. Работа выполнена с использованием исследовательского гидроакустического комплекса, описанного в работах [11, 12].

В работе рассматривается подход к уменьшению ошибки пеленгации объектов, вызванной погрешностями старта оцифровки сигнала датчика на основе врезки в сигнал специальной метки времени. Коррекция асинхронности запуска АЦП по отношению к генерации зондирующего импульса планируется достигнуть посредством сдвига массива сонограммы на величину интервала асинхронности оцифровки этого массива. Кроме того, предлагается виртуальное дробление интервала дискретизации (аналогично производимому в [8]), и синхронизация старта генерации зондирующего сигнала и моментов оцифровки сигнала датчика с учётом метки времени.

Целью настоящей работы являлась разработка и исследование эффективности решений, позволяющих повысить точность определения местоположения подводных объектов в системе подводного видения за счёт создания единой метки времени, дробления интервала дискретизации принимаемых

сигналов и согласованной обработки данных, полученных от системы гидроакустических осветителей и стереоприёмников.

Постановка задачи и метод решения

Для вычисления координат подводного объекта в трёхмерном пространстве методом пеленгации с ультракороткой базой используются две стереопары датчиков: горизонтальная – для локализации объекта в плоскости $X-Y$, и вертикальная – для локализации объекта в плоскости $X-Z$. В данной работе две горизонтальные (1-2, 3-4) и две

вертикальные (1-3, 2-4) стереопары объединены в квадрататчик (рисунок 1а), обеспечивающий возможность измерения пеленга на объект по гидроакустическим сигналам, отражённым пеленгуемым объектом и принимаемым четырьмя компланарными датчиками. Квадродатчик является частным случаем четырёх-элементной антенны диаметрально-ортогональной геометрии [7], отличающимся тем, что четыре датчика размещены компланарно в форме квадрата. Фазовая однозначность пеленгации обеспечивается методикой расчёта расстояния до объекта, приведённой в [8].

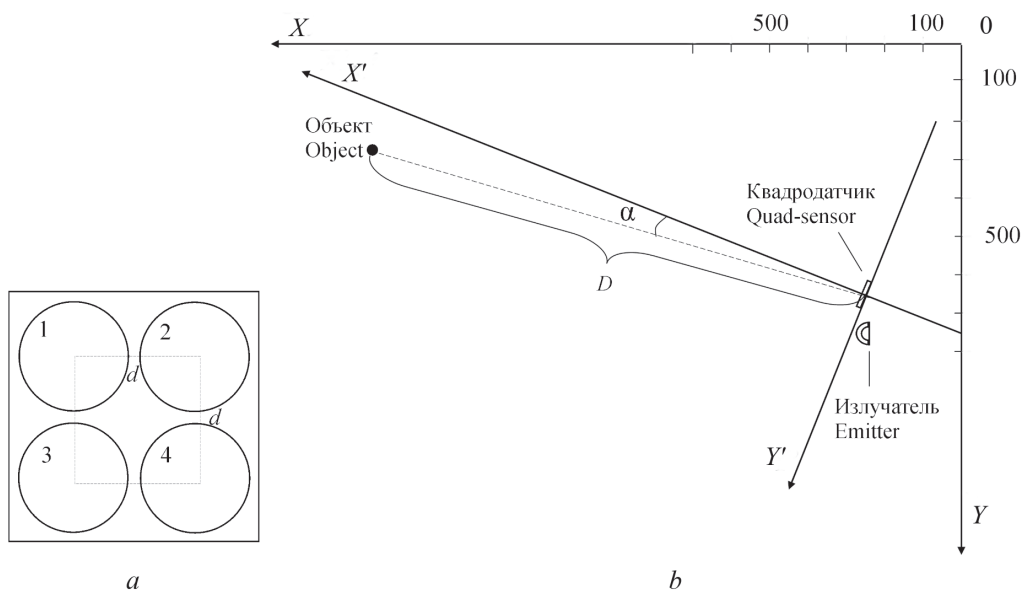


Рисунок 1 – Расположение элементов измерительной схемы в опытном бассейне: *a* – схематическое расположение приёмников квадрататчика, где *d* – база (30 мм); *b* – схема расположения квадрататчика, излучателя и объекта в плоскости $X-Y$ бассейна: $X'-Y'$ – плоскость, образованная горизонтальной парой квадрататчика и нормалью к ней; α – горизонтальный пеленг; *D* – расстояние между объектом и квадрататчиком

Figure 1 – Arrangement of the measuring circuit elements in experimental pool: *a* – schematic arrangement of the quad-sensor receivers, where *d* is the base (30 mm); *b* – schematic arrangement of the emitter, quad-sensor, and object in the $X-Y$ plane of the pool: $X'-Y'$ – plane formed by the horizontal pair of the quad-sensor receivers and the normal to it; α – horizontal bearing; *D* – distance between the object and the quad-sensor

Излучаемый объектом гидроакустический сигнал создается подачей на излучатель короткого цуга колебаний с несущей частотой 1 МГц и гауссовой огибающей:

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

где *N* – число периодов (в эксперименте $N = 8$); *F* – частота сигнала ($F = 106$ Гц); *A* – амплитуда сигнала; $\sigma = 3$ (среднеквадратичное отклонение).

Принимаемые отражённые от объекта сигналы усиливаются, оцифровываются с частотой дискретизации 10 МГц и сохраняются в памяти компьютера в виде цифрового массива для дальнейшего анализа.

Определение направления на объект относительно плоскости квадрататчика производится по разности расстояний от объекта до приёмных площадок датчиков стереопары, измеряемых по разности времени поступления на датчик отражённого от объекта гидроакустического сигнала. Расстояние *D* от

объекта до квадродатчика вычисляется по времени прохождения акустического сигнала от объекта до квадродатчика по методике, приведённой в работе [8]. Для расчёта координат объекта x' , y' , z' в системе координат квадродатчика применяются следующие формулы:

$$\begin{cases} x' = D \cdot \cos(\alpha) \\ y' = D \cdot \sin(\alpha), \\ z' = D \cdot \sin(\beta) \end{cases}$$

где D – расстояние между квадродатчиком и объектом; α – горизонтальный пеленг (рассчитывается с использованием сигналов каналов 1-2 или 3-4 квадродатчика); β – вертикальный пеленг (угол места), рассчитывается с использованием сигналов каналов 1-3 или 2-4 квадродатчика; x' , y' , z' – координаты объекта в плоскости квадродатчика (рисунок 1б).

Все исследования выполнены на исследовательском измерительном комплексе, включающем опытовый бассейн и необходимую измерительную аппаратуру [9, 10, 11].

Вычисление углов прихода сигналов, отражённых от объекта и зарегистрированных двумя датчиками одной стереопары, разнесёнными на расстояние d , при условии $d \ll D$ производится по формуле:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda \cdot F \cdot dt \cdot dT_h}{d} \right)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda \cdot F \cdot dt \cdot dT_v}{d} \right),$$

где λ – длина волны; F – частота сигнала; dt – интервал дискретизации АЦП (аналого-цифровой преобразователь); dT_h – разница времени прихода отражённого импульса сигнала (фазовый сдвиг) на разнесённые датчики горизонтальной стереопары 1-2 или 3-4 (в отсчётах); dT_v – разница времени прихода отражённого импульса сигнала на разнесённые датчики вертикальной стереопары 1-3 или 2-4 (в отсчётах); d – база стереодатчика (в представленном исследовании $\lambda = 1,5$ мм, $F = 1$ МГц, $dt = 0,1$ мкс, $d = 30$ мм).

Ключевым фактором точности определения пеленга является точность измерения величин dT_h и dT_v , характеризующих разницы времён прихода отражённого импульса сигнала (фазовый сдвиг) на разнесённые датчики горизонтальной и вертикальной стереопар. Точность измерения величин dT_h и dT_v ограничивается интервалом дискретизации АЦП – dt , равным 100 нс.

Кроме того, исследование показало, что асинхронность запуска генератора зондирующих сигналов и тактирования АЦП дискретизации сигналов квадродатчика порождает смещение реальных моментов измерения относительно запуска, что влечёт появление дополнительной ошибки (рисунок 2). Величина смещения сигналов (рассогласованность) является случайной величиной, и по величине может достигать dt – интервала дискретизации АЦП.

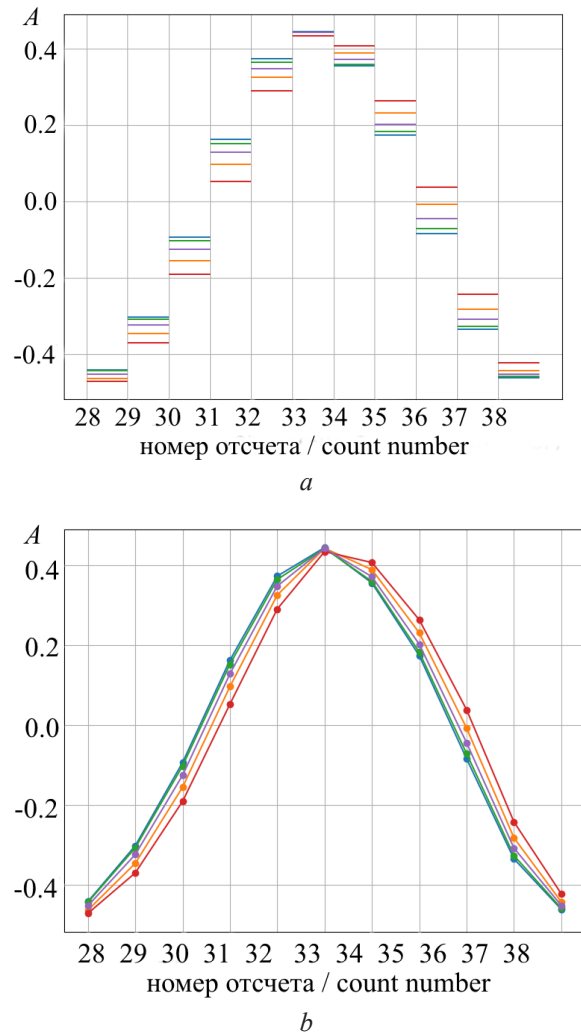


Рисунок 2 – Рассогласованность сигналов, записанных в канале № 1 квадродатчика при нескольких повторяющихся измерениях и при одинаковом положении объекта, вызванная несогласованностью работы генератора сигналов и аналого-цифрового преобразователя: *a* – расхождение по амплитуде; *b* – расхождение по времени

Figure 2 – Mismatch of signals registered by the sensor 1 of the quad sensor at the same object position for several repeated measurements caused by inconsistency in signal generator work and the analog-to-digital converter work: *a* – discrepancy in amplitude; *b* – discrepancy in time

Для уменьшения влияния указанной асинхронности выполнены две модернизации измерительного программно-аппаратного комплекса:

- реализовано введение в выходные сигналы квадродатчика опорных сигналов, содержащих метку времени;

- осуществлена передискретизация сигнала с дроблением интервала дискретизации сигнала в 10 раз.

Опорный сигнал, представляющая короткий радиоимпульс, содержащий метку времени, введён в выходные сигналы всех датчиков непосредственно перед входом АЦП. Эта метка позволяет определить величину асинхронности для её последующей коррекции путём такого сдвига элементов каждой сонограммы, при котором метка времени совмещается с ближайшей слева точкой исходного (до передискретизации) сигнала.

Передискретизация использует квазигармоничность сигнала и дробит время такта измерения АЦП (100 нс) на 10 частей по 10 нс, что даёт возможность синхронизировать массивы оцифрованных сигналов с дискретностью до 10 нс.

Таким образом, для устранения ошибки, вызванной асинхронностью генератора и тактирования АЦП, предлагается использовать метод компенсации асинхронности, включающий в себя следующие этапы:

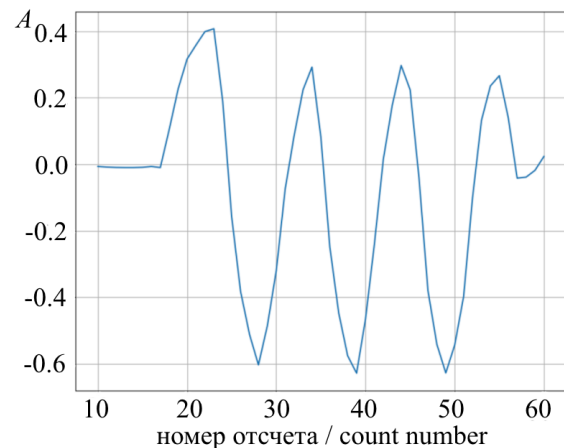
1. Предварительная обработка сигналов, включающая низкочастотную и высокочастотную фильтрации (в работе в качестве фильтра низких частот используется вычитание усреднённого за один полный период сигнала, а в качестве фильтра высоких частот – сглаживание скользящим средним с окном в половину периода), что позволяет получить более стабильный и гладкий сигнал.

2. Передискретизация сигналов с целью увеличения виртуальной частоты дискретизации (каждый интервал между исходными измерениями разбивается на 10 частей, для интерполяции используется двукратное скользящее усреднение по длительности интервала первичной дискретизации, хорошо зарекомендовавшее себя ранее [6]).

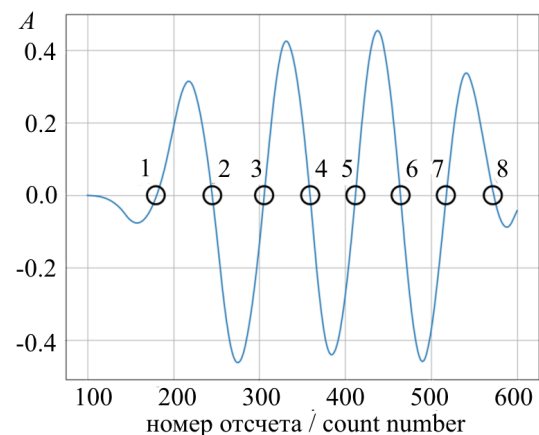
3. Выбор метки времени среди характерных точек (моменты времени первого положительного или первого отрицательного значения опорного сигнала, как показано на рисунке 3b).

4. Сдвиг всех элементов массива на величину, определяемую положением метки времени относительно ближайшей слева точки исходного (до передискретизации) сигнала.

Поиск характерных точек выполняется в результате анализа опорного сигнала. В данной работе опорный сигнал имеет вид, приведённый на рисунке 3.



a



b

Рисунок 3 – Опорный сигнал (включая метку времени): *a* – исходный вид; *b* – после предварительной обработки и передискретизации, цифрами от 1 до 8 отмечены области, в которых производится поиск характерных точек. По оси X отложен номер отсчёта сигнала до передискретизации (*a*) и после (*b*)

Figure 3 – Reference signal (with time mark): *a* – original signal; *b* – signal after preliminary processing and resampling, numbers from 1 to 8 show the areas for characteristic points searching. The X-axis shows the signal count number before resampling (*a*) and after (*b*)

На рисунке 4 приведены графики нескольких (пяти) реализаций измеренного и

преобразованного по вышеописанной процедуре (первые 2 пункта метода компенсации асинхронности) реального сигнала в увеличенном масштабе, иллюстрирующие сдвиг момента пересечения оси X каждым сигналом в точке 3 (рисунок 3б). Крестиками выделены моменты времени первого положительного значения каждого из передискретизованных сигналов – характерные точки, индицирующие величину взаимного рассогласования стартовых последовательностей тактирования генератора

сигналов и АЦП для каждого из измерений, и выбранные за метки времени этих сигналов.

Совмещение во времени выбранной характерной точки каждого сигнала с ближайшей слева точкой исходного (до передискретизации) сигнала компенсирует рассогласование стартовых последовательностей тактирования и, соответственно, уменьшает величину вызванной этим рассогласованием ошибки измерения временных интервалов до размера интервала передискретизации.

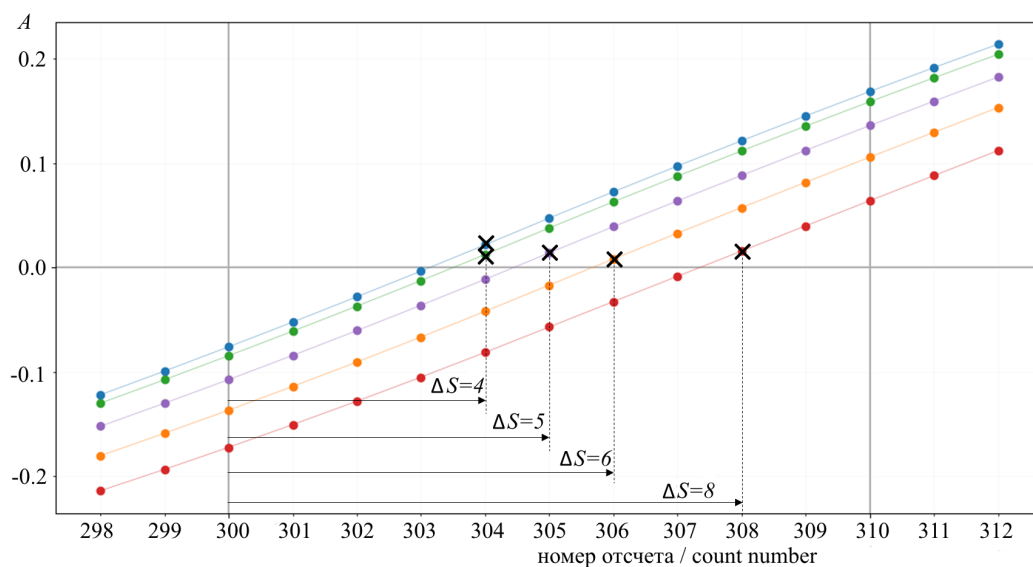


Рисунок 4 – Положение метки времени в опорном сигнале в нескольких реализациях, где Δs – сдвиг передискретизованного сигнала относительно отсчёта исходного (до передискретизации) сигнала (число 300 на горизонтальной оси)

Figure 4 – Time mark position in the reference signal for several measurements where Δs is the shift of the resampled signal relative to the sample of the original (before resampling) signal (the number 300 on the horizontal axis)

Описание экспериментальных измерений

Экспериментальная проверка эффективности описанного метода увеличения точности пеленгования проведена в опытовом бассейне [12], в котором установлен объект, источник сигналов и квадрантчик (рисунок 1). Объектом является стальной шар диаметром 40 мм, размещённый на глубине z .

Проверка проведена на серии измерений, выполненных по следующей процедуре:

- производится выполнение и запись 10 измерений для фиксированного положения объекта;
- объект линейно перемещается вдоль оси Y с шагом 1 см;

- выполняется девятикратное повторение двух предыдущих действий процедуры.

Процедура измерения включает в себя следующие этапы:

- генерация зондирующего сигнала;
- излучение сигнала;
- распространение сигнала в акватории бассейна;
- приём и усиление отражённого от объекта сигнала (сонограммы);
- врезка в выходные сигналы датчиков опорного сигнала;
- оцифровка получаемого сигнала;
- запись оцифрованного сигнала в компьютер.

Обработка включает:

- предварительная обработка оцифрованного сигнала;
- передискретизация сигнала (интерполяция с виртуальным дроблением интервала дискретизации в 10 раз);
- коррекция рассинхронизации (с использованием метки времени);
- использование преобразованного сигнала

для определения пеленга и дальнейших операций.

В результате измерений для каждого из 10 последовательных положений объекта получено по 10 файлов. Всего записано 100 файлов, в каждом из которых сохранены сигналы, поступившие на 4 приёмника квадрата, итого 400 сонограмм. Пример сигнала (сонограммы) приведён на рисунке 5.

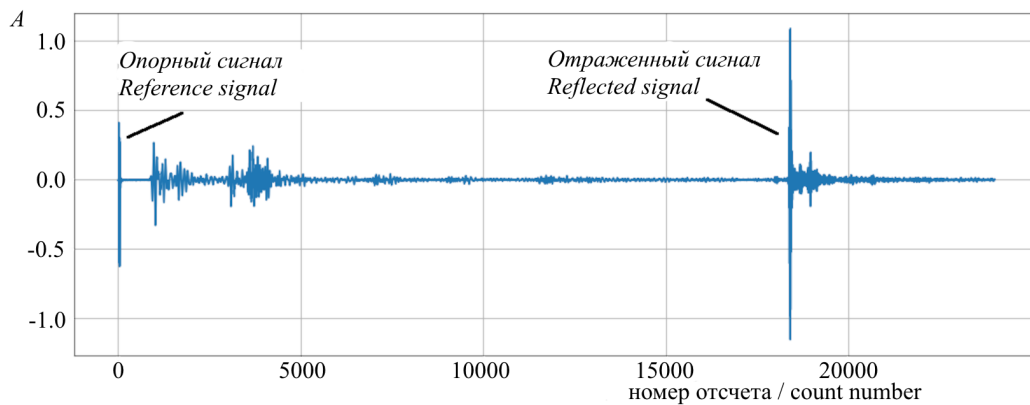


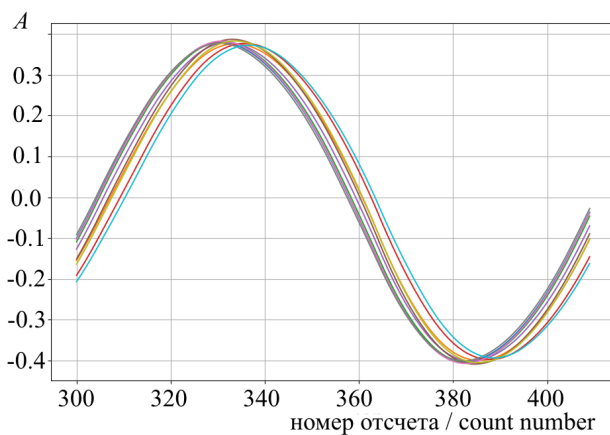
Рисунок 5 – Пример сигнала (сонограммы) одного из приёмников квадрата

Figure 5 – An example of signal (sonogram) for one of the quad-sensor receivers

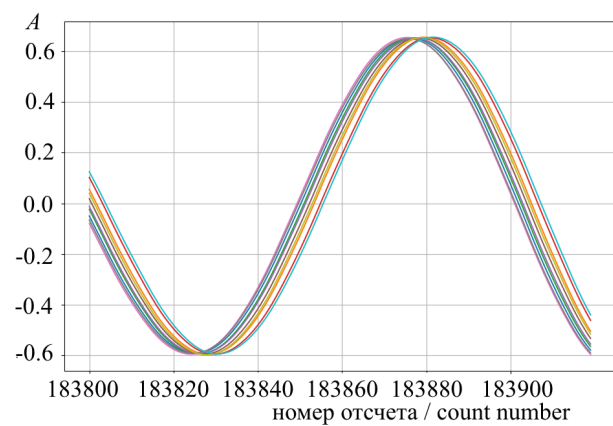
Результаты обработки экспериментальных данных предложенным методом

На рисунке 6 представлены в увеличенном виде фрагменты опорного и отражённого сигнала после предварительной обработки и

передискретизации предложенным методом. Сигналы записаны в результате 10 измерений одним и тем же датчиком при неизменном положении объекта. Отчётливо виден разброс сигнала во времени, вызванный асинхронной работой генератора зондирующих сигналов и АЦП.



a



b

Рисунок 6 – Фрагменты опорного (а) и отражённого (b) сигналов после предварительной обработки и передискретизации

Figure 6 – Fragments of the reference (a) and reflected (b) signals after pre-processing and resampling

Наилучшие результаты показало использование в качестве метки времени характерной точки № 3 на рисунке 3*b*.

В результате смещения сигналов на величину сдвига, определённого положением метки времени, получены наборы сигналов, в которых скомпенсирована ошибка, вызванная несинхронной работой генератора сигналов. Сигналы одного и того же датчика, записанные многократно при неизменном положении

объекта, после проведения процедуры компенсации становятся практически совпадающими (рисунок 7) с точностью до интервала дискретизации, что свидетельствует о результативности предложенного подхода. Сигналы, которые прошли полный цикл описанных процедур (предварительная обработка, передискретизация, смещение), в дальнейшем используются для расчёта координат подводного объекта методом фазовой пеленгации.

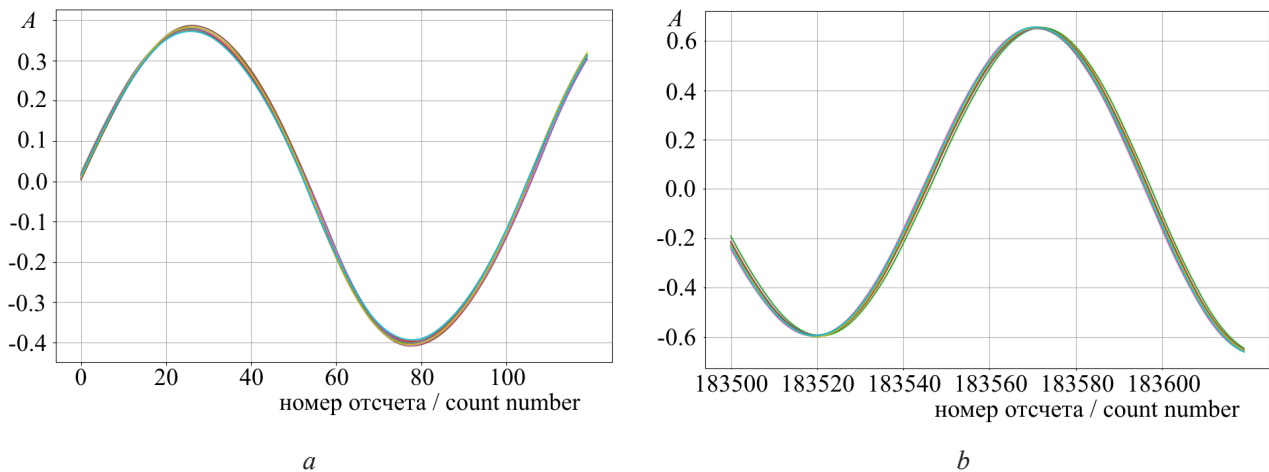


Рисунок 7 – Фрагменты опорного (*a*) и отражённого (*b*) сигналов после процедуры компенсации асинхронности
Figure 7 – Fragments of the reference (*a*) and reflected (*b*) signals after using the asynchrony compensation procedure

На рисунке 8*a* представлены значения горизонтального пеленга, полученные для 50 первых измерений по сигналам без

использования предложенного метода компенсации ошибки и после его применения (рисунок 8*b*).

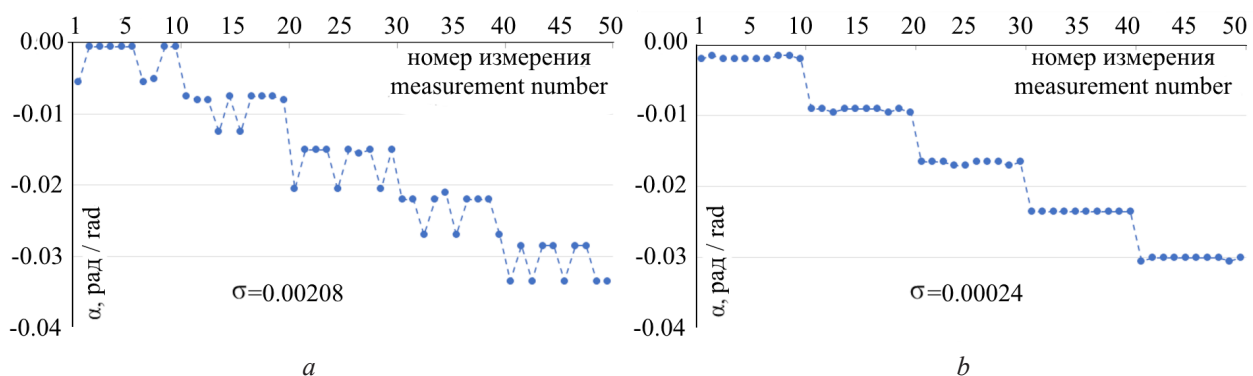


Рисунок 8 – Рассчитанные значения пеленга для первых 50 экспериментальных измерений при первых 5 положениях подводного объекта без применения компенсации (*a*) и после применения метода компенсации асинхронности (*b*)

Figure 8 – Calculated bearing values for the first 50 experimental measurements at the first 5 positions of the underwater object without using asynchrony compensation (*a*) and after applying asynchrony compensation (*b*)

Эксперимент подтвердил, что значения пеленга, рассчитанные после применения метода компенсации, значительно более стабильны, корректны и точнее отражают характер перемещения объекта: ступенчатое уменьшение горизонтального пеленга при линейном перемещении объекта вдоль оси Y опытового бассейна и постоянное значение вертикального пеленга (угла места) при отсутствии перемещения объекта по глубине.

Таким образом, метод компенсации ошибки, вызванной асинхронностью срабатывания генератора зондирующих сигналов, значительно увеличивает точность пеленгации объекта, что отражено на рисунке 8. Сопоставление значений пеленга до и после обработки демонстрирует корректность и эффективность предложенного метода. Проведённая корректировка позволяет получить более точные значения пеленга на объект и, следовательно, более точные координаты подводного объекта. Экспериментально подтверждено улучшение точности измерения пеленга более, чем в 8 раз.

Заключение

Исследован вопрос повышения точности гидроакустической пеленгации объектов в схеме с ультракороткой базой с применением стереопар датчиков. Показано, что отсутствие жёсткой связи тактирования генератора зондирующего сигнала и схемы дискретизации сигнала может вносить погрешность измерения мгновенной величины сигнала, что влечёт уменьшение точности определения времён задержки распространения зондирующих импульсов.

Для устранения влияния этого фактора на точность пеленгации в исследовательском комплексе разработаны и реализованы:

- единая система синхронизации времени измерений по пространству комплекса, которая обеспечивается врезкой специальной метки времени в измеряемый сигнал, привязывающая все измеренные и оцифрованные сонограммы к моменту излучения зондирующего импульса;

- процедура определения величины интервала асинхронности запуска аналого-цифрового преобразователя по отношению к генерации каждого зондирующего импульса с помощью метки времени;

- коррекция асинхронности запуска аналого-цифрового преобразователя по отношению к генерации зондирующего импульса посредством сдвига массива сонограммы на величину интервала асинхронности оцифровки этого массива;

- дробление интервала дискретизации сонограммы по времени с интерполяцией сигнала в промежутке между исходными дискретными значениями сонограммы.

Реализация перечисленных процедур позволила многократно увеличить точность пеленгации тестового подводного объекта, что подтверждается результатами приведённых в статье экспериментальных измерений.

Список использованных источников

1. Коваленко В.В. Требования к сетевым системам подводного наблюдения / В.В. Коваленко [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2014. – Т. 7. – № 2. – С. 22–26.

2. Кулаков А.Х. Повышение эффективности гидроакустического комплекса надводного корабля на основе использования мультистатистических методов гидролокации / А.Х. Кулаков, Н.А. Макаров, В.П. Чернов // *Гидроакустика*. – 2023. – №2. – С. 20–25.

3. Родионов А.А. Гидроакустический бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук / А.А. Родионов [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2024. – Т. 17. – №4. – С. 109–121.

DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-9

4. Исаев А.Е. Эталонная база ВНИИФТРИ в области гидроакустических измерений: метрологические характеристики, функциональные возможности, новации и перспективы совершенствования эталонов / А.Е. Исаев [и др.] // *Измерительная техника*. – 2024. – Т. 73. – № 12. – С. 46–54.

DOI: 10.32446/0368-1025it.2024-12-46-54

5. Андреев М.Я. Бистатистическая система обнаружения подводной цели (бистатистический гидролокатор) / М.Я. Андреев [и др.] // *Датчики и системы*. – 2019. – Т. 233. – №2. – С. 50–56.

DOI: 10.25728/datsys.2019.2.7

6. Арсентьев В.Г. Позиционирование объектов в гидроакустической системе с ультракороткой базой / В.Г. Арсентьев, Г.И. Криволапов // *Вестник СиБУТИ*. 2018. – №4. – С. 66–75.

7. Арсентьев В.Г. Гидроакустический фазовый пеленгатор с амплитудно-модулированным навигационным сигналом / В.Г. Арсентьев,

Г.И. Криволапов // Вестник СибУТИ. 2021. – № 2. – С. 14–26. DOI: 10.55648/1998-6920-2021-15-2-14-26

8. Shirokov V.A. Features of Bearing on Underwater Object Using Phase Information of a Differential Stereo Sensor / V.A. Shirokov, A.I. Bazhenova, V.N. Milich // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2024. – V. 24. – № 2. – P. 198–206.

DOI: 10.23947/2687-1653-2024-24-2-198-206

9. Архипов С.А. Обнаружение синхросигнала гидроакустической связи с помощью энергетического алгоритма / С.А. Архипов, Г.Ю. Пуеров, Е.И. Сергеева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. – Т. 17. – № 5. – С. 890–895.

DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-890-895

10. Ваулин Ю.В. Разностно-дальномерная система навигации для обеспечения групповой работы морских робототехнических комплексов / Ю.В. Ваулин [и др.] // Подводные исследования и робототехника. – 2020. – Т. 32. – № 2. – С. 22–33.

DOI: 10.37102/24094609.2020.32.2.003

11. Широков В.А. Экспериментальный комплекс для исследования возможностей использования гидроакустических датчиков в системах подводного видения / В.А. Широков, В.Н. Милич // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. – Т. 24. – № 4. – С. 54–64.

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-4-54-64

12. Shirokov V. A set of instruments for tracking moving objects in the underwater environment / V. Shirokov, A. Bazhenova, V. Milich // AIP Conference Proceedings. 2023. – 2605. – 020026. DOI: 10.1063/5.0111555

References

1. Kovalenko VV, Korchak VY, Hil'ko AI, CHul'kov VL. Requirements for network-centric underwater surveillance systems. Fundamental and applied hydrophysics. 2014;7(2):22–26.

2. Kulakov AH, Makarov NA, CHernov VP. Improving the efficiency of a surface ship's hydroacoustic system using multistatic sonar methods. Hydroacoustics. 2023;2:20–25.

3. Rodionov AA, Nikitin DA, Filin KB, Shpilev NN, Panicheva ED. Hydroacoustic pool of the St. Petersburg branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. Fundamental and Applied

Hydrophysics, 2024;17(4):109–121.

DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-9

4. Isaev AE, Kuznecov SI, Lomovackij YA, Matveev AN. The VNIIFTRI reference base in the field of hydroacoustic measurements: metrological characteristics, functional capabilities, innovations and prospects for improving standards. Measuring equipment, 2024;73(12):46–54. DOI: 10.32446/0368-1025it.2024-12-46-54

5. Andreev MY, Ohrimenko SN, Parshukov VN, Rubanov IL, Kozlovskij SV, Illarionov AA. Bistatic underwater target detection system (bistatic sonar). Sensors and systems, 2019;233(2):50–56.

DOI: 10.25728/datsys.2019.2.7

6. Arsent'ev VG, Krivolapov GI. Positioning of objects in a hydroacoustic system with an ultra-short base. Bulletin of SibUTI, 2018;4:66–75.

7. Arsent'ev VG, Krivolapov GI. Hydroacoustic phase direction finder with amplitude-modulated navigation signal. Bulletin of SibUTI, 2021;2:14–26.

DOI: 10.55648/1998-6920-2021-15-2-14-26

8. Shirokov VA, Bazhenova AI, Milich VN. Features of Bearing on Underwater Object Using Phase Information of a Differential Stereo Sensor. Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2024;24(2):198–206. DOI: 10.23947/2687-1653-2024-24-2-198-206

9. Arhipov SA, Puero GY, Sergeeva EI. Detection of hydroacoustic communication synchronization signal using energy algorithm. Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics. 2017;17(5):890–895.

DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-890-895

10. Vaulin YV, Dubrovina FS, Shcherbatyuk AF, Shcherbatyuk DA. Difference-range navigation system for ensuring group work of marine robotic systems. Underwater research and robotics, 2020;32(2):22–33.

DOI: 10.37102/24094609.2020.32.2.003

11. 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;24(4):54–64.

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-4-54-64

12. Shirokov V, Bazhenova A, Milich V. A set of instruments for tracking moving objects in the underwater environment. AIP Conference Proceedings, 2023; 2605:020026.

DOI: 10.1063/5.0111555