

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЭХОЛОТА В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ

Александр Евгеньевич Исаев^{1✉}, Александр Михайлович Поликарпов²

^{1,2}ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия

¹isaev@vniiftri.ru[✉], SPIN-код: 6276-3724, ORCID: 0000-0002-0718-5234

²a_polycarpov@vniiftri.ru, SPIN-код: 2194-5960

Аннотация. Предложен подход к определению дальности действия эхолота в условиях заглушённого гидроакустического бассейна малых размеров. Подход основан на организации эксперимента с целью подавления отражений импульса, излучённого эхолотом, и облучения антенны эхолота импульсом, имитирующим импульс, отражённый от объекта при использовании эхолота по назначению. Звуковой импульс эхолота принимают обратимым гидрофоном и переизлучают, уменьшив по амплитуде и задержав начало излучения. Реализуемость подхода подтверждена расчётной оценкой: к моменту излучения импульса обратимым гидрофоном влияние многократных переотражений от стенок бассейна импульса, излучённого эхолотом, становится пренебрежимо малым. Преимущества предложенного подхода в сравнении с используемым на практике заключаются в следующем: уменьшается трудоёмкость эксперимента, исключаются риски воспринять реверберационную помеху как полезный импульс либо пропустить полезный импульс вследствие маскировки его помехой, обеспечивается высокая точность определения дальности действия эхолота, уменьшается риск необоснованной браковки.

Ключевые слова: эхолот, дальность действия, малоразмерный бассейн, обратимый гидрофон, отражение звука

Для цитирования: Исаев А.Е., Поликарпов А.М. Определение дальности действия эхолота в гидроакустическом бассейне малых размеров // Альманах современной метрологии. 2026. № 2 (46). С. 168–175.

VI. Acoustics

Original article

DETERMINING THE RANGE OF AN ECHO SOUNDER IN A SMALL-SIZED HYDROACOUSTIC WATER TANK

Alexander E. Isaev^{1✉}, Alexander M. Polikarpov²

^{1,2}FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹isaev@vniiftri.ru[✉], SPIN-code: 6276-3724, ORCID: 0000-0002-0718-5234

²a_polycarpov@vniiftri.ru, SPIN-code: 2194-5960

© Исаев А.Е., Поликарпов А.М., 2026

Альманах современной метрологии № 2 (46) 2026

Abstract. An approach to determining the operating range of an echo sounder in a small-sized anechoic hydroacoustic water tank is proposed. The approach is based on an experimental design that suppresses the reflections of the echo sounder's radiated pulse and irradiate the echo sounder antenna with a pulse simulating the pulse reflected from an object during use in a natural condition. The echo sounder's sound pulse is received by a reversible hydrophone and reradiated with a reduced amplitude and a delayed onset of radiation. The feasibility of this approach is confirmed by a calculated estimate: by the time the pulse is radiated by the reversible hydrophone, the influence of reflections of the echo sounder's pulse from the water tank walls on hydrophone pulse becomes negligible. The advantages of the proposed approach compared to the one used in practice are: the labor intensity of the experiment is reduced, the risks of perceiving reverberation interference as a useful pulse or missing a useful pulse due to its masking by interference are eliminated, high accuracy in determining the range of the echo sounder is ensured, and the risk of unjustified rejection is reduced.

Keywords: echo sounder, range, small-sized water tank, reversible hydrophone, sound reflection

For citation: Isaev A.E., Polikarpov A.M. Determining the range of an echo sounder in a small-sized hydroacoustic water tank. *Almanac of Modern Metrology*. 2026; 46 (2): 168–175.

А что если наоборот?
Основной вопрос при решении
хронических проблем

Введение

Эхолоты являются ключевыми гидроакустическими приборами, которые позволяют точно измерять глубину, выявлять подводные объекты, контролировать рельеф дна, обнаруживать подводные препятствия и потенциальные угрозы. Создание во ФГУП «ВНИИФТРИ» эталонной установки для измерения характеристик эхолотов предоставило отечественному производителю возможность точно контролировать параметры изделий и создавать конкурентоспособную продукцию. Дальность действия — одна из основных характеристик, которую подтверждают в результате поверки эхолота в контролируемых условиях лабораторного гидроакустического бассейна.

Определение дальности действия эхолота

Дальность действия эхолота многократно превышает размеры лабораторного бассейна, что вынуждает при поверке (калибровке) эхолота применять специальные способы измерений. Так, например, в основу методики определения дальности действия эхолота, применяемой в эталонной установке ВНИИФТРИ, положен способ определения дальности действия гидролокаторов в условиях малоразмерного бассейна [1].

Способ заключается в организации в бассейне малых размеров эксперимента с целью приёма антенной эхолота последовательности импульсов, представляющей собой многократные отражения импульса, излучённого эхолотом. Для этого на вертикальную стенку бассейна устанавливают приёмо-излучающую антенну эхолота, противоположную стенку закрывают отражателем звука — стальной пластиной большой толщины с близким к единице коэффициентом отражения. Антенну эхолота ориентируют опорным направлением на отражатель. Измеряют расстояние между антенной эхолота и отражателем звука. Задают значения коэффициентов ослабления звука при распространении в водных средах бассейна и акватории при использовании эхолота по назначению, коэффициента отражения звука от стальной пластины, коэффициентов отражения звука от антенны эхолота и от объекта, облучаемого эхолотом при его использовании по назначению. Рассчитывают пороговое значение для амплитуды регистрируемых эхолотом отражённых импульсов. Антенной эхолота излучают импульс, который распространяется в прямом и обратном направлениях, отражаясь от стальной пластины и антенны эхолота, и регистрируют последовательность импульсов, каждый из которых пробегает расстояние, кратное удвоенному расстоянию между антенной и стальной пластиной. Дальность действия эхолота принимают равной дальности, заявленной производителем, если амплитуда регистрируемого эхолотом импульса, пробежавшего расстояние, не меньшее заявленной дальности, превышает рассчитанное пороговое значение.

Недостатки способа:

- сложность и трудоёмкость взаимного ориентирования антенны эхолота и габаритной стальной пластины — отражателя звука;
- грубая оценка порогового значения, не учитывающая влияние отражений от боковых и торцевых стенок бассейна;
- значительные помехи из-за сопутствующей помехи — отражений от боковых поверхностей бассейна из-за отличия характеристики направленности антенны реального эхолота от идеальной игольчатой.

С увеличением номера принимаемого эхолотом импульса импульсы становятся всё менее различимыми на фоне помехи. Это приводит к рискам воспринять сопутствующую помеху как полезный импульс либо пропустить полезный импульс из-за маскировки его помехой.

Недостатки способа приводят к ошибкам в определении дальности действия эхолота, становятся причиной необоснованной его браковки.

Эксперимент в бассейне предлагается организовать с целью не получить как можно больше переотражений импульса эхолота (как в [1]), а наоборот — подавить отражения импульса, излучённого эхолотом. Дальность действия эхолота определяют по импульсу обратимого гидрофона с известными характеристиками чувствительности на приём и излучение, который переизлучает импульс эхолота, имитируя по амплитуде и времени прихода импульс, отражённый объектом при использовании эхолота по назначению.

Эксперимент выполняют в бассейне со стенками, облицованными звукопоглощающим материалом. На известном расстоянии по опорному направлению от антенны эхолота устанавливают обратимый гидрофон для приёма и переизлучения импульса эхолота. Задают значения скорости звука в водных средах бассейна и акватории при использовании эхолота по назначению. Рассчитывают ослабление по амплитуде импульса, переизлучаемого обратимым гидрофоном, и задержку по времени момента переизлучения. Звуковой импульс эхолота принимают обратимым гидрофоном и переизлучают принятый импульс, ослабив по амплитуде и задержав начало излучения.

В качестве действительной дальности действия эхолота принимают значение заявленной дальности, если эхолот регистрирует импульс обратимого гидрофона и расстояние, индицируемое эхолотом, соответствует заявленной дальности действия (рис.).

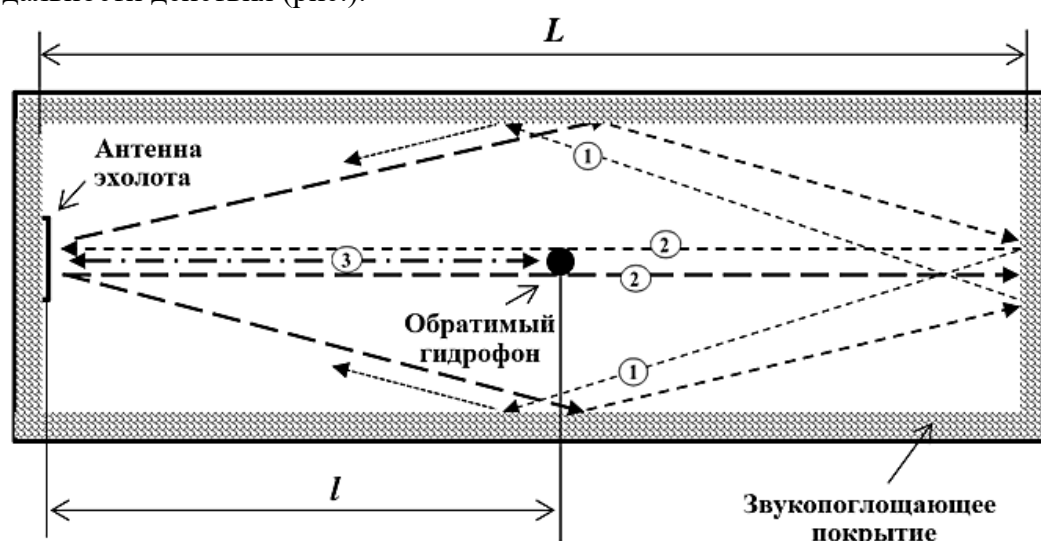


Рис. Антенна эхолота и обратимый гидрофон в бассейне со стенками из звукопоглощающего материала. Обозначения: траектории пробега звуковых импульсов 1 — отражённых боковыми стенками бассейна, 2 — распространяющихся соосно опорному направлению антенны, 3 — принятого и переизлучённого обратимым гидрофоном; L — расстояние между антенной эхолота и стенкой бассейна; l — расстояние между антенной и обратимым гидрофоном

Fig. Echo sounder antenna and reversible hydrophone in a water tank with the sound-absorbing walls. Legend: sound pulse trajectories 1 — reflected by side walls of water tank, 2 — propagating coaxially with the antenna reference direction, 3 — received and reradiated by the reversible hydrophone; L — distance between echo sounder antenna and water tank wall; l — distance between antenna and reversible hydrophone

Приведём расчёты в подтверждение применимости и реализуемости предлагаемого подхода.

Расстояние, пробегаемое импульсом эхолота при облучении объекта в условиях акватории, примем равным удвоенной заявленной дальности действия эхолота L_A . Момент приёма эхолотом импульса, отражённого объектом, задержан

относительно момента излучения импульса эхолотом на время $\tau_a = \frac{2L_A}{c_A}$,

где c_A — скорость звука в водной среде акватории. Чтобы имитировать отражённый объектом импульс по времени его прихода на антенну эхолота, момент переизлучения импульса обратимым гидрофоном должен быть задержан

относительно момента приёма импульса эхолота на время $\tau_{\Pi} = \tau_a - \frac{2l}{c_B}$, где

$\frac{2l}{c_B}$ — время пробега импульсом эхолота удвоенного расстояния между ан-

тенной эхолота и обратимым гидрофоном; c_B — скорость звука в водной среде бассейна.

Необходимое для имитации ослабление по амплитуде импульса, излучаемого обратимым гидрофоном, оценим в предположении, что обратимый гидрофон излучает импульс с амплитудой, равной амплитуде импульса при его приёме. При сделанном предположении для амплитуды U_T принимаемого эхолотом импульса обратимого гидрофона запишем:

$$U_T = U_{\text{э}} \frac{r_0}{2l} B e^{-\beta_B 2l}, \quad (1)$$

где $U_{\text{э}}$ — амплитуда импульса, излучённого эхолотом; B — коэффициент направленности антенны эхолота; β_B — коэффициент ослабления звука в водной среде бассейна на частоте заполнения импульса; $r_0 = 1$ м — множитель для соблюдения размерности.

Значение ослабления импульса по амплитуде K_T получим как отношение амплитуды U_T к амплитуде U_A импульса, отражённого объектом при использовании эхолота по назначению:

$$U_A = U_{\text{э}} \frac{r_0}{2L_A} B K_A e^{-\beta_A 2L_A}, \quad (2)$$

где β_A — коэффициент ослабления звука в водной среде акватории на частоте заполнения импульса; K_A — коэффициент отражения звука от облучаемого объекта.

Поверхность антенны обычно выполняют в виде металлической пластины, покрытой твёрдым компаундом. Для коэффициента отражения звука от таких поверхностей может быть принято значение 0,8.

Коэффициент звукопоглощения звука современными гидроакустическими абсорбционными материалами на частотах начиная с нескольких килогерц составляет от 0,6 до 0,9 (соответственно, коэффициент отражения принимает значения от 0,4 до 0,1). Коэффициент отражения K_B от стенки бассейна, покрытой звукопоглощающим материалом, примем равным 0,5.

Заявленное значение дальности действия эхолота примем равным 50 м. Расстояние L примем, как в [1], равным 3 м; расстояние между антенной эхолота и обратимым гидрофоном l примем равным 1 м. Характерная частота излучения эхолотов, работающих в шельфовой зоне моря и в пресноводных акваториях, составляет 100 кГц. На этой частоте для пресной воды бассейна β_B составляет $4,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$; β_A примем равным среднему значению коэффициента ослабления звука для морской воды — $8,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$. Средняя скорость звука в морской воде — 1480 м/с; скорость звука в пресной воде бассейна при температуре 20 °С составляет 1481 м/с.

В качестве объекта, облучаемого эхолотом при использовании по назначению, примем дно акватории, коэффициент отражения звука K_A от которого примем равным 0,1.

Малое различие скоростей звука позволяет считать скорости c_A и c_B одинаковыми и равными 1480 м/с. При заданных дальности действия эхолота и скорости звука время τ_a (время пробега импульсом эхолота расстояния, равного удвоенной дальности действия) составит $67,57 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, задержка по времени τ_n переизлучения импульса эхолота обратимым гидрофоном — $66,23 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Подставив заданные значения l , β_B , L_A , β_A , K_A в формулы (1) и (2) для ослабления по амплитуде импульса, переизлучаемого обратимым гидрофоном, получим:

$$K_T = \frac{U_T}{U_A} = 500 \frac{e^{-4,6 \cdot 10^{-4}}}{e^{-8,5 \cdot 10^{-1}}} \approx 1150.$$

Импульс обратимого гидрофона, ослабленный по амплитуде в 1150 раз в сравнении с импульсом при приёме и переизлучённый обратимым гидрофоном с задержкой по времени $66,23 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, будет эквивалентен по амплитуде и времени прихода на антенну эхолота импульсу, принимаемому эхолотом при его использовании по назначению.

Представляет интерес то, в какой степени помеха вследствие многократных переотражений импульса эхолота при его распространении в бассейне по траекториям 1 и 2 повлияет на импульс обратимого гидрофона в момент приёма импульса обратимого гидрофона эхолотом.

При одном и том же расстоянии пробега импульс, распространяющийся в бассейне по траектории 1 (см. рис.), претерпевает большее количество отражений в сравнении с импульсом, распространяющимся по траектории 2, при

этом в большей степени ослабляется по амплитуде. Импульс, распространяющийся по траектории 2, при пробеге расстояния, i -кратного расстоянию $2L$, отражается $i-1$ раз от антенны эхолота и i раз от стенки бассейна.

Для амплитуды U_i импульса, пробежавшего расстояние, i -кратное расстоянию $2L$, воспользуемся выражением:

$$U_i = U_{\text{э}} \frac{r_0}{2iL} B K_{\text{б}}^i K_{\text{э}}^{i-1} e^{-\beta_{\text{б}} 2iL}, \quad (3)$$

где $K_{\text{б}}$ — коэффициент отражения звука от стенки бассейна; $K_{\text{э}}$ — коэффициент отражения звука от антенны эхолота.

При пробеге расстояния в 100 м импульс, излучённый эхолотом в бассейне, должен отразиться не менее 17 раз от стенки бассейна и 16 раз от антенны эхолота.

Подставив принятые значения параметров в формулы (1) и (2) и оценив отношение амплитуд:

$$\frac{U_i}{U_A} = \frac{e^{-4,6 \cdot 10^{-2}} 0,5^{17} 0,8^{16}}{e^{-8,5 \cdot 10^{-1}} 0,1} \approx 5 \cdot 10^{-6},$$

получим то, что амплитуда импульса, излучённого эхолотом в бассейне с звукопоглощающими стенками, к моменту пробега им расстояния, равного удвоенной заявленной дальности действия эхолота, будет как минимум на пять порядков меньшей в сравнении с амплитудой импульса, переизлучённого обратимым гидрофоном.

По истечении времени τ_a с момента излучения импульса эхолотом амплитуда остаточной помехи в бассейне, представляющей собой отражения импульса эхолота от боковых и торцевых звукопоглощающих стенок, будет пренебрежимо мала в сравнении с амплитудой импульса обратимого гидрофона, эквивалентного по амплитуде и времени прихода импульсу, принимаемому эхолотом при его использовании по назначению. Импульс обратимого гидрофона будет принят эхолотом без искажений и зарегистрирован им при превышении амплитудой установленного в эхолоте порога значимости.

Заключение

Выполненная расчётная оценка подтверждает реализуемость предложенного подхода к оценке дальности действия эхолота в условиях малоразмерного бассейна. При оценке дальности действия по импульсу, имитирующему импульс, отражённый объектом при использовании эхолота по назначению, уменьшается трудоёмкость эксперимента (отсутствует необходимость точного взаимного ориентирования антенны эхолота и отражателя звука), повышается помехозащищённость эксперимента (исключаются риски воспринять

сопутствующую помеху как полезный импульс или пропустить полезный импульс вследствие маскировки его помехой), уменьшается риск необоснованной браковки и обеспечивается высокая точность определения дальности действия эхолота. Управление параметрами импульса, переизлучаемого обратимым гидрофоном, даёт возможность исследовать зависимость дальности действия эхолота от свойств среды и отражающей способности облучаемого объекта.

Финансирование. Авторы заявляют, что во время подготовки данной статьи не было получено никаких средств, грантов или другой поддержки.

Вклад авторов. Авторы подтверждают единоличную ответственность за концепцию и дизайн исследования, сбор данных, анализ и интерпретацию результатов, формулирование замысла/идеи исследования, целей и задач, аннотирование, очистку данных и поддержание их целостности для первоначального и повторного использования, применение статистических, математических и вычислительных методов для анализа данных исследования, а также подготовку рукописи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет потенциального конфликта интересов в связи с исследованием, представленным в данной статье.

Funding. The authors declare that no funds, grants, or other supports were received during the preparation of this article.

Contribution of the authors. The authors confirm sole responsibility for the study conception and design, data collection, analysis and interpretation of results, formulating the research concept/idea, goals and objectives, annotating, cleaning and maintaining the integrity of data for initial and repeated use, applying statistical, mathematical and computational methods to analyze the research data, and manuscript preparation.

Conflict of interests. The authors declare that they have no potential conflict of interest related to the research presented in this paper.

Список источников

1. Стефанов С.Р. Определение дальности действия гидролокаторов в условиях маломерного бассейна // Проблемы и методы гидроакустических изменений: труды. М.: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2004. № 47 (139). С. 204–210.

References

1. Stefanov S.R. Determining the range of sonars in a small-sized water tank. In: Problems and Methods of Hydroacoustic Measurements: proceedings. Moscow: FSUE “VNIIFTRI”; 2004. 47 (139): 204–210. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 12.03.2026; одобрена после рецензирования 16.04.2026; принята к публикации 20.04.2026.

The article was submitted 12.03.2026; approved after reviewing 16.04.2026; accepted for publication 20.04.2026.