

DOI.org/10.5281/zenodo.1196692  
УДК 534.88:629.052.2

А.Ю. Родионов, П.П. Унру, С.Ю. Кулик, Л.Г. Стаценко

РОДИОНОВ АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ – к.ф.-м.н., доцент кафедры,  
e-mail: deodar1618@yandex.ru

УНРУ ПЁТР ПЕТРОВИЧ – старший преподаватель, e-mail: unrupp@gmail.com

КУЛИК СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ – инженер, e-mail: kulikser@gmail.com

СТАЦЕНКО ЛЮБОВЬ ГРИГОРЬЕВНА – д.ф.-м.н., профессор, заведующая кафедрой,  
e-mail: lu-sta@mail.ru

Кафедра электроники и средств связи Инженерной школы

*Дальневосточный федеральный университет*

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

## Оценка точности измерения дистанции между подводными объектами с использованием гидроакустических модемов

**Аннотация:** Представлены результаты исследования точности измерения дистанции между подводными объектами в условиях морского подледного эксперимента. Время распространения сигнала измерялось при помощи гидроакустического модема, разработанного коллективом, в который входят авторы данной статьи. Координаты расположения гидроакустических антенн определялись с помощью спутниковой навигационной системы (СНС) DGPS. Анализируется серия измерений времени распространения сигнала между опорными точками, находящимися на разных расстояниях; выбран оптимальный режим работы для разных условий распространения.

**Ключевые слова:** гидроакустический модем, измерение дистанции, подводная навигация.

### Введение

В настоящее время для обеспечения навигации автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) наибольшее распространение получили дальномерные гидроакустические навигационные системы (ГАНС). Местоположение АНПА в таких системах определяется на основе получаемых дистанций до опорных точек – в данном случае гидроакустических маяков. Расстояние между подводными объектами рассчитывается на основе измеряемого гидроакустическим модемом времени распространения гидроакустического сигнала и известной скорости его распространения.

Точность определения местоположения АНПА при использовании дальномерных ГАНС существенным образом зависит от степени соответствия измеренных и истинных дистанций между объектами навигации. Однако вопрос статистического анализа ошибок измерений дистанции под водой средствами модемной гидроакустической связи слабо освещен в литературе [1, 4]. Чтобы оценить дальность действия гидроакустического модема, необходимо учитывать ослабление сигнала из-за неоднородностей среды, многолучевого распространения в подводных и приповерхностных звуковых каналах, а также погрешности измерения. Кроме того, возникают сложности, связанные с определением вертикального распределения скорости звука в районе проведения работ, с выявлением зон тени и неоднородностей вдоль трассы распространения сигнала. Эти сложности приводят к реальным задержкам сигнала и изменениям амплитуд отраженных сигналов.

Важно на начальном этапе достоверно определить модель гидроакустического канала и оценить скорости передачи информации.

Сложности, связанные с неоднородностью морской среды, заставляют предпринимать дополнительные действия с целью определения действительного значения эффективной скорости распространения звукового сигнала для конкретной трассы. Как правило, данная задача решается путем дополнительного измерения вертикального распределения (профиля) скорости звука в районе проведения работ. Современные аппаратные средства позволяют выполнить данные измерения с достаточно высокой точностью (до единиц см/с). Тем не менее проблемой остается возможное наличие зон локальных неоднородностей вдоль трассы распространения сигнала, вносящих в результаты измерений дополнительные погрешности.

Другим обязательным условием уменьшения ошибки измерения дистанции и, как следствие, повышения точности навигации АНПА [2, 3, 5, 6, 8] является комплексное снижение системных погрешностей в определении времени распространения навигационного сигнала. Большинство производителей оборудования для цифровой гидроакустической связи уделяют основное внимание показателям информационного обмена, не всегда предоставляя возможность измерения времени распространения сигнала.

В настоящее время научным коллективом, в который входят авторы работы, ведётся разработка оборудования гидроакустической связи и навигации (гидроакустического модема), отличительной особенностью которого является возможность измерения времени распространения навигационного сигнала. Данная функция заложена в разрабатываемый протокол обмена между модемами и является его неотъемлемой частью. Высокая точность измерения времени распространения сигнала при помощи системы модемной гидроакустической связи обеспечивается за счет использования сигналов с высокой разрешающей способностью во временной области и методов цифровой обработки сигналов, реализуемых на современной элементной базе.

Данная работа посвящена анализу точности определения дистанции при помощи гидроакустических модемов собственной разработки в натуральных условиях с целью повышения качества работы систем навигации АНПА.

### Представление морского эксперимента

Авторами данной статьи был проведен морской эксперимент, его результаты позволяют судить о точности измерения дистанций гидроакустическими средствами, а также о характере распределения соответствующих ошибок измерений. Как известно, основными техническими характеристиками гидроакустического модема являются дальность, зависящая от частоты и условий распространения сигнала (подводный, поверхностный, придонный звуковой канал, шельф, скорость передачи данных, уровень помех), скорость информационного обмена при определенном уровне вероятности ошибки и уровень энергопотребления. В модемах различных производителей используются методы сигнальной обработки, адаптированные к сложным условиям гидроакустического канала связи.

Развитие цифровых систем обработки сигналов обусловило широкое использование псевдослучайных последовательностей в системах радио- и гидроакустической навигации. Для повышения достоверности приема чаще используют последовательности значительной длины (от 127 до 1023 элементов) для обеспечения достаточного отношения сигнал–шум на выходе корреляторов. Авторами данной статьи были использованы в качестве навигационных сигналов бинарные коды длиной 28 и 51 элемент с отношением максимумов автокорреляционных функций к боковым лепесткам, равными 28/2 и 51/3 соответственно [7]. В эксперименте использовались гидроакустические модемы собственного изготовления (рис. 1) с рабочей частотой 28 кГц и полосой  $\Delta f = 8$  кГц. Сигнальная обработка выполнена на ПЛИС семейства Cyclone, что при параллельной обработке позволило пренебречь временем формирования (20 нс) ответного сигнала от опрашиваемого модема в схеме «запрос–мгновенный ответ».



**Рис. 1. Гидроакустический модем собственной разработки, использовавшийся при проведении эксперимента.**

В отсутствие переотражений погрешности позиционирования определяются текущим отношением сигнал–шум  $E_S/N_0$  на выходе коррелятора. Если аппроксимировать отклик коррелятора функцией  $\text{sinc}(t)$ , то ширина импульса по половинному напряжению составит  $\tau_{0,5} = 0,604 \cdot \tau_{chip}$ , где  $\tau_{chip} = 2/\Delta f$ . Для теоретической оценки потенциальной погрешности позиционирования временного отклика коррелятора при условии оптимального приема (фиксация положения максимума обеспечивает максимум отношения правдоподобия) можно использовать приближение  $\tau_{err} = \left( \left( 1,66/\tau_{0,5} \right) \cdot \sqrt{2E_S/N_0} \right)^{-1}$ . Так, для  $E_S/N_0 = 28/2$  потенциальная погрешность определения времени прихода сигнала для вышеописанной системы составит  $\tau_{err} = 17,2$  мкс. Учитывая скорость звука в воде ( $c = 1,5 \cdot 10^3$  м/с), потенциальная погрешность в определении расстояния составит 0,012 м.

### Описание серии морских экспериментов

Исследование проведено в формате подледного эксперимента, организованного в бухте Новик залива Петра Великого, расположенной вблизи г. Владивостока (рис. 2).

Выполнялась серия измерений времени распространения акустических сигналов между точками, находящимися на различных удалениях друг от друга. Координаты точек расположения гидроакустических антенн фиксировались с помощью высокоточного приемника системы спутникового позиционирования Trimble SPS 855, работающего в режиме кинематики реального времени (RTK) и получающего дифференциальные поправки от опорной базовой станции. Неподвижность точек расположения гидроакустических антенн обеспечивалась за счет наличия на всей площади акватории сплошного ледового покрова. Достоинством такого способа организации морского эксперимента является возможность обеспечения долгосрочного высокоточного позиционирования гидроакустических модемов и одновременного получения истинных и измеряемых дальностей. Толщина ледового покрова составляла 0,5 м, гидроакустические модемы погружались на глубину 3 м. Вертикальное распределение скорости звука в районе работ измерялось профилографом Valeport miniSVP. Значение скорости на глубине 3 м составляло 1441,5 м/с.

В рамках экспериментов измерялось время распространения сигнала («туда и обратно» по схеме «запрос–мгновенный ответ»). Суммарная длительность двух навигационных сигналов составляла 0,3836 с. Данная величина вычиталась из измеренного времени, прошедшего с момента отправки сигнала-запроса до момента получения сигнала-ответа. Координаты базовой, контрольной (измерение в ближней зоне) и удаленных точек приведены в табл. 1.



Рис. 2. Место и схема проведения эксперимента.

Таблица 1

**Координаты использованных в экспериментах опорных точек**

| Наименование пункта | Широта, град.                                       | Долгота, град.  | Координата X (север), м | Координата Y (восток), м | Дистанция до базы, м |
|---------------------|---|-----------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| База                | 43,050379867 N                                      | 131,839967867 E | 0,00                    | 0,00                     | –                    |
| Контрольная точка   | Дистанция измерена с помощью оптического дальномера |                 |                         |                          | 4,85                 |
| Точка № 1           | 43,049528967 N                                      | 131,843056733 E | -94,53                  | 251,67                   | 268,84               |
| Точка № 2           | 43,049041950 N                                      | 131,843694333 E | -148,64                 | 303,62                   | 338,05               |
| Точка № 3           | 43,048486100 N                                      | 131,844592583 E | -210,39                 | 376,80                   | 431,56               |

**Анализ полученных результатов**

Было проведено несколько серий измерений, соответствующих различным дистанциям между модемами (табл. 2). Очевидно, что среднее расстояние, рассчитанное на основе акустических измерений, находится в хорошем соответствии с ожидаемыми дистанциями (полученными на основе данных от приемников СНС).

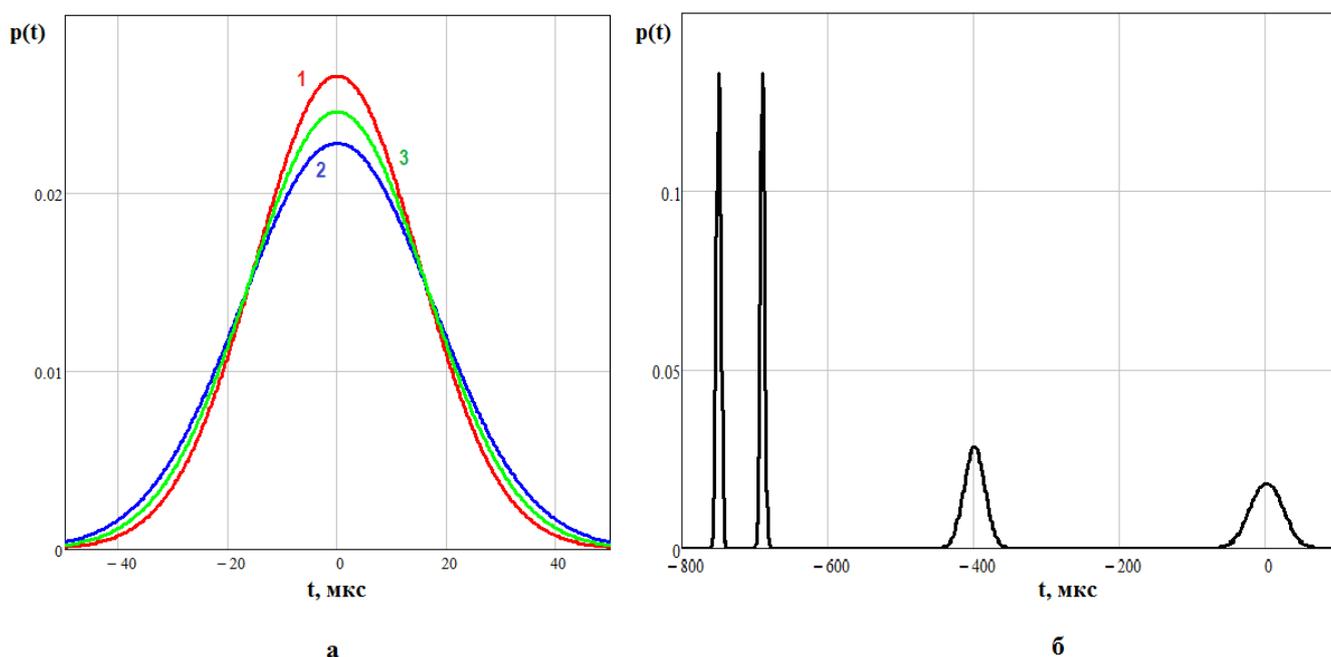
На рис. 3 приведены графики функций плотности распределения вероятностей отклонений времени от среднего значения при двустороннем распространении сигналов под водой, построенных на основании полученных в экспериментах 1–4 данных. В экспериментах 1–3 (рис. 3, а) ошибка измерения распределена по закону, близкому к нормальному, со среднеквадратичным отклонением порядка 27 мкс (эквивалентно расстоянию 1,5–2 см для скорости звука 1500 м/с).

В эксперименте 4 (рис. 3, б) наблюдается большая погрешность позиционирования (17–23 см) за счет нестабильной гидрологической ситуации на большей дистанции.

Таблица 2

**Основные характеристики проведенных экспериментов**

| Эксперимент, № | Количество измерений | Дистанция по данным СНС, м | Средняя дистанция, полученная на основе акустических измерений, м |
|----------------|----------------------|----------------------------|---|
| 1              | 733                  | 4,85                       | 4,84  |
| 2              | 336                  | 268,84                     | 269,02  |
| 3              | 237                  | 338,05                     | 338,02  |
| 4              | 179                  | 431,56                     | 432,63  |



**Рис. 3. Функции плотности распределения вероятностей отклонений времени от среднего значения при двустороннем распространении сигналов под водой.**

**Заключение**

Таким образом, результаты, полученные в рамках описанной в данной работе серии морских экспериментов, свидетельствуют о высокой потенциальной точности измерения дистанции между подводными объектами при помощи гидроакустических средств. Инструментальная точность гидроакустического модемного оборудования для дистанций до 0,5 км может составлять единицы сантиметров. Для более точной оценки местоположений передатчика и приемника основной проблемой является вычисление истинных траекторий лучей в подводном звуковом канале, а также оценка эффекта многолучевого распространения.

Авторы выражают свою признательность всем сотрудникам ИПМТ ДВО РАН и ДВФУ, принимавшим участие в подготовке и проведении морских испытаний.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Bingham B.S. Estimating system-level uncertainty for underwater navigation incorporating acoustic ranging and dead reckoning. J. of Ocean Technology. 2011(6);2.

2. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. Development of Algorithms for an Autonomous Underwater Vehicle Navigation with a Single Mobile Beacon: The Results of Simulations and Marine Trials. Proc. XXII Intern. conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS 2015), Saint Petersburg, Russia, p. 144–152.
3. Fallon M.F. et al. Cooperative AUV navigation using a single maneuvering surface craft. The International J. of Robotics Research. 2010(29);12:1461-1474.
4. Li Z., Sun D., Dosso S.E. Analytical study of acoustic ranging accuracy. Ocean Acoustics (COA), 2016 IEEE/OES China. IEEE, 2016, p. 1–4.
5. Loebis D. et al. Adaptive tuning of a Kalman filter via fuzzy logic for an intelligent AUV navigation system. Control engineering practice. 2004(12);12:1531-1539.
6. Paull L. et al. AUV navigation and localization: A review. IEEE J. of Oceanic Engineering. 2014(39);1:131-149.
7. Rodionov A.Y., Kulik S.Y., Unru P.P. Some trial results of the hydro acoustical communication system operation for AUV and ASV group control and navigation. Proc. of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conference. Monterey, 2016, September, pp. 1–8.
8. Scherbatyuk A.F., Dubrovin F.S. Some algorithms of AUV positioning based on one moving beacon. Proc. IFAC Workshop Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles, 2012, Portugal. pp. 1–6.

[THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE](#)

## Physical Fields of Ship, Ocean and Atmosphere

DOI.org/10.5281/zenodo.1196692

Rodionov A., Unru P., Kulik S., Statsenko L.

ALEKSANDR RODIONOV, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associated Professor, e-mail: deodar1618@yandex.ru  
 PETR UNRU, Senior Lecturer, e-mail: unrupp@gmail.com  
 SERGEY KULIK, Engineer, e-mail: kulikser@gmail.com  
 LYUBOV STATSENKO, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department, e-mail: lu-sta@mail.ru  
 Department of the Electronics and Communications, School of Engineering  
*Far Eastern Federal University*  
 8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

## The accuracy of measurement of the distance between underwater objects using hydroacoustic modems

**Abstract:** The article presents the results of research on the accuracy of measurement of the distance between underwater objects in conditions of under-ice sea trials. The time of signal propagation was measured using the underwater acoustic modem designed by the authors of the article. The coordinates of the underwater transducers were determined with the help of the satellite navigation system DGPS. Considered is the series of measurements of the time of signal propagation between the control points situated at different distances. Optimum performance was determined for various propagation conditions.

*Key words:* underwater acoustic modem, distance measurement, underwater navigation.

### REFERENCES

1. Bingham B.S. Estimating system-level uncertainty for underwater navigation incorporating acoustic ranging and dead reckoning. *J. of Ocean Technology*. 2011(6);2.
2. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. Development of Algorithms for an Autonomous Underwater Vehicle Navigation with a Single Mobile Beacon: The Results of Simulations and Marine Trials. Proc. XXII Intern. conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS 2015), Saint Petersburg, Russia, p. 144–152.
3. Fallon M.F. et al. Cooperative AUV navigation using a single maneuvering surface craft. *The International J. of Robotics Research*. 2010(29);12:1461–1474.
4. Li Z., Sun D., Dosso S.E. Analytical study of acoustic ranging accuracy. *Ocean Acoustics (COA)*, 2016 IEEE/OES China. IEEE, 2016, p. 1–4.
5. Loebis D. et al. Adaptive tuning of a Kalman filter via fuzzy logic for an intelligent AUV navigation system. *Control engineering practice*. 2004(12);12:1531–1539.
6. Paull L. et al. AUV navigation and localization: A review. *IEEE J. of Oceanic Engineering*. 2014(39);1:131–149.
7. Rodionov A.Y., Kulik S.Y., Unru P.P. Some trial results of the hydro acoustical communication system operation for AUV and ASV group control and navigation. Proc. of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conference. Monterey, 2016, September, pp. 1–8.
8. Scherbatyuk A.F., Dubrovin F.S. Some algorithms of AUV positioning based on one moving beacon. Proc. IFAC Workshop Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles, 2012, Portugal. pp. 1–6.