РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ISSN 1992-4429

ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА

2026

№ 3 (57)

Глубины океана ~ наша гигантская лаборатория

UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ О ПРОБЛЕМАХ ОСВОЕНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

БОБКОВ
Валерий Александрович –
д.т.н., Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

БОРЕЙКО
Алексей Анатольевич –
к.т.н., Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ГРИБОВА
Валерия Викторовна –
чл.-корр. РАН, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ДУБРОВИН
Фёдор Сергеевич –
к.т.н., Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ИЛЛАРИОНОВ
Геннадий Юрьевич –
д.т.н., Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ИНЗАРЦЕВ
Александр Вячеславович –
д.т.н., Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

КАСАТКИН
Сергей Борисович –
к.ф.-м.н., Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

КОНОПЛИН
Александр Юрьевич –
к.т.н., Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

КОСТЕНКО
Владимир Владимирович –
к.т.н., Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

МОРГУНОВ
Юрий Николаевич –
д.т.н., Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ПАВИН
Александр Михайлович –
к.т.н., Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ШАКИРОВ
Ренат Белалович –
д.г.-м.н., Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

Глубины океана – наша гигантская лаборатория

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

БЫЧКОВ
Игорь Вячеславович –
академик РАН, профессор, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

ВАСИЛЬЕВ
Станислав Николаевич –
академик РАН, профессор, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Российская Федерация

ВЕЛЬТИЩЕВ
Вадим Викторович –
д.т.н., профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация

ГОЛОВАН
Андрей Андреевич –
д.ф.-м.н., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация

ЕРМОЛОВ
Иван Леонидович –
д.т.н., профессор РАН, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Российская Федерация

КАЛЯЕВ
Игорь Анатольевич –
академик РАН, НИИ МВС ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

КЕБКАЛ
Константин Георгиевич –
д.т.н., АО "Латена", г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

КУЛЬЧИН
Юрий Николаевич –
академик РАН, Президиум ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

МАТВИЕНКО
Юрий Викторович –
д.т.н., Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ПШИХОПОВ
Вячеслав Хасанович –
д.т.н., профессор, НИИ робототехники и процессов управления ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

РОМАШКО
Роман Владимирович –
чл.-корр. РАН, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

СЕЛЕЗНЕВ
Игорь Александрович –
д.т.н., АО «Концерн «Океанприбор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

СЕРГИЕНКО
Валентин Иванович –
академик РАН, профессор, Президиум ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

СТЕПАНОВ
Олег Андреевич –
чл.-корр. РАН, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ФАРХАДОВ
Маис Паша оглы –
д.т.н., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, г. Москва, Российская Федерация

ЩЕРБАТЮК
Александр Фёдорович –
чл.-корр. РАН, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
FAR EASTERN BRANCH
Institute of Marine Technology Problems

ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА

UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS

№ 3 (57).2026

Учредители и издатели:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Дальневосточное отделение Российской академии наук»

690091, г. Владивосток,
ул. Светланская, 50
Тел.: +7 (423) 222-06-52
E-mail: dvo@hq.febras.ru
http://www.febras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

690091, г. Владивосток
ул. Суханова, 5а
Тел.: +7 (423) 243-24-16
E-mail: imtp@marine.febras.ru
http://www.imtp.febras.ru

Адрес редакции:

690091, г. Владивосток
ул. Суханова, 5а
ИПМТ ДВО РАН
Тел.: +7 (423) 243-26-74
E-mail: imtp-journal@yandex.ru

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Регистрационное свидетельство: ПИ № ФС77-77237 от 25 ноября 2019 г.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» – 36087

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук

© ДВО РАН, 2026
© ИПМТ ДВО РАН, 2026

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
О ПРОБЛЕМАХ ОСВОЕНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
ABOUT EXPLORATION OCEAN PROBLEMS

Главный редактор

ДОЛГИХ Григорий Иванович –
д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

Заместитель главного редактора

ЗЛОБИНА Надежда Владимировна –
д.т.н., Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

Зав. редакцией, ответственный секретарь

МИРОМАНОВА Ирина Витальевна –
Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

Редактор *В.С. Жердев*
Техническое редактирование *А.А. Буквецкой*
Фото на обложке *Г.Д. Елисеенко*

Дата выхода в свет 30.09.2026 г.
Формат 60x90/8. Усл. п. л. 12,0. Уч.-изд. л. 11,28. Тираж 100 экз. Заказ
Цена свободная

Издательство ООО «Дальнаука»
690106, г. Владивосток, пр. Красного Знамени, 10, каб. 20
Тел. +79242630160. E-mail: naukadv2000@mail.ru, https://dalnaukadv.ru

Отпечатано в ООО «Типография ПСП95»
690105 г. г. Владивосток, ул. Русская, 65, корпус 10

CONTENTS

SYSTEMS, TECHNOLOGIES AND EXPERIMENTS

4 **Illarionov G.Yu., Knurov M.V., Kushnerik A.A.**
Launch and recovery systems for autonomous underwater vehicles on unmanned boats

17 **Knyazkov M.M., Ostricov P.P., Semenov E.A., Sukhanov A.N.**
Research of the operation modes of the Bernulli vacuum suction cup in various environments

24 **Zlobina N.V., Kasatkin S.B.**
Experimental study of the sound field of moving sourse

33 **ShpakS.A., Boyko K.P., Kolmogorov V.S.**
Registration of modulation characteristics of sea objects' noise emission

MODELS, ALGORITHMS AND SOFTWARE

43 **Bobkov V.A., Shupikova A.A.**
Optimized underwater tracking method pipeline based on stereo images

50 **Scherbatyuk A.F.**
About method of increasing the accuracy for AUVs group positioning using acoustical navigation system with short base line

59 **Konoplin A.Yu., Yurmanov A.P., Kopylov D.V.**
Method for generating program control signals for the positioning of a vessel supporting AUV operations

SEA TECHNOLOGY FACILITY AND METHODS OF UNDERWATER RESEARCH

68 **Samchenko A.N., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Yaroshchuk I.O.**
Improving echo sounder depth accuracy using thermometric data

76 **Bezkorovainyi V.S., Kireev A.N., Miroshnichenko I.V., Dobrydnev A.V.**
Investigation of a fluxgate sensor for detection of magnetic anomalies

84 **Gorovoy S.V., Tagiltsev A.A., Sirenko V.G.**
Using a vector–scalar sensor to study the characteristics of underwater noise of a scuba diver

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

4 **Илларионов Г.Ю., Кнуров М.В., Кушнерик А.А.**
Спускоподъемные устройства автономных необитаемых подводных аппаратов на безэкипажных катерах

17 **Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н.**
Исследования режимов работы вакуумной присоски Бернулли в различных средах

24 **Злобина Н.В., Касаткин С.Б.**
Экспериментальное исследование звукового поля движущегося источника

33 **Шпак С.А., Бойко К.П., Колмогоров В.С.**
Регистрация модуляционных характеристик шумоизлучения морских объектов

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

43 **Бобков В.А., Шупикова А.А.**
Оптимизированный метод прослеживания подводного трубопровода по стереоснимкам

50 **Щербатюк А.Ф.**
О методе повышения точности позиционирования группы АНПА с использованием ГАНС КБ

59 **Коноплин А.Ю., Юрманов А.П., Копылов Д.В.**
Метод формирования программных сигналов управления для позиционирования судна, обеспечивающего работу АНПА

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

68 **Самченко А.Н., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Ярощук И.О.**
Уточнение показаний эхолота по данным термометрии при определении глубины моря

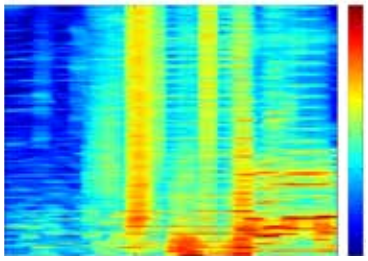
76 **Безкоровайный В.С., Киреев А.Н., Мирошниченко И.В., Добрыднев А.В.**
Исследование ферромагнитного сенсора для поиска магнитных аномалий

84 **Горовой С.В., Тагильцев А.А., Сиренко В.Г.**
Использование векторно-скалярного приемника для исследования характеристик подводных шумов легководолаза–аквалангиста

Стр. 19

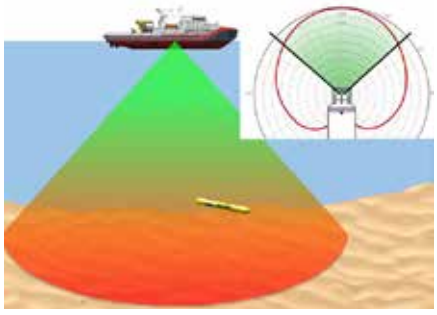
Испытания присоски Бернулли

Стр. 28



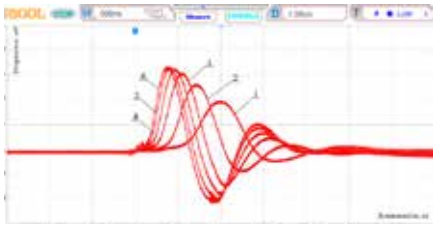
Спектрограмма звукового давления

Стр. 60



Зона действия ГАСНС УКБ

Стр. 79



Выходные сигналы феррозонд-дового сенсора

УДК 629.5.065
EDN: WKATFR
DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_01

СПУСКОПОДЪЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ НА БЕЗЭКИПАЖНЫХ КАТЕРАХ

Г.Ю. Илларионов, М.В. Кнуров, А.А. Кушнерик

В статье рассмотрены конструкция и принцип работы спускоподъемных устройств (СПУ) автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), базирующихся на безэкипажных катерах (БЭК) различного назначения. Дается описание некоторых запатентованных технических решений ИПМТ ДВО РАН в данной области. Приводятся результаты экспериментальных исследований эксплуатационных характеристик СПУ для малогабаритного АНПА, базирующегося на БЭК.

Ключевые слова: безэкипажный катер, автономный необитаемый подводный аппарат, спускоподъемное устройство, модель использования, экспериментальные исследования.

Введение

Многие типы безээкипажных катеров (БЭК) для выполнения своих задач могут оснащаться т. н. малыми формами подводной робототехники [1, 2]: малогабаритными и средними АНПА; телеуправляемыми подводными аппаратами; буксируемыми гидролокаторами бокового обзора (ГБО); различными гидрографическими и навигационными буями. Так, фирма Riptide Autonomous Solutions (США) разработала модульный, малогабаритный АНПА Micro-UUV невысокой стоимости, который может быть использован с борта БЭК [3]. Характеристики АНПА Micro-UUV (рис. 1): диаметр 124; длина 914,4 мм (в зависимости от комплектации длина аппарата может изменяться в пределах от 635 до 1829 мм); масса меняется от 5,4 до 16,3 кг; скорость хода изменяется от 1,0 до 8,0 уз; глубина погружения 200 м; автономность на скорости 2,0 уз составляет 30, 48 и 400 ч соответственно (для АНПА стандартных габаритов без полезной нагрузки). Штатное оборудование аппарата включает: системы связи (стандартную WiFi и дополнительно акустический модем); навигационные средства (СНС GPS, работающую в надводном положении, миниатюрный ИНС / магнитометр (9-DOFIMU / Magnetometer); эхолот, датчик «глубина–температура» и др.

Рис. 1. Micro-UUV фирмы Riptide Autonomous Solutions

Все малые формы подводной робототехники требуют наличия на БЭК специализированных спуско-подъемных устройств (СПУ). Например, если АНПА предназначен для совместных действий с БЭК, то его СПУ предназначено для обеспечения следующих операций:

- спуск АНПА на воду с борта БЭК для выполнения поставленных задач;
- захват АНПА, лежащего в дрейфе или движущегося с малой скоростью;
- буксировка АНПА к кораблю-носителю (при необходимости);
- подъем АНПА на борт и его фиксация на БЭК.

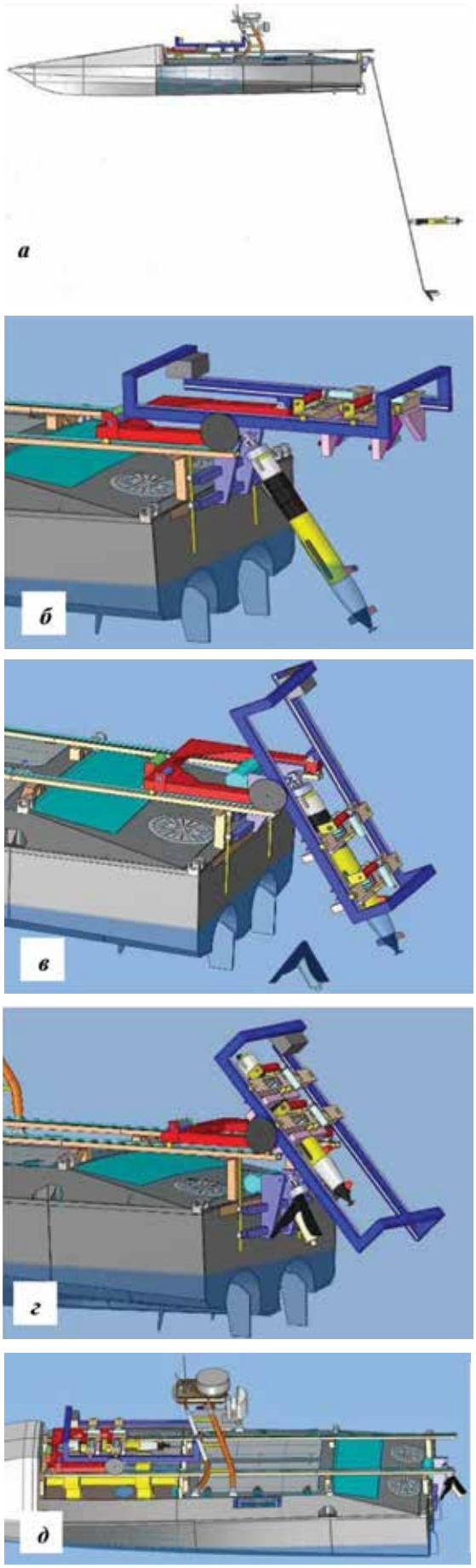
Применение АНПА с борта БЭК реализуется в соответствии со следующей моделью [4]:

- на судне-носителе осуществляется подготовка АНПА и БЭК к применению;
- БЭК с состыкованным АНПА спускается на воду с использованием судового СПУ;
- БЭК с АНПА, двигаясь с максимальной скоростью, занимает район выполнения задачи;
- отделение АНПА от БЭК (спуск на воду) осуществляется по заданной программе или по команде с корабля-носителя с использованием СПУ БЭК;
- далее, АНПА уходит на заданную глубину и приступает к выполнению программы-задания (миссии) в автономном режиме или под управлением корабля-носителя. Навигационная и информационная поддержка АНПА в районе обеспечивается гидроакустической навигационной системой (ГАНС), гидроакустической системой связи (ГАСС), а также средствами радиосвязи судна-носителя и БЭК;
- при выполнении АНПА программы-задания БЭК осуществляет совместное маневрирование с АНПА на дистанции, обеспечивающей устойчивую 2-стороннюю гидроакустическую связь с аппаратом и используется как ретранслятор команд и информации по линии связи «корабль – АНПА – корабль»;
- после завершения выполнения программы-задания АНПА сближается с БЭК на дистанцию ~ 20 м. Далее, по команде корабля-носителя СПУ БЭК готовится к приему АНПА на борт, затем АНПА стыкуется с подводной частью СПУ и поднимается на борт БЭК;
- БЭК с АНПА подходит к кораблю-носителю и поднимается на борт с использованием судового СПУ;
- на судне-носителе осуществляются обслуживание и подготовка техники для выполнения новых задач.

1. Конструкция и принцип работы спускоподъемных устройств зарубежных образцов безэкипажных катеров

В иностранных флотах уделяется большое внимание созданию конструкций СПУ для БЭК. Тема развертывания, подбора и обслуживания на борту малых АНПА, ТНПА и буев стала называться LROHSS (automated Launch, Recovery, On-board Handling, and Servicing System). В этой связи корпорация Bluefin Robotic Corp. and Brooke Ocean Technology Ltd. в 2004 г. разработала СПУ для автоматического подъема и спуска АНПА Bluefin-12 с борта БЭК (рис. 2). АНПА Bluefin-12 имеет длину 3,8 м, диаметр 0,32 м и массу порядка 270 кг. Электромеханическая конструкция СПУ БЭК занимает более половины длины катера и состоит из: наклонного лотка, уходящего под воду; подвижной каретки; П-рамы; конуса-ловителя на кронштейне; направляющих салазок; захвата-подъемника, крепящегося к мачте, и двух ложементов для АНПА. Для

Рис. 2. Схема работы СПУ компании Bluefin Robotics Corp. Ltd:
а – АНПА стыкуется с причальным конусом СПУ под водой; *б* – начало подъема АНПА из воды; *в* – завершение подъема АНПА на борт БЭК



подъема АНПА на борт БЭК (рис. 2, *а*) П-рама занимает горизонтальное положение.

При этом конус-ловитель на своем кронштейне оказывается под водой на глубине 0,5 м. АНПА приближается к БЭК под водой и наводится в конус-ловитель по сигналам гидроакустического маяка, затем нос АНПА входит в конус-ловитель и фиксируется в нем. Далее П-рама поднимается в вертикальное положение и втягивает АНПА на каретку (рис. 2, *б*). Далее АНПА фиксируется на каретке, а конус-ловитель освобождает нос АНПА от зацепления (рис. 2, *в*). АНПА принимает горизонтальное положение и движется по салазкам вперед на каретке до упора. Захват-подъемник перемещает АНПА на ложементы левого или правого борта, где к нему подключаются соответствующие разъемы [5, 6].

Другой вариант электромеханической конструкции СПУ для обслуживания уже пяти АНПА типа REMUS работает следующим образом (рис. 3). БЭК буксирует гидроакустический маяк на тросе с заглубителем, АНПА автоматически приводится к тросу и цепляется своим замком за трос (рис. 3, *а*). Трос выбирается лебедкой до стыковки со своим фиксатором (рис. 3, *б*). Большая каретка на направляющих салазках сдвинута в корму до предела, поворотная рама на большой каретке занимает горизонтальное положение, а малая каретка с фиксаторами (на поворотной раме) сдвинута к корме. Далее поворотная рама на большой каретке наклоняется, и АНПА крепится к ней при помощи фиксаторов, расположенных на малой каретке (рис. 3, *в*). Затем зафиксированный АНПА перемещается вперед на малой каретке в носовую часть поворотной рамы (рис. 3, *г*), которая (в свою очередь) снова занимает горизонтальное положение. На этой же стадии производится подбор маяка с заглубителем, а БЭК начинает движение по программе. После этого большая каретка на направляющих салазках перемещается в носовую часть БЭК, где АНПА освобождается от фиксаторов и попадает в барабан – хранилище (для пяти АНПА), где к нему подключаются соответствующие разъёмы (рис. 3, *д*) [5, 6].

В научно-исследовательском институте министерства обороны Норвегии FFI (Forsvarets forskningsinstitutt) завершены исследования перспективной системы траления морских мин. Основным направлением работ стал поиск решений по использованию различных надводных и подводных безэкипажных катеров и аппаратов и их СПУ. НИОКР по данному направлению начались осенью 2015 г. и велись под общим руководством FFI при активном участии подразделений группы компаний Kongsberg. В 2016 г. разработчики продемонстрировали созданный по заказу FFI прототип БЭК, названный «Odin» (рис. 4) с СПУ, предназначенным для взаимодействия с АНПА «HUGIN-1000» [7].

Рис. 3. Схема работы СПУ:
а – фиксация АНПА на трос; *б* – доводка АНПА до фиксатора; *в* – захват АНПА поворотной рамой; *г* – подбор маяка с заглубителем; *д* – АНПА находится на штатном месте

Рис. 4. Схема работы СПУ БЭК Odin:
а – прием АНПА HUGIN-1000 в ловитель; *б* – втягивание АНПА на наклонную рампу; *в* – транспортировка АНПА в положении «по-походному»

Сам БЭК разработан и построен компанией Helgeland Plast на базе катера Polarcirkle-1050. Характеристики БЭК Odin: масса 5,5 т; длина 10,9 м; ширина 3,5 м; осадка 0,7 м; скорость 30 уз; полезная нагрузка 3,0 т; суммарная мощность 330 кВт (два дизеля). Характеристики АНПА HUGIN-1000: масса 1,6 т; длина 3,85 м; диаметр 0,75 м; глубина погружения 1000 м; скорость 3–4 уз; мощность двигателя 2 кВт; емкость АКБ до15 кВт/ч; автономность до 24 ч на скорости 3 уз. На рис. 4 показаны эпизоды подъема АНПА HUGIN-1000 на борт БЭК Odin при помощи разработанного СПУ [8, 9].

СПУ для АНПА Bluefin компании General Dynamics показано на рис. 5. Здесь все изделие прикреплено к кормовой площадке палубы БЭК с помощью несущей конструкции, на которой установлены направляющие линейные опоры [10]. Подъемник с шарниром соединяет палубное оборудование катера с аппарелью 5, которая оснащена колесами для спуска и подъема АНПА. Для облегчения попадания но-

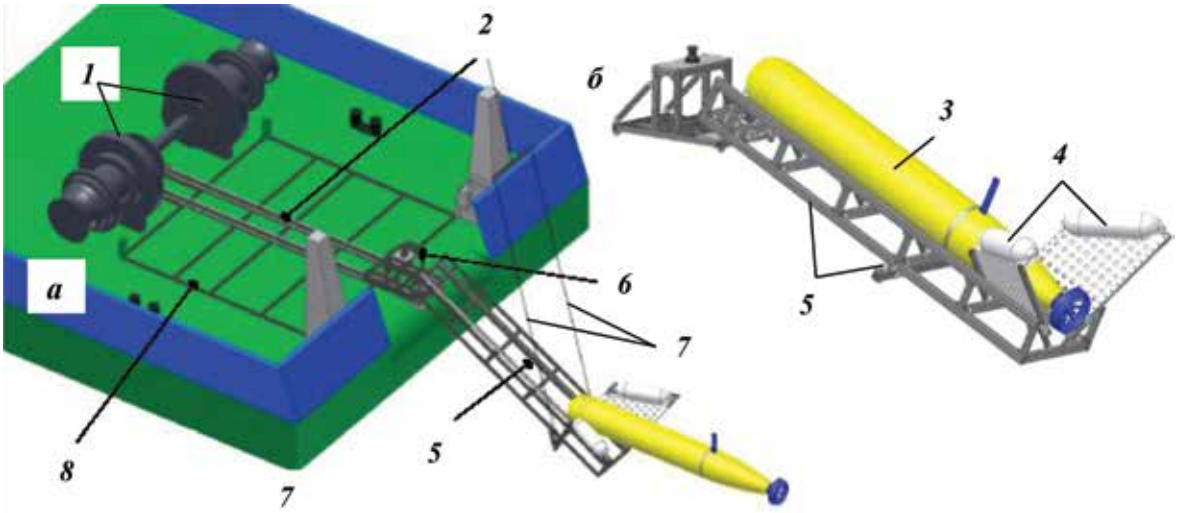


Рис. 5. Конструкция СПУ: *а* – общий вид; *б* – конструкция рампы:
1 – лебедка; 2 – направляющие; 3 – АНПА; 4 – поплавки; 5 – аппарель; 6 – лебедка; 7 – тросы грузовой стрелы; 8 – несущая конструкция

совой части АНПА в СПУ на конце аппарели имеются направляющие пластины с поплавками 4. При развертывании аппарель плавает на воде и таким образом совершает те же волнообразные движения, что и АНПА. Для сведения к минимуму непредсказуемых колебаний СПУ судно-носитель (или БЭК) поворачивается носом в сторону преобладающего направления волны и продолжает медленно двигаться вперед. Для спуска АНПА необходимо выдвинуть рампу и опустить аппарель в воду.

Далее АНПА плавно спускается на тросе по аппарели в воду при помощи лебедки 6, после чего трос отсоединяется от аппарата при помощи дистанционного размыкателя. Для подъема АНПА на борт БЭК необходимо прикрепить трос за носовую часть аппарата и начать движение аппарата вверх по аппарели. Далее происходит подъем аппарели по направляющим 2 и фиксация ее в положении «по-походному» [10, 11].

2. Разработка спускоподъемных устройств в ИПМТ ДВО РАН для безэкипажных катеров – носителей АНПА

Один из вариантов конструкции СПУ разработан в ИПМТ ДВО РАН [12] (рис. 6). Внутри корпуса БЭК находится лебедка с плавучим фалом. На вытравливаемом конце фала находится плавучая сфера диаметром 0,2 м, жестко заделанная в фал и рассчитанная на соответствующие нагрузки. Схема работы АНПА и механизмов СПУ предусматривает выпуск и буксировку плавучего фала со сферическим поплавком, АНПА наводится на фал в надводном положении (рис. 6, *а*); далее происходит контакт открытого гака АНПА с фалом (рис. 6, *б*); далее гак закрывается и АНПА оказывается зафиксированным с фалом (рис. 6, *в*); затем происходит разворачивание корневой части гака в нужном положении (рис. 6, *г*) и БЭК начинает буксировку АНПА (рис. 6, *д*); после этого происходит подтягивание АНПА к БЭК для последующего втягивания в нишу через открытые дверцы в транцевой доске БЭК (рис. 6, *е*). После выполнения этих операций АНПА попадает в нишу корпуса БЭК и фиксируется там. Конструкция гака АНПА включает кольцевую обойму, внутри которой находится платформа, которая имеет возможность проворачиваться в обойме под воздействием приложенной внешней силы. Гак имеет возможность поворачиваться под воздействием электропривода, занимая два положения – «открыто» и «закрыто». Когда происходит контакт открытого гака АНПА с плавучим фалом, при помощи датчика фотоэлемента происходит подача сигнала на электропривод, при помощи которого гак закрывается и АНПА оказывается зафиксированным с фалом [12].

Один из вариантов конструкции СПУ разработан в ИПМТ ДВО РАН [13]. Здесь в кормовой части на палубе

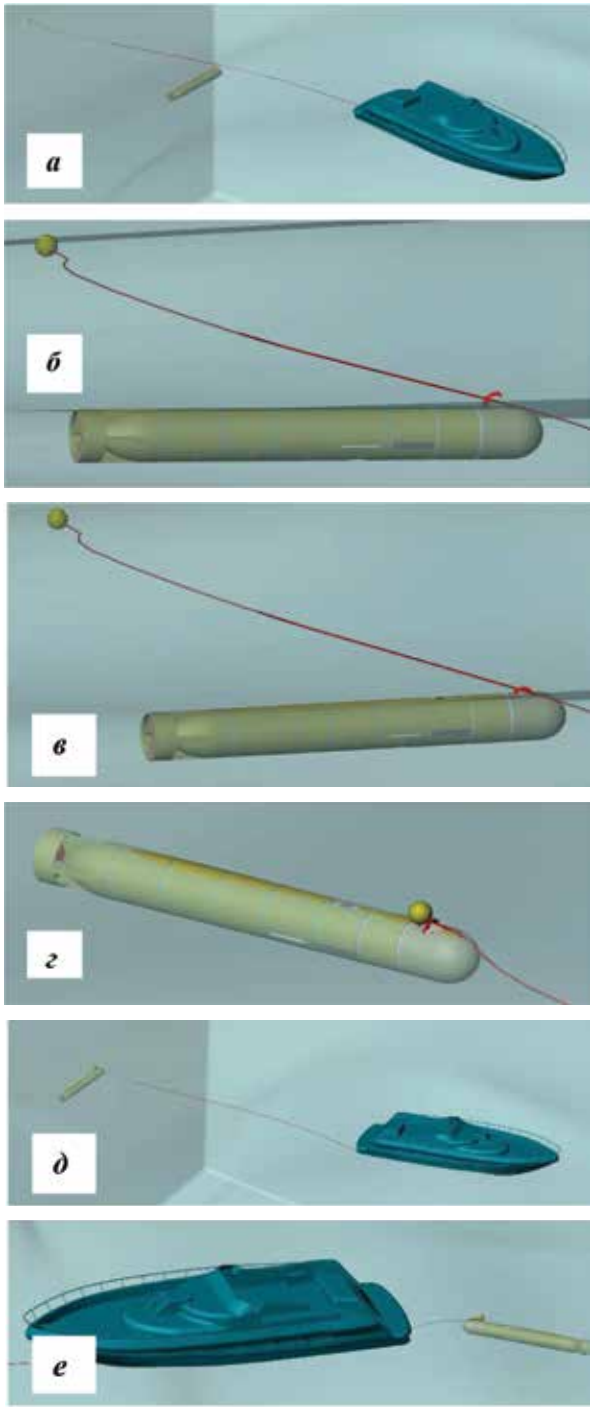


Рис. 6. Схема работы СПУ ИПМТ ДВО РАН:
а – БЭК выпустил и буксирует плавучий фал со сферическим поплавком, АНПА наводится на фал в надводном положении; *б* – происходит контакт открытого гака АНПА с фалом; *в* – гак автоматически закрывается и АНПА оказывается зафиксированный с фалом; *г* – происходит разворачивание корневой части гака в нужном положении; *д* – БЭК начинает буксировку АНПА; *е* – происходит подтягивание АНПА к БЭК для последующего втягивания в нишу

БЭК расположена электрическая лебедка, на барабане которой намотан кабель-трос нейтральной плавучести, один конец которого прочно соединен с малогабаритным ТНПА (рис. 7, *а*), оснащенным прочным, управляемым захватным устройством, другой конец кабель-троса через вращающийся коллектор подключен к аппаратуре системы управления и электропитания ТНПА. При этом ТНПА имеет приемную гидроакустическую антенну и подводную телекамеру со светильниками. Управляемое захватное устройство ТНПА имеет возможность захватывать по команде прочный носовой рым, расположенный в носовой части АНПА и вместе с кабель-тросом перемещать аппарат на платформу БЭК.

В кормовой части БЭК находятся также две платформы – нижняя, имеющая возможность качания на шарнире, и верхняя, которая имеет возможность перемещаться вдоль верхней платформы при помощи электропривода и частично погружаться в воду. СПУ работает следующим образом:

1. При необходимости поднять АНПА на борт БЭК при помощи гидроакустической системы связи от БЭК на АНПА оператором передается команда «Занять заданную точку водного пространства вблизи БЭК. Включить гидроакустический маяк». АНПА, выполняя эту команду, ложится в дрейф на глубине 5–10 м и удерживает свое место и глубину при помощи своих движителей и подруливающих устройств.

2. По команде оператора лебедка БЭК начинает вытравливание кабель-троса вместе с ТНПА. Далее оператор ТНПА включает приемную гидроакустическую антенну и начинает сближение с АНПА по направлению на гидроакустический маяк. Приблизившись к АНПА на визуальный контакт при помощи телекамеры, оператор, используя высокие маневренные качества ТНПА, подводит его к рыму и шарнирно прикрепляется к нему при помощи захватного устройства (рис. 7, *б*).

3. По команде оператора лебедка начинает выбирание кабель-троса вместе с ТНПА, который захватил АНПА при помощи захватного устройства и в конечном итоге втягивает АНПА на верхнюю платформу (рис. 7, *в*). Далее платформы поворачиваются на шарнире и занимают горизонтальное положение.

Спуск АНПА в воду при помощи СПУ происходит в обратной последовательности. Сближение ТНПА с АНПА под управлением оператора происходит под водой, где влияние неблагоприятных погодных усло-

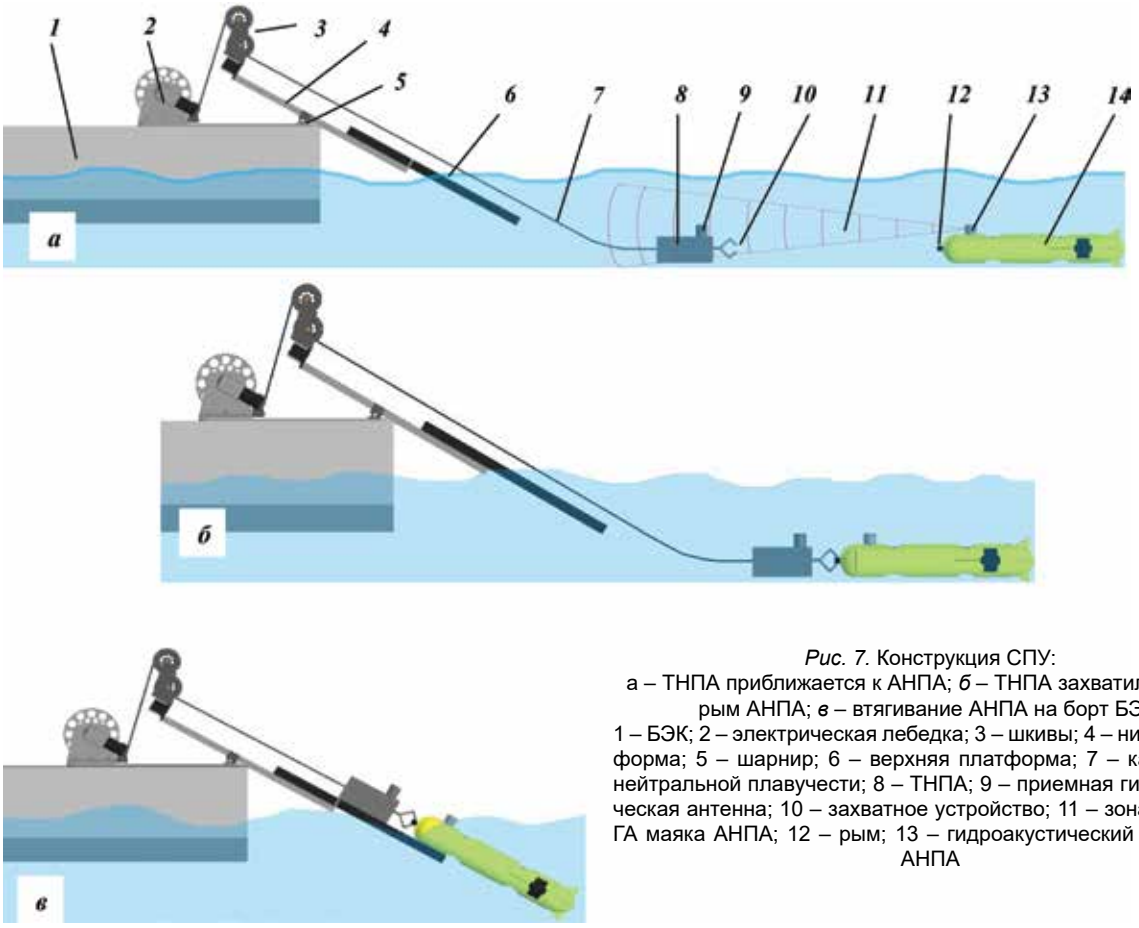


Рис. 7. Конструкция СПУ:
а – ТНПА приближается к АНПА; *б* – ТНПА захватил носовой рым АНПА; *в* – втягивание АНПА на борт БЭК:
1 – БЭК; 2 – электрическая лебедка; 3 – шкивы; 4 – нижняя платформа; 5 – шарнир; 6 – верхняя платформа; 7 – кабель-трос нейтральной плавучести; 8 – ТНПА; 9 – приемная гидроакустическая антенна; 10 – захватное устройство; 11 – зона действия ГА маяка АНПА; 12 – рым; 13 – гидроакустический маяк; 14 – АНПА

вий (ветер и волнение моря) сводится к минимуму, а вероятность захвата рыма АНПА захватным устройством ТНПА приближается к 100%, так как этот маневр давно и хорошо освоен операторами ТНПА. Дополнительно появляется возможность проведения спускоподъемных операций АНПА в ночное время, так как при этом наведение ТНПА на АНПА обеспечивается телекамерой и светильниками на дистанции порядка 3–10 м, в зависимости от прозрачности воды [13].

Следующая конструкция СПУ предназначена для БЭК – носителя АНПА (рис. 8). Корпус БЭК выполнен из стеклопластика в виде катамарана, в котором в диаметральной плоскости проделан сквозной «колодец» 6, закрывающийся сверху съемной надстройкой с мачтой, которая герметично крепится к его корпусу. «Колодец» БЭК оборудован СПУ, предназначенным для обеспечения спуска АНПА на воду и последующего его подъема на борт. «Колодец» имеет четыре вертикальных паза (по два на борт), в каждый из которых установлен винтовой модуль линейного перемещения, представляющий собой электромеханическое устройство [14, 15], предназначенное для выполнения линейного перемещения объектов с высокой точностью. Они состоят из направляющих, ходовых винтов 8, ползунов и электродвигателей 3, что обеспечивает высокую точность и плавность движения, Ползуны каждого винтового модуля линейного перемещения крепятся к ложементу 7 полукруглой формы. В днище ложемента находится электромагнит, фиксирующий корпус АНПА на ложементе, и два передающих трансформатора системы бесконтактного заряда АКБ АНПА.

При этом полукруглая форма днища ложемента соответствует форме корпуса АНПА, что обеспечивает хорошее прилегание электромагнита и трансформаторов. Ложемент имеет два фиксированных крайних положения: верхнее – когда он поднят до уровня палубы БЭК (рис. 8, *б*) и нижнее – когда он опущен в воду и готов к спуску или приему АНПА (рис. 8, *в*). К ложементу крепится гибкий кабель-канал 5, в котором находятся электрические кабели, соединяющие электромагнит и передающие трансформаторы системы бесконтактного заряда АКБ с системами БЭК. В нижней части корпуса АНПА установлена стальная пластина (т. н. «якорь»), совпадающая по размерам и расположению с электромагнитом ложемента, что обеспечивает жесткую фиксацию АНПА на ложементе при включенном электромагните и его свободный сход в воду при отключенном электромагните в крайнем нижнем положении ложемента. В нижней части корпуса АНПА герметично установлены два приемных трансформатора системы бесконтактного заряда АКБ, совпадающие по размерам и расположению с передающими трансформаторами, находящимися на ложементе, чем обеспечивается возможность бесконтактного заряда АКБ АНПА от электроэнергетической системы катера. При этом БЭК и АНПА оборудованы системой связи wi-fi. СПУ работает следующим образом.

1. При нахождении в базе полностью готовый к использованию БЭК находится на суше, на причальной стенке. Болты, крепящие надстройку к палубе БЭК, отворачиваются, и надстройка при помощи строп и рымов снимается и укладывается рядом с корпусом катера, открывая доступ к колодцу с ложементом, находящемуся в крайнем верхнем положении. Далее при помощи строп, закрепленных за рымы, АНПА поднимается с кильблоков и укладывается внутрь колодца на ложемент. Далее по коман-

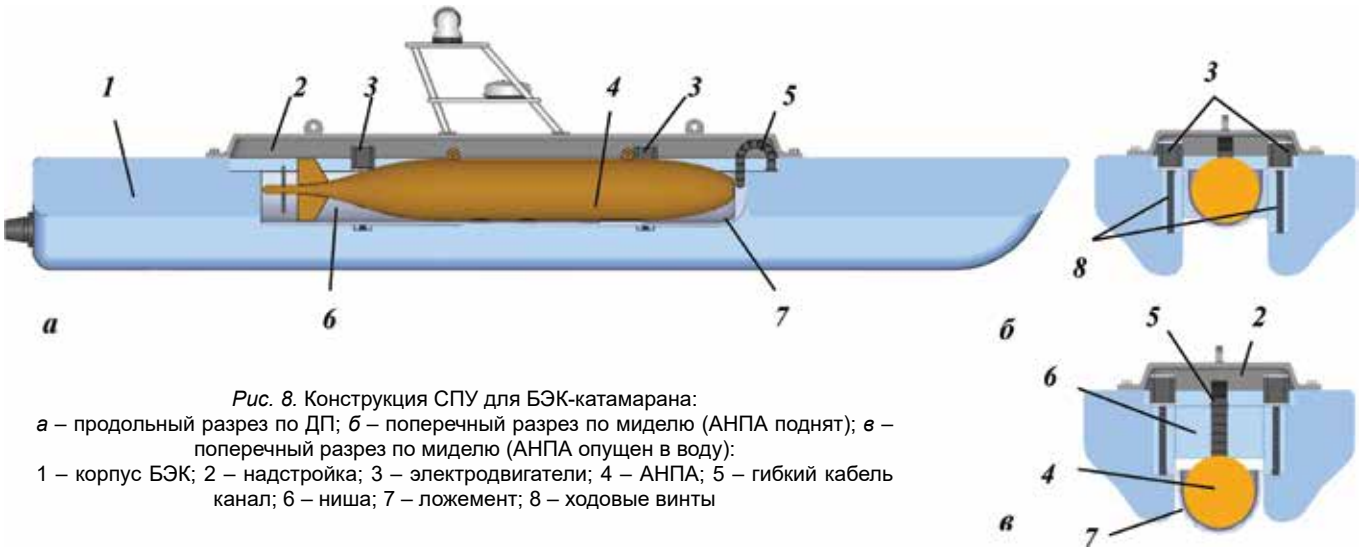


Рис. 8. Конструкция СПУ для БЭК-катамарана:
а – продольный разрез по ДП; *б* – поперечный разрез по миделю (АНПА поднят); *в* – поперечный разрез по миделю (АНПА опущен в воду):
1 – корпус БЭК; 2 – надстройка; 3 – электродвигатели; 4 – АНПА; 5 – гибкий кабель канал; 6 – ниша; 7 – ложемент; 8 – ходовые винты

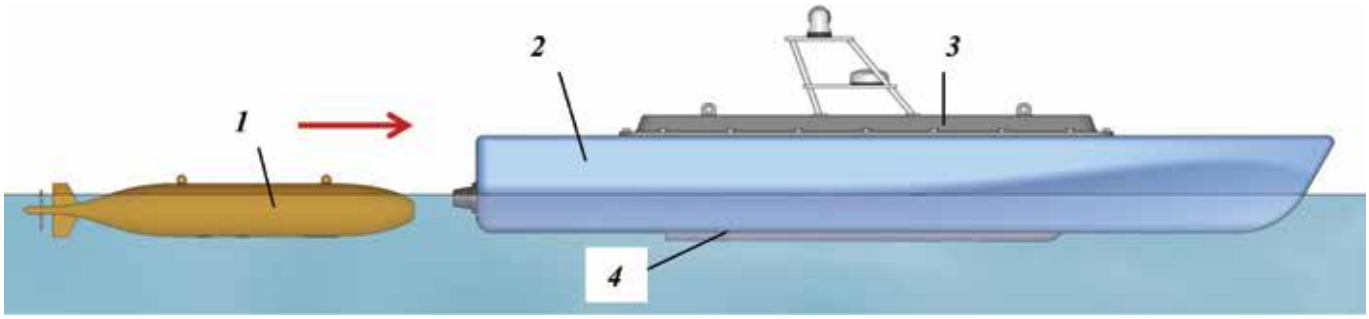


Рис. 9. Схема приема АНПА на борт БЭК:
1 – АНПА; 2 – корпус БЭК-катамарана; 3 – надстройка с мачтой; 4 – ложемент выдвинут вниз до упора

де оператора подается питание на электромагнит и АНПА оказывается жестко закрепленным на ложементе своим «якорем». Затем надстройка перегружается на БЭК, центрируется с «колодцем» в его корпусе и при помощи фланца и болтов герметично крепится к палубе БЭК.

2. Далее БЭК с находящимся внутри АНПА перемещается на воду подъемным краном, и под управлением программы-задания (или оператора) совершает переход и прибывает в район предназначения. Во время перехода АНПА зафиксирован на ложементе в крайнем верхнем положении (рис. 8, *б*) при помощи включенного электромагнита. Прибыв в район предназначения, АНПА приступает к выполнению поставленных задач при помощи бортовой аппаратуры [14].

3. При необходимости проведения исследований на большой глубине оператором принимается решение на использование АНПА. Для этого по команде оператора БЭК стопорит ход. Далее подается питание на электроприводы четырех винтовых модулей линейного перемещения, которые опускают ложемент в крайнее нижнее положение при помощи ползунов, прикрепленных к ложементу. При этом АНПА оказывается полностью погруженным в воду по ватерлинию (рис. 8, *в*). Далее по команде оператора снимается питание с электромагнита, АНПА освобождается от крепления к ложементу, дает задний ход и покидает ложемент, приступая к выполнению своей миссии на глубине. БЭК при этом может продолжать свою самостоятельную миссию в другом районе акватории.

4. Выполнив свою миссию гидрографических измерений (или израсходовав энергию АКБ), АНПА всплывает в надводное положение, определяет свои координаты по сигналам ГЛОНАСС/GPS и передает их по системе радиосвязи на БЭК и оператору комплекса на берег. БЭК под управлением оператора выходит в точку встречи с АНПА, разворачивается к нему кормой и стопорит ход. АНПА дает ход вперед (рис. 9) и под управлением оператора входит в пространство между корпусами БЭК-катамарана до упора и садится днищем на ложемент. Далее подается питание на электромагнит, фиксирующий АНПА на ложементе. Далее подается питание на электроприводы 7 четырех винтовых модулей линейного перемещения, которые поднимают ложемент в крайнее верхнее положение. При этом АНПА оказывается поднятым на уровень палубы БЭК и находится там в безопасном положении. Далее по команде системы управления гидрографического комплекса активируется система бесконтактного заряда АКБ, включающая передающий и приемный трансформаторы, что приводит к постепенному заряду АКБ АНПА. Данные, полученные в результате глубоководной миссии АНПА, передаются по wi-fi на магнитные носители БЭК для их предварительной обработки.

5. После выполнения всех поставленных задач по команде оператора БЭК с АНПА на борту дает ход и начинает движение в базу или к кораблю обеспечения. Во время перехода АНПА зафиксирован на ложементе в верхнем положении при помощи включенных электромагнитов, продолжая заряд АКБ. Прибыв в базу, гидрографический комплекс под управлением оператора подводится к пирсу, стопорит ход и далее поднимается на пирс подъемным краном. Данные, полученные в результате работы всего комплекса, передаются по кабелю Ethernet на пост управления для их окончательной обработки и удобства представления и анализа для заказчика работ [14].

Общий вид СПУ для БЭК «Макаровец», предназначенного для базирования малогабаритного АНПА, показан на рис. 10. Экспериментальная установка для испытания этого СПУ в опытовом бассейне показана на рис. 11 [15–17]. Здесь неподвижная платформа 11 (станина) моделирует кормовую часть корпуса БЭК (см. рис. 11, *а*). На стационарной платформе на шарнире подвешена качающаяся балка 7, ее вращательное движение на шарнире 9 огра-

Рис. 10. БЭК «Макаровец» со спускоподъемным устройством и АНПА в положении «по-походному»

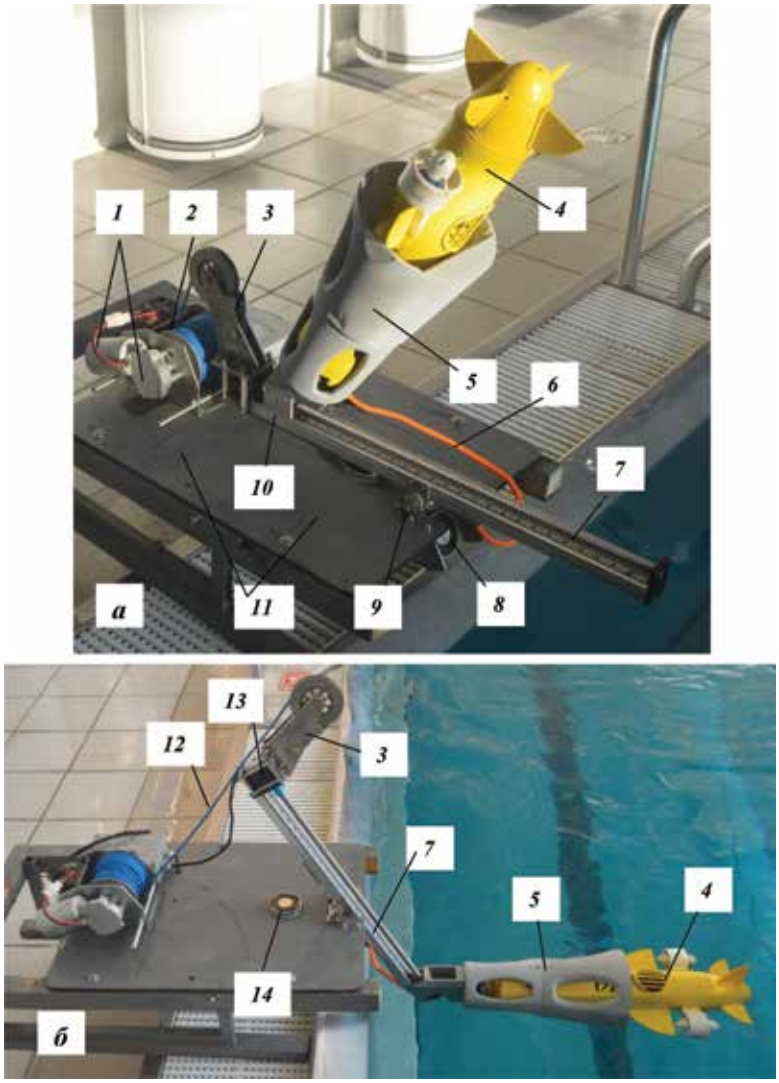


Рис. 11. Общий вид экспериментальной установки:
а – в положении «по-походному»; *б* – в рабочем положении:
1 – электропривод с редуктором; 2 – лебедка; 3 – блок шкивов; 4 – АНПА; 5 – конус-ловитель; 6 – кабель; 7 – качающаяся балка с ходовым винтом; 8 – нижний электромагнитный фиксатор; 9 – шарнир; 10 – подвижная каретка; 11 – стационарная платформа; 12 – кабель-трос; 13 – электропривод ходового винта; 14 – верхний электромагнитный фиксатор

ничено двумя стопорами с электромагнитами – верхним 8 и нижним 14. Внутри качающейся балки в подшипниках вращается ходовой винт, приводимый в движение электродвигателем 14, который приводит в движение каретку 10, которая скользит в продольных пазах по всей длине балки. К каретке крепится конус-ловитель 5, внутри которого находится электромагнит, фиксирующий АНПА. К платформе 11 крепится лебедка 2 с электроприводом и редуктором. Кабель-трос намотан на барабан лебедки, он проходит через шкивы и крепится специальной заделкой к носовой части балки 7. После механической сборки экспериментальной установки производится монтаж электронных компонентов на базе микроконтроллера Arduino Nano CH340 в среде разработки ArduinoIDE.

Алгоритм работы программы следующий: после получения сигнала с поста управления на подъем АНПА микроконтроллер подает управляющий сигнал (+5В) на модуль силовых ключей 4Р-канала 10 А, Flash-I2C, который, в свою очередь, распределяет электропитание (U = 12 В) на электромагнит, установленный в ловителе для фиксации АНПА, электромагнит установленный для фиксации балки 7 в положении по-походному и отключает электромагнит 14 для высвобождения балки. Далее микроконтроллер подает управляющий сигнал на реле, через которое подается питание (U = 12 В) на электролебедку, управляющий сигнал отключается программно (t = 3 с). После этого производится управление шаговым электродвигателем через драйвер DRV8825 Stepper driver для перемещения каретки с конусом-ловителем и АНПА в положение «по-походному». Управление шаговым двигателем производится в течение заданного интервала времени (t = 25 с). Алгоритм спуска АНПА производится в обратном порядке. Питание экспериментальной установки осуществляется от литий-полимерной АКБ емкостью 4500 мА·ч (U = 12 В) [15–17]. На рис. 12 приведены результаты экспериментальных исследований характеристик СПУ. В частности, проводился хронометраж процесса спуска АНПА и контроль корректности работы системы автомати-

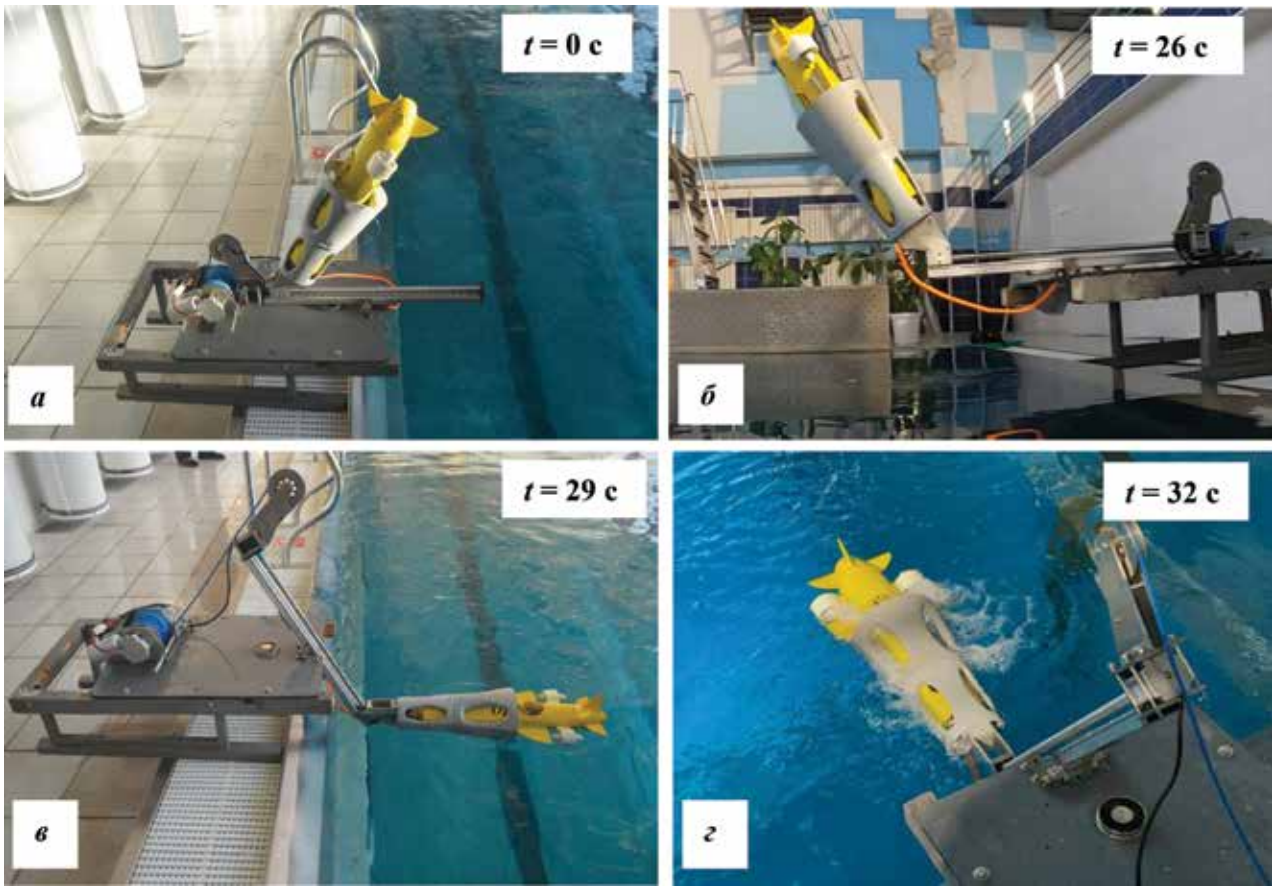


Рис. 12. Результаты экспериментальных исследований характеристик СПУ (хронометраж процесса спуска АНПА на воду): *а* – АНПА зафиксирован в ловителе, каретка в положении по-походному; *б* – каретка и ловитель с АНПА в крайнем положении ходового винта; *в* – каретка и ловитель с АНПА в рабочем положении, фиксаторы переключены с положения «по-походному» в «рабочее» положение; *г* – отключен фиксатор АНПА в конусе-ловителе, АНПА находится в воде и готов к погружению

ческого управления СПУ, при этом зафиксированы следующие основные положения механизмов СПУ и АНПА [44]:

а – АНПА зафиксирован в конусе-ловителе при помощи электромагнита, каретка с конусом-ловителем и АНПА находится в положении по-походному (t = 0 с);

б – запускается электродвигатель, и при помощи ходового винта каретка с конусом-ловителем и АНПА перемещается в крайнее положение (t = 26 с);

в – электромагнит, удерживающий балку в горизонтальном положении, отключается, и включается электромагнит для фиксации подвижной балки в рабочем положении, далее запускается электродвигатель лебедки и вытравливается кабель-трос, подвижная балка при этом поворачивается на шарнире по часовой стрелке и занимает рабочее положение (t = 29 с);

г – электромагнит внутри конуса-ловителя отключается, АНПА вошел в воду и готов к выходу из конуса-ловителя задним ходом и к дальнейшему погружению (t = 32 с).

Во время работы СПУ на спуск АНПА все механизмы, электроприводы и электромагни-ты СПУ работали синхронно без сбоев.

На рис. 13 приведены результаты экспериментальных исследований характеристик СПУ, в частности, проводился хронометраж процесса подъема АНПА из воды и контроль корректности работы системы автоматического управления СПУ, при этом были зафиксированы следующие основные положения механизмов СПУ и АНПА [18]:

а – АНПА выполнил свою задачу и находится на поверхности воды в непосредственной близости к конусу-ловителю (t = 0 с);

б – АНПА по командам оператора приводится в конус-ловитель при помощи своих движителей, электромагнит внутри конуса-ловителя включается и фиксирует АНПА (t = 3 с);

в – электромагнит в нише отключается, и включается электромагнит, установленный на платформе, для фиксации подвижной балки в положении «по-походному», запускается электродвигатель лебедки и выбирается кабель-трос, подвижная платформа при этом

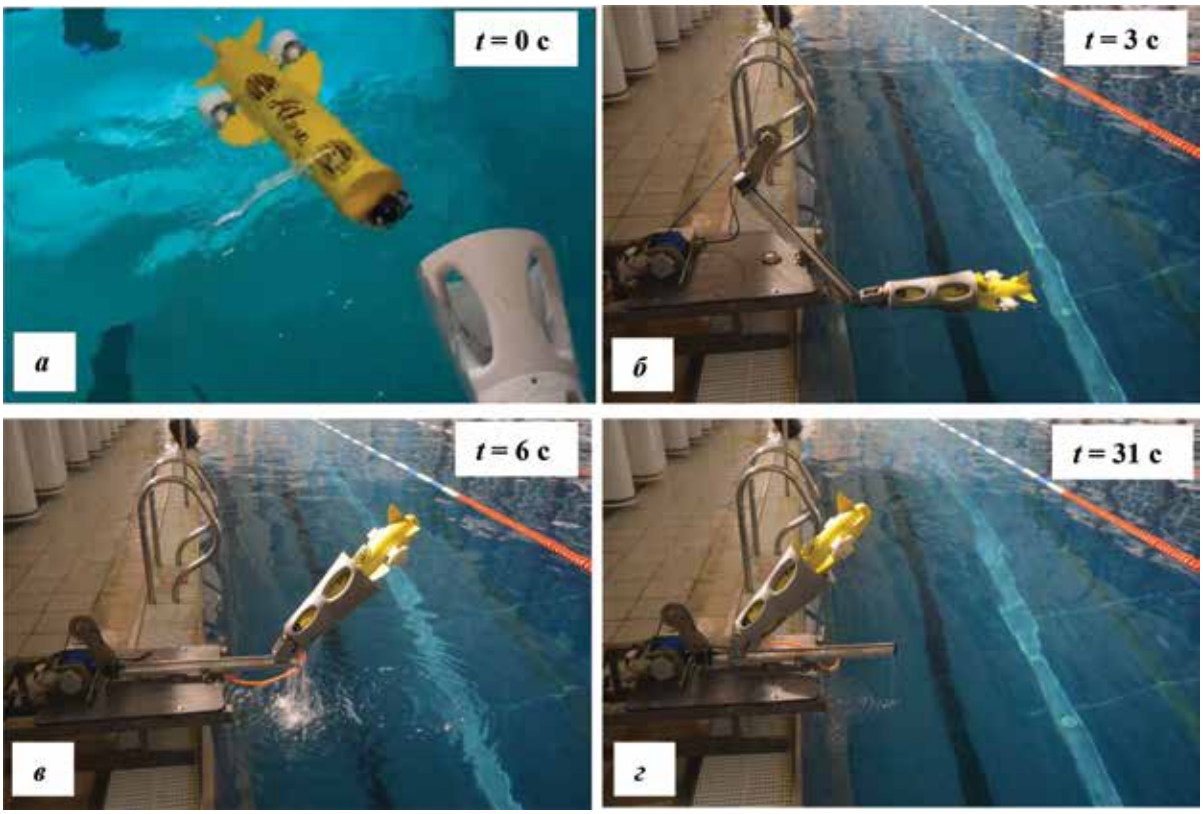


Рис. 13. Результаты экспериментальных исследований характеристик СПУ (хронометраж процесса подъема АНПА): *а* – АНПА находится на поверхности воды вблизи ловителя; *б* – АНПА зафиксирован в ловителе; *в* – кабель-трос выбран, подвижная платформа поднята в горизонтальное положение; *г* – каретка с АНПА в положении «по-походному»

поворачивается на шарнире против часовой стрелки и занимает горизонтальное положение (t = 6 с);

г – запускается электродвигатель, и при помощи ходового винта каретка с конусом-ловителем и АНПА перемещается в положение «по-походному» (t = 31 с).

В качестве вывода можно отметить, что испытания в опытовом бассейне являются необходимым элементом проверки работоспособности СПУ и АНПА перед их установкой на БЭК для дальнейшего проведения натурных морских испытаний. Научным результатом являются положительные итоги исследований компактного модульного СПУ, обладающего высокими характеристиками за счет реализации принципа модульности, так как все устройство можно собрать и отрегулировать без катера в лабораторных условиях и в готовом виде установить на БЭК [18].

Реализуется также принцип универсальности, так как СПУ данного типа может обеспечивать спуск на воду и подъем из воды объектов трех типов: АНПА; БНПА и опускаемых ГА антенн. Экспериментальные исследования показали, что малогабаритный АНПА способен обследовать акваторию и обнаруживать донные объекты [18].

Заключение

Технологии базирования АНПА на БЭК обеспечивают ряд преимуществ, связанных с повышением эффективности, безопасности и универсальности выполнения задач в морской среде. Необходимость базирования АНПА на БЭК вызвана главным образом решением проблемы обеспечения быстрого перемещения АНПА из одного района в другой, так как скорость хода АНПА довольно мала (3–5 уз), а брать его на борт судна-носителя для перехода в новый район не всегда оправданно. Скорость хода БЭК с АНПА на борту может составлять 25–35 уз, что значительно больше, чем скорость судна-носителя (13–18 уз). БЭК, оснащённые АНПА, могут выполнять более широкий спектр задач: обследование подводной части судов на якорной стоянке, мониторинг технического состояния подводных объектов, поиск и обезвреживание мин, подводно-технические работы и др. Совместное использование БЭК и АНПА позволяет создавать гибридные робототехнические комплексы, которые могут сочетать преимущества разных технологий (например, лидары, гидроакустические системы и сенсоры).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шмаков А.С., Викторов Р.В., Корнилов Н.А. Малые формы подводной робототехники на безэкипажных катерах, их спускоподъемные и пусковые устройства // Наукоемкие технологии. 2020. №7 (21). С. 22–31.
2. AUVs Launched and Recovered Autonomously. URL: https://www.marinetechnology-news. com/news/launched-recovered-autonomously-550699 (дата обращения: 15.04.2026).
3. Riptide Micro Unmanned Underwater Vehicle. URL: https://www.naval-technology. com/ projects/riptide-micro-unmanned-underwater-vehicle/ (дата обращения: 15.04. 2026).
4. ALARS – Automated Launch And Recovery System for AUVs. URL: https://www. academia.edu/122709977/ALARS_Automated_Launch_And_Recovery_System_for_AUVs (дата обращения: 15.04. 2026).
5. General Dynamics Launches New Bluefin-12. URL: https://www.marinetechnologynews. com/news/general-dynamics-launches-bluefin-593965 (дата обращения: 15.04.2026).
6. A Versatile AUV Launch and Recovery System. URL: https://henriksen.com/launch-and-recovery-auv-stinger/ (дата обращения: 15.04.2026).
7. AUV launch and Recovery. URL: https://www.asv global.com/-auv-launch-recovery (дата обращения: 15.04. 2026).
8. Ничего не будет: ни тральщиков, ни водолазов – одни сплошные роботы. URL: https: //andrej-kraft.livejournal.com/142900.html (дата обращения: 15.04.2026).
9. Slik fungerer Norges nye ubemannede minejegere. URL: https://www.tu.no/artikler/slik-fungerer-norges-nye-ubemannede-minejegere/350457 (дата обращения: 15.04.2026).
10. Henriksen LARS Demo with HUGIN. URL: https://sea-technology.com/henriksen-lars-demo-with-hugin (дата обращения: 15.04.2026).
11. Design of a Launch and Recovery System for an AUV, developed for the research vessel FK Uthörn. URL: https://epic.awi.de/id/eprint/35287/2/Poster-ROBEX-Jonas_Hagemann.pdf (дата обращения: 15.04.2026).
12. Патент № 685498C1 Российская Федерация, МПК B63B27/16. Устройство для захвата плавучего фала автономным необитаемым подводным аппаратом: заявлено 13.08.2018: опубликовано 18.04.2019 / Кушнерик А.А., Карлов А.В.; заяввитель ИПМТ ДВО РАН. 13 с.: 6 ил.
13. Патент № XXXXXXXРФ, МПК: B63B 1/04 (2006.01). Гидрографический комплекс на базе безэкипажного катера – носителя автономного необитаемого подводного аппарата : опубл. XX.XX.2026 / Илларионов Г.Ю. 10 с. : 7 ил.
14. Патент № XXXXXXXРФ, МПК: B63B 1/04 (2006.01).Спускоподъемное устройство безэкипажного катера для автономного необитаемого подводного аппарата: опубл. XX.XX. 2026 / Илларионов Г.Ю. 10 с. : 7 ил.
15. Илларионов Г.Ю., Викторов Р.В., Михайлов Д.Н., Елисеенко Г.Д. Разработка учебно-тренировочного роботизированного комплекса на базе безэкипажного катера // Подводные исследования и робототехника. 2025. №3. С. 69–80.
16. Патент № 2757036 РФ, МПК B63B 21/66 (2006.01.). Спускоподъемное устройство безэкипажного катера для необитаемого подводного аппарата: опубл. 11.10.2021 / Илларионов Г.Ю., Кнуров М.В., Шмаков А.С., Викторов Р.В., Корнилов Н.А. 11 с.: 4 ил.
17. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2026619355 Система управления спускоподъемным устройством «безэкипажный катер – автономный необитаемый подводный аппарат» (СУ СПУ БЭК – АНПА), опубл. 02.04.1926 / Г.Ю. Илларионов, М.В. Кнуров.

Сведения об авторах:

ИЛЛАРИОНОВ Геннадий Юрьевич, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, г.н.с. лаборатории робототехники

Место работы: Институт проблем морских технологий имени академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова , д 5а

Область научных интересов: исследования и разработка морских робототехнических комплексов двойного и специального назначения, их носителей и способов применения

E-mail: illar1951gy@mail.ru

Тел.: +79147238288

eLibrary Author ID: 331168

КНУРОВ Максим Вадимович, к.т.н., преподаватель специальной кафедры

Место работы: Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова

Адрес места работы: Приморский край, г. Владивосток, Камский переулок, 7

Область научных интересов: исследования и разработка морских робототехнических комплексов двойного и специального назначения, их носителей и способов применения

E-mail: knurich@mail.ru

Тел.: +79841952335

eLibrary Author ID: 1147-1300

КУШНЕРИК Андрей Александрович, начальник инновационного отдела

Место работы: Институт проблем морских технологий имени академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова , д 5а

Область научных интересов: проектирование и разработка морских робототехнических комплексов

E-mail: andreyfestu@ya.ru

Тел.: 89510214610

eLibrary Author ID: 1357862

Для цитирования:

Илларионов Г.Ю., Кнуров М.В., Кушнерик А.А. СПУСКОПОДЪЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ НА БЕЗЭКИПАЖНЫХ КАТЕРАХ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 4–16. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_01. EDN: WKATFR.

DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_01

LAUNCH AND RECOVERY SYSTEMS FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES ON UNMANNED BOATS

G.Yu. Illarionov, M.V. Knurov, A.A. Kushnerik

The article examines the design and operating principle Launch and Recovery Systems (LARS) for autonomous underwater vehicles (AUVs) based on unmanned boats (UBs) of various purposes. Some of the patented technical solutions of the IPMT FEB RAS in this field are described. The results of experimental studies of the operational characteristics of the LARS for a small-sized AUV based on the UB are presented.

Keywords: Unmanned boat, Autonomous underwater vehicle, Launch and Recovery Systems, usage model, experimental research.

References

1. Shmakov A.S., Viktorov R.V., Kornilov N.A. Small forms of underwater robotics on unmanned boats, their launching and lifting devices. Science-intensive technologies. 2020. No. 7 (21), pp. 22–31.

2. AUVs Launched and Recovered Autonomously. URL: https://www.marinetechnology-news. com/news/launched-recovered-autonomously-550699 – (accessed on 15.04.2026).

3. Riptide Micro Unmanned Underwater Vehicle. URL: https://www.naval-technology. com/ projects/riptide-micro-unmanned-underwater-vehicle/ (accessed on 15.04. 2026).

4. ALARS – Automated Launch And Recovery System for AUVs. URL: https://www. academia.edu/122709977/ALARS_Automated_Launch_And_Recovery_System_for_AUVs (accessed on 15.04. 2026).

5. General Dynamics Launches New Bluefin-12. URL. https://www.marinetechnologynews. com/news/general-dynamics-launches-bluefin-593965 – (accessed on 15.04.2026).

6. A Versatile AUV Launch and Recovery System. URL. https://henriksen.com/launch-and-recovery-auv-stinger/ (accessed on 15.04.2026).

7. AUV launch and Recovery. URL: https://www.asv global.com/-auv-launch-recovery (date of access 15.04. 2026).

8. There will be nothing: no minesweepers, no divers – just robots. URL: https://andrej-kraft.livejournal.com/142900.html – (accessed on 15.04.2026).

9. Slik fungerer Norges nye ubemannede minejegere. URL: https://www.tu.no/artikler/slik-fungerer-norges-nye-ubemannede-minejegere/350457 (accessed on 15.04.2026).

10. Henriksen LARS Demo with HUGIN. URL: https://sea-technology.com/henriksen-lars-demo-with-hugin (accessed on 15.04.2026).

11. Design of a Launch and Recovery System for an AUV, developed for the research vessel FK Uthörn. URL: https://epic.awi.de/id/eprint/35287/2/Poster-ROBEX-Jonas_Hagemann.pdf (accessed on 15.04.2026).

12. Patent No. 685498C1 RF. IPC B63B27/16. Device for capturing a floating hawser with an autonomous unmanned underwater vehicle, publ. 2019.04.18 / Kushnerik A.A., Karlov A.V. – 13 p.: 6 ill. – Text: direct.

13. Patent 2866746 RF, IPC: B63B 21/56 (2006.01), B63B 27/16 (2006.01). Launch and recovery device for an unmanned boat for an autonomous uninhabited underwater vehicle: published on 22.07.2026 / Illarionov G.Yu., Knurov M.V. – 14 p.: 5 ill. – Text: direct.

14. Patent No. 2862523C1, RF, IPC: B63B 35/00 (2006.01). Hydrographic complex based on an unmanned boat – a carrier of an autonomous uninhabited underwater vehicle: published on 21.05.2026 / Illarionov G. Yu. – 10 p.: 7 ill. – Text: direct.

15. Illarionov G.Yu. Development of a training robotic complex based on an unmanned boat / Illarionov G.Yu., Viktorov R.V., Mikhailov D.N., Eliseenko G.D. // – Text: direct // Underwater Research and Robotics, No. 3, 2025, pp. 69–80.

16. Patent No. 2757036 RF, IPC B63B 21/66 (2006.01). Launch and recovery device for an unmanned boat for an unmanned underwater vehicle: published on 11.10.2021 / Illarionov G.Yu., Knurov M.V., Shmakov A.S., Viktorov R.V., Kornilov N.A. – 11 p.: 4 ill. – Text: direct.

17. Certificate of state registration of the computer program No. 2026619355. Control system for the launch and recovery device "unmanned boat – autonomous unmanned underwater vehicle" (CSU SPU BEC – AUV), published on 02.04.1926 / G.Yu. Illarionov, M.V. Knurov.

Information about the authors

ILLARIONOV Gennady Yuryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Chief Researcher at the Robotics Laboratory
Institute of Marine Technology Problems named after Academician M.D. Ageev, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
690091, Vladivostok, Sukhanova St., Building 5A
Field of scientific interest: research and development of marine robotic systems for dual and special purposes, their carriers, and methods of application
E-mail: illar1951gy@mail.ru. **Tel.:** +79147238288
eLibrary Author ID: 331168

KNUROV Maxim Vadimovich, Candidate of Technical Sciences, Lecturer at the Special Department
S.O. Makarov Pacific Higher Naval School
Primorsky Krai, Vladivostok, Kamsky Lane, 7
Field of scientific interest: research and development of marine robotic systems for dual and special purposes, their carriers and methods of application
E-mail: knurich@mail.ru. **Phone:** +79841952335
eLibrary Author ID: 1147-1300

KUSHNERIK Andrey Alexandrovich, Head of the Innovation Department
Institute of Marine Technology Problems named after Academician M.D. Ageev, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
690091, Vladivostok, Sukhanova St., building 5a
Field of scientific interest: design and development of marine robotic systems.
E-mail: andreyfestu@ya.ru. **Phone:** 79510214610
eLibrary Author ID: 1357862

УДК 531/534
EDN: YVRDHB
DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_02

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВАКУУМНОЙ ПРИСОСКИ БЕРНУЛЛИ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

М.М. Князьков, П.П. Остриков, Е.А. Семенов, А.Н. Суханов

В статье представлено исследование, посвященное режимам работы присоски «Бернулли» в различных средах. Приводятся полученные экспериментально сравнительные характеристики вакуумных присосок, где генератором вакуума выступает воздушный эжектор и присоска Бернулли при их работе в воздушной и водной среде. Рассматривается возможность использования присосок Бернулли в качестве захватных вакуумных устройств на мобильных роботах, перемещающихся по произвольно ориентированным поверхностям в различных средах, расположенных на объектах морского базирования. Это обусловлено необходимостью обслуживать данные объекты в условиях, где ручной труд или опасен для персонала, или будет слишком дорогостоящим. Использование подобных устройств позволяет мобильным роботам закрепляться и перемещаться по поверхностям, не обладающими ферримагнитными свойствами. Экспериментальные характеристики были получены на специально созданной лабораторной установке, которая позволяет снимать характеристики уровня разрежения в области вакуумирования присосок в воздушной, водной и пограничной средах. Установка позволяет испытывать различные типы присосок в водной среде на глубине до двух метров. На этой установке были проведены натурные испытания различных типов присосок при различном уровне питающего давления сжатого воздуха.

Ключевые слова: присоска Бернулли, вакуумные захватные устройства, генератор вакуума, переходные процессы, мобильный робот вертикального перемещения, экспериментальный стенд, водная и воздушная среда, газодинамические и гидродинамические процессы.

Введение

В настоящее время в нашей стране все активнее ведется освоение ресурсов морского и океанического шельфа. Появляется все больше газо- и нефтедобывающих станций, в том числе в холодных арктических широтах [1]. Одним из таких примеров является нефтедобывающая станция Морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная» (см. рис. 1), расположенная в Печорском море [2].

Обслуживание станции обусловлено трудностями, связанными с тем, что большую часть года она находится во льдах, а период её освобождения от ледяного покрова приходится на момент, когда температура воды резко повышается до 5–7 градусов тепла. Все это осложняет ее обслуживание и текущий ремонт, в особенности подводной части ее внешнего корпуса. В данный момент ведутся разработки робототехнических средств для обслуживания ее внешнего корпуса, которые призваны заменить ручной труд водолазов [3, 4]. Однако разработка таких средств сопряжена с рядом сложностей, в частности, в месте расположения станции проходят сильные течения, что мешает в полной мере эффективно использовать различные типы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Поверхность внешнего корпуса МЛСП изготовлена из различных материалов, где основным материалом внешней обшивки выступает плакированная сталь, имеющая слабые магнитные свойства. Поэтому использование различных магнитных схватов для удержания робототехнических средств на поверхности корпуса станции не представляется возможным. Одним из решений, которое позволяет удерживаться на поверхности и при этом не повреждать ее, является использование вакуумных захватных устройств различного типа. Ранее в Институте проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского проводились исследо-

Рис. 1. Морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная»

вания по разработке ремонтно-диагностических робототехнических комплексов, где для удержания на поверхности использовались вакуумные захватные устройства, в которых генератором вакуума выступал воздушный эжектор [5–7]. Предыдущие исследования показали, что подобные захватные устройства могут быть использованы на разрабатываемых робототехнических комплексах, однако их использование сопряжено с необходимостью усложнения режимов управления при переходе робототехнического средства из одной среды в другую, а именно из воздушной в водную. Помимо этого, при переходе робототехнического средства из воздушной среды в водную происходит увеличение времени достижения рабочего уровня вакуума в захватах эжекторного типа, что ведет к уменьшению скорости перемещения всего робототехнического комплекса.

Вакуумные захватные устройства эжекторного типа показали свою эффективность только на небольшой глубине погружения. С увеличением глубины погружения донный тип устройств резко теряет эффективность, так как давление воды запирает их. Таким образом, была предпринята попытка заменить их на вакуумные захваты иного типа, а именно присоски Бернулли.

Подготовка к проведению эксперимента

По своим нагрузочным характеристикам присоски Бернулли (рис. 2) уступают вакуумным захватным устройствам эжекторного типа (рис. 3), однако обладают тем преимуществом, что менее подвержены влиянию окружающей среды.

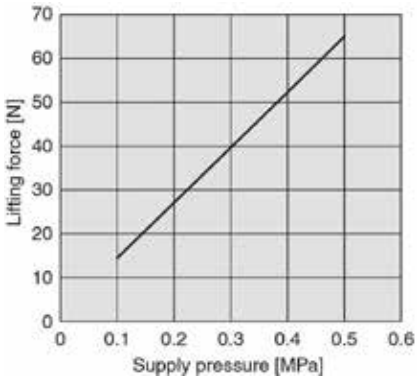


Рис. 2. Паспортные характеристики присоски Бернулли ZNC80, зависимость силы удержания с поверхностью контакта от питающего давления [8]

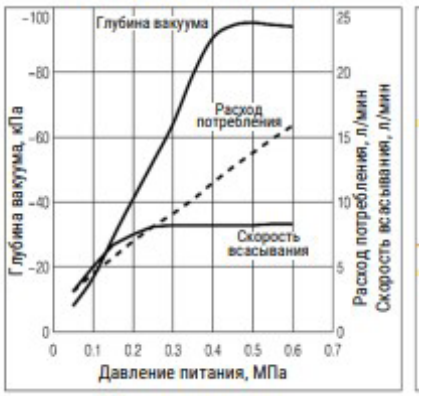


Рис. 3. Паспортные характеристики воздушного эжектора, который используется в вакуумной присоске [9]

Значение силы удержания на поверхности можно вычислить с помощью формулы:

$$F_у = p_v * S_{эфф},$$

где $F_у$ – сила удержания на поверхности;
p_v – глубина вакуума;
$S_{эфф}$ – эффективная площадь присоски.

С учетом зависимостей, показанных на рис. 3, можно получить из формулы численные данные для

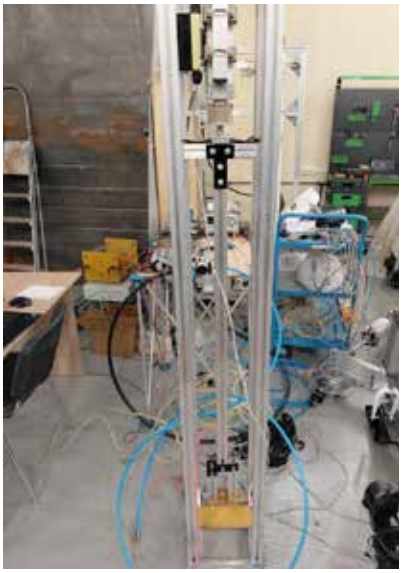


Рис. 4. Экспериментальная установка

Рис. 5. Экспериментальная установка внутри бассейна

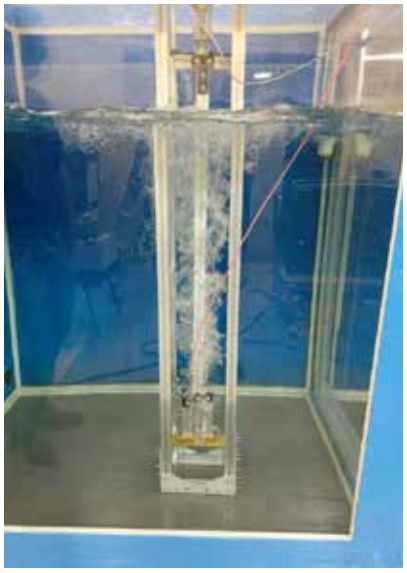


Рис. 6. Проведение испытаний присоски «Бернулли» на глубине 1,5 метра

сопоставления усилий, развиваемых присоской Бернулли, с таковыми для вакуумной присоски эжекторного типа.

Для проведения эксперимента была использована установка (рис. 4), которая позволяет с различным усилием отрывать присоску от поверхности, делать замеры разрежения под присоской в реальном времени, при различном питающем давлении. На установке используется следящий пневматический привод, который регулирует усилие прижатия и отрыва присоски от поверхности. Также на установке закреплены датчик вакуума и датчик расхода сжатого воздуха.

На установке была закреплена присоска Бернулли, что позволило снять экспериментальные характеристики сначала в воздушной среде, а потом в водной среде (рис. 5).

Бассейн позволяет проводить испытания различных типов присосок на глубине до 2 метров, в данном случае испытания присоски Бернулли проводились на глубине 1,5 метра (рис. 6). Стоит отметить, что при работе присоски под водой возникает воздушный пузырь, внутри которого и происходит создание области пониженного давления. При его деформации и сильном уменьшении размеров пузыря уровень вакуума может падать практически до нулевых значений. Такая деформация может вызываться динамикой жидкости при наличии течения воды.

Проведение эксперимента

Ранее были получены динамические характеристики образования заданного разрежения под вакуумными присосками эжекторного типа в воздушной (рис. 7) и водной (рис. 8) среде.

Во время проведения эксперимента с присоской Бернулли также были получены характеристики образования заданного разрежения в области вакуумирования в воздушной (рис. 9) и водной (рис. 10) среде.

Давление питания как при испытании вакуумной присоски эжекторного типа, так и присоски Бернулли было 6 атм. Из графиков видно, что значение разрежения в различных средах в вакуумной присоске

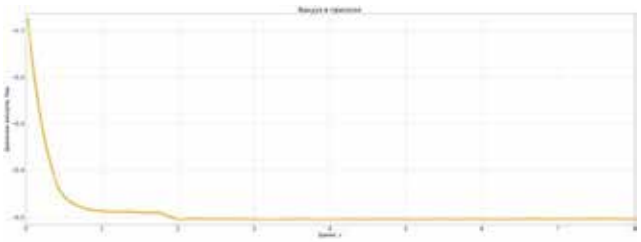


Рис. 7. Время образования заданного разрежения в области вакуумирования в воздушной среде

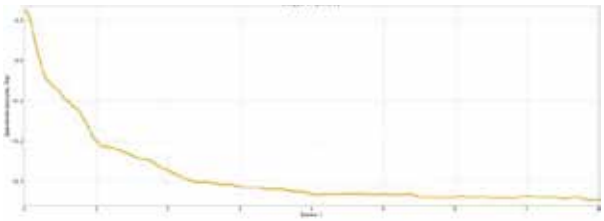


Рис. 8. Время образования заданного разрежения в области вакуумирования в водной среде

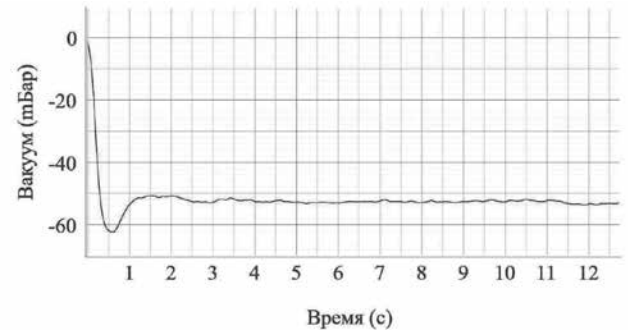


Рис. 9. Время образования заданного разрежения в области вакуумирования присоски Бернулли в воздушной среде

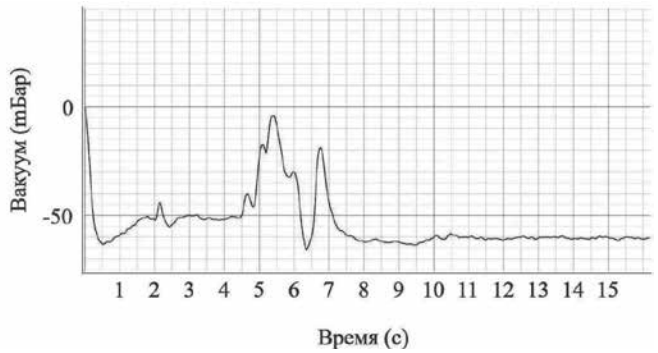


Рис. 10. Время образования заданного разрежения в области вакуумирования присоски Бернулли в водной среде

равно -0,5 Бар, а для присоски Бернулли оно равнялось -0,05 Бар, что в 10 раз меньше. Однако время образования разрежения в воздушной среде у присоски Бернулли 0,5 секунды, а у присоски эжекторного типа 2 секунды. В водной среде время образования разрежения у присоски Бернулли также 0,5 секунды, в то время как у присоски эжекторного типа уже 4 секунды. Так же на рис. 8 в интервале времени 5–7 секунд происходило резкое падение уровня вакуума почти до нулевых значений, что было вызвано легким отклонением рабочей поверхности присоски от положения, параллельного поверхности. Применение присосок Бернулли возможно на поверхностях с малой кривизной и в ситуациях, когда не происходит сильной деформации воздушного пузыря вокруг присоски.

Заключение

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что хотя при одинаковом питающем давлении сжатого воздуха присоска Бернулли показала нагрузочные характеристики, в 10 раз меньшие по сравнению с вакуумной присоской эжекторного типа, скорость установления рабочего уровня вакуума присоски Бернулли менее подвержена влиянию окружающей среды, так как при ее работе в водной среде не происходит увеличения временных характеристик. Это позволяет сделать предположение, что использование присосок Бернулли в качестве захватных устройств на мобильных робототехнических устройствах возможно, но только в качестве легких инспекционных роботов, в условиях слабых внешних течений воды или их отсутствия.

Гранты и программы

Работа выполнена по теме государственного задания «Динамика сложных механических систем, управление движением летательных аппаратов и подвижных объектов, робототехника и биомеханика, микромеханика, механика навигационных и гироскопических систем» (№ госрегистрации 124012500443-0).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бояринов А.Ю., Литвинова О.В. Перспективы освоения арктического шельфа // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. №2 (104). https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.2.034.
2. Сидоров К., Морозов Г. Своя Арктика // Вокруг света. 2016. № 11 (2914). С. 80–87. ISSN 0321-0669.
3. Albitar H., Dandan K., Ananiev A., Kalaykov I. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2016. https://doi.org/10.5772/62060.
4. Park Y.S., Park G.Y., Yoon J., Lee B.J., Oh W.Z. Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor. In: Zelinsky A. (ed) Field and Service Robotics. Springer, 1998, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38
5. Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н., Чащухин В.Г. Экспериментальные исследования газодинамических и гидродинамических процессов, происходящих в вакуумных захватных устройствах, функционирующих в различных средах // Робототехника и техническая кибернетика. 2025. Т. 13, № 4. С. 285–292.
6. Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Система управления испытательным стендом для исследования влияния нормальных знакопеременных воздействий на скорость образования разрежения в полости вакуумного захвата в водной среде // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4, ч. 1. С. 139–145. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.038.
7. Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Экспериментальные исследования сцепления с поверхностью вакуумных захватных устройств в различных средах // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4, ч. 4. С. 25–32. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.076
8. https://content2.smcetech.com/pdf/ZNC-B_EU.pdf
9. https://docs.smarta.ru/catalogues/PNA/5_Vacuum_SMARTA_2025.pdf

Сведения об авторах:

КНЯЗЬКОВ Максим Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории робототехники и мехатроники
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
Адрес: 119526, Москва, проспект Вернадского 101-1
Область научных интересов: робототехника и мехатроника
E-mail: ipm_labrobotics@mail.ru
Тел.: 8 (495) 433-77-66
ORCID: 0000-0002-5863-4079

ОСТРИКОВ Павел Павлович, ведущий программист лаборатории робототехники и мехатроники
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
Адрес: 119526, Москва, проспект Вернадского 101-1
Область научных интересов: робототехника и мехатроника
E-mail: ostricov93@yandex.ru
Тел.: 8 (495) 433-77-66
ORCID: 0009-0000-7569-1246

СЕМЕНОВ Евгений Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории робототехники и мехатроники
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
Адрес: 119526, Москва, проспект Вернадского 101-1
Область научных интересов: робототехника и мехатроника
E-mail: sim1165@mail.ru
Тел.: 8 (495) 433-77-66
ORCID: 0000-0002-6196-1433

СУХАНОВ Артем Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории робототехники и мехатроники
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
Адрес: 119526, Москва, проспект Вернадского 101-1
Область научных интересов: робототехника и мехатроника
E-mail: sukhanov-artyom@yandex.ru
Тел.: 8 (495) 433-77-66
ORCID: 0000-0002-4122-492X

Для цитирования:

Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н. ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВАКУУМНОЙ ПРИСОСКИ БЕРНУЛЛИ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 17–23. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_02. EDN: YVRDHB.

DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_02

RESEARCH OF THE OPERATION MODES OF THE BERNULLI VACUUM SUCTION CUP IN VARIOUS ENVIRONMENTS

M.M. Knyazkov, P.P. Ostricov, E.A. Semenov, A.N. Sukhanov

The article presents a study on the operation modes of the Bernoulli suction cup in various environments. It provides experimental comparative characteristics of vacuum suction cups using an air ejector and a Bernoulli suction cup as vacuum generators in air and water environments. The article also explores the potential use of Bernoulli suction cups as vacuum grippers on mobile robots that navigate on randomly oriented surfaces in various environments located on marine-based facilities. This is due to the need to maintain these objects in environments where manual labor is either dangerous or too expensive. The use of such devices allows mobile robots to attach themselves and move on surfaces that do not have ferromagnetic properties. Experimental characteristics were obtained on a specially created laboratory installation, which allows to remove the characteristics of the level of rarefaction in the vacuuming area of the suction cups in the air, water and border environments. The installation allows to test different types of suction cups in the water environment at a depth of up to two meters. On this installation, full-scale tests of different types of suction cups were carried out at different levels of the compressed air feeding pressure.

Keywords: Bernoulli suction cup, vacuum gripping devices, vacuum generator, transient processes, mobile vertical movement robot, experimental bench, water and air environment, gas-dynamic and hydro-dynamic processes.

References

1. Boyarinov A.Yu., Litvinova O.V. Perspektivy osvoeniya arkticheskogo shel'fa // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2021. No. 2 (104). https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.2.034

2. Sidorov K., Morozov G. Svoya Arktika // Vokrug sveta. 2016. No. 11 (2914). P. 80–87. ISSN 0321-0669

3. Albitar H., Dandan K., Ananiev A., Kalaykov I. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2016. https://doi.org/10.5772/62060.

4. Park Y.S., Park G.Y., Yoon J., Lee B.J., Oh W.Z. Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor. In: Zelinsky A. (ed) Field and Service Robotics. Springer, 1998, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38

5. Bel'chenko F.M., Knyaz'kov M.M., Ostrikov P.P., Semenov E.A., Suhanov A.N., CHashchuhin V.G. Eksperimental'nye issledovaniya gazodinamicheskih i gidrodinamicheskih processov, proiskhodyashchih v vakuumnyh zahvatnyh ustrojstvah, funkcioniruyushchih v razlichnyh sredah // Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. 2025. T. 13, No. 4. P. 285–292.

6. Bel'chenko F.M., Knyaz'kov M.M., Ostrikov P.P., Semenov E.A., Suhanov A.N. Sistema upravleniya ispytatel'nym stendom dlya issledovaniya vliyaniya normal'nyh znakoperemennyh vozdejstvij na skorost' obrazovaniya razrezheniya v polosti vakuumnogo zahvata v vodnoj srede // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2025. No. 4, ch. 1. P. 139–145. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.038.

7. Bel'chenko F.M., Knyaz'kov M.M., Ostrikov P.P., Semenov E.A., Suhanov A.N. Eksperimental'nye issledovaniya scepleniya s poverhnost'yu vakuumnyh zahvatnyh ustrojstv v razlichnyh sredah // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2024. No. 4, ch. 4. P. 25–32. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.076

8. https://content2.smcetech.com/pdf/ZNC-B_EU.pdf

9. https://docs.smarta.ru/catalogues/PNA/5_Vacuum_SMARTA_2025.pdf

Recommended citation:

Knyazkov M.M., Ostricov P.P., Semenov E.A., Sukhanov A.N. RESEARCH OF THE OPERATION MODES OF THE BERNULLI VACUUM SUCTION CUP IN VARIOUS ENVIRONMENTS. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2026. No. 3 (57). C. 17–23. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_02. EDN: YVRDHB.

Information about the authors

KNYAZ'KOV Maksim M., Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences
Address: Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526.
Scientific interests: Robotics and Mechatronics
Phone : +74954337766,
E-mail: ipm_labrobotics@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5863-4079

OSTRIKOV Pavel P., lead programmer, Laboratory of Robotics and Mechatronics
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences
Address: Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526.
Scientific interests: Robotics and Mechatronics
Phone : +74954337766,
E-mail: ostricov93@yandex.ru
ORCID: 0009-0000-7569-1246

SEMENOV Evgeniy A., Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences
Address: Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526.
Scientific interests: Robotics and Mechatronics
Phone : +74954337766,
E-mail: sim1165@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6196-1433

SUKHANOV Artem N., Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences
Address: Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526.
Scientific interests: Robotics and Mechatronics
Phone : +74954337766
E-mail: sukhanov-artyom@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-4122-492X

УДК 534.231
EDN: ZOSACA
DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_03

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА

Н.В. Злобина, С.Б. Касаткин

Представлена спектральная обработка экспериментальных данных,полученных разнесенной приемной системой на основе комбинированных приемников. В рассмотренных экспериментах изменялось расстояние между движущимся объектом и приемной системой, горизонт позиционирования движущегося подводного объекта, горизонт позиционирования приемной системы. Целью анализа является определение сигнальных составляющих малошумного объекта и других особенностей звукового поля источника в условиях мелкого моря и при наличии шумов ближнего судоходства с помощью скалярного,векторного и тензорного описания звукового поля.

Ключевые слова: комбинированный приёмник, мелкое море, спектральная плотность мощности, вектор интенсивности, обработка сигналов

Введение

Значительное место в прикладной гидроакустике занимает проблема обнаружения подводных источников звука. В последнее время все чаще в задачах обнаружения используются векторные приемники или комбинированные гидроакустические приемники, позволяющие измерять скалярно-векторные характеристики звукового поля, что значительно расширяет объём информации о звуковом поле шумящих объектов [1–5].

Обнаружение движущихся малошумных источников, шумовое поле которых представлено как сплошным спектром, так и отдельными дискретными составляющими, связано со сложным процессом поведения сигнальной составляющей объекта [6]. В условиях мелкого моря суммарное звуковое поле в волноводе характеризуется набором нормальных волн с различными фазовыми и групповыми скоростями, имеющих индивидуальную зависимость от частоты, физических и геометрических параметров волновода. При движении источника поле сигнальной составляющей суммарного шумового процесса в реальной морской среде приобретает характер нестационарного случайного 3*D* процесса с плохо предсказуемой статистикой. Отличительные особенности реального источника от модельного (точечного) в условиях свободного (модельного) пространства состоят в следующем:

- Пространственная структура звукового поля в волноводе формируется интерференцией нормальных волн с периодом от половины длины волны на рабочей частоте до сотен длин волн.
- Пространственно-частотная структура звукового поля в волноводе характеризуется наличием и знаком инварианта, определяющего направление изолиний максимальной интенсивности на плоскости частота – расстояние между источником и приемной системой.
- Фазовая структура звукового поля в волноводе характеризуется плохо предсказуемой нелинейной составляющей зависимости от расстояния. Наибольший хаос вносит вихревая особенность вектора интенсивности, т.е. дислокация фазового фронта [7, 8].
- Составляющие вектора интенсивности (вещественная и мнимая) соизмеримы по величине на любом расстоянии от источника. Ненулевая реактивная составляющая, сопоставимая с активной составляющей, указывает на то, что в поле источника присутствуют как бегущие (расходящиеся), так и стоячие волны (сходящиеся волны отдачи).

В статье поставлена задача определения характеристик движущегося подводного источника с помощью приемных модулей, состоящих из комбинированных гидроакустических приемников, и представлены результаты обработки данных трех экспериментов. Измерения выполнялись на акватории залива Петра Великого Японского моря в условиях мелкого моря.

Анализ экспериментальных данных с движущимся подводным источником

Для проведения первого эксперимента в северной части акватории (Уссурийский залив) в углах треугольника на расстоянии 1200 м друг от друга были установлены 3 приемных модуля: ПМ1, ПМ2, ПМ3, согласно рис. 1. Приемники располагались на середине горизонта волновода с глубиной 43-47 м. Векторные каналы приемника XY были ориентированы вдоль осей волновода. Подводный источник с постоянной скоростью 1м/с и переменным горизонтом позиционирования выполнял рабочую миссию с приближением к каждому модулю. Время, указанное на рис. 1, соответствует максимальному сближению между источником и приемником.

Экспериментальные данные, полученные в районе проведения измерений, содержат шумы ближнего судоходства на всей частотной полосе, доступной для анализа. Структура распределения плотности мощности энергии в момент времени 14.30 (начало движения источника к ПМ3) на рис. 2 показана красной линией. Ее уровень изменяется от -85 дБ до -90 дБ. Плотность мощности энергии в момент времени 14.40 (половина пройденного пути) показана зеленой линией. Ее уровень соответствует -85дБ. Уровень плотности мощности энергии в момент траверза 14.47 (синяя линия) источника сигнала и приемного модуля является максимальным и соответствует значению -80дБ. Процесс приближения источника к приемному модулю можно продемонстрировать только на ПМ3, который расположен в самом малошумном месте.

Экспериментальная оценка энергетической структуры звукового поля движущегося подводного источника получена с помощью спектральной обработки данных и использования мультипликативных алгоритмов для набора из 16 информативных параметров звукового поля [9, 10]. При оценке энергетической структуры использовались скалярные, векторные и тензорные величины: квадрат звукового давления p^2, три компоненты вещественной составляющей вектора интенсивности $\mathrm{Re}(pv_i^*)$, три компоненты мнимой составляющей вектора интенсивности $\mathrm{Im}(pv_i^*)$, три компоненты ротора вектора интенсивности $rot_i I$, три компоненты вещественной составляющей вектора градиента давления и три компоненты мнимой составляющей вектора градиента давления.

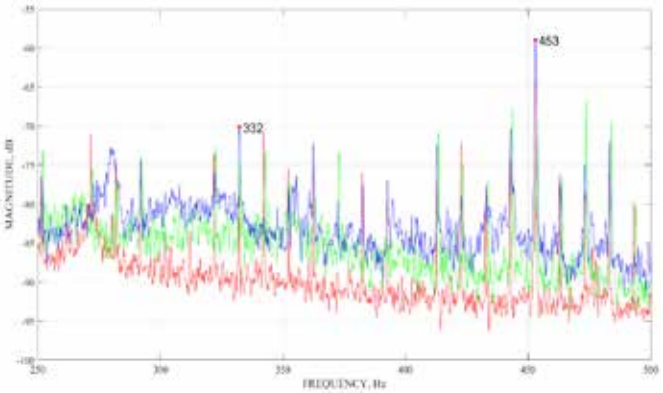


Рис. 2. Структура уровней плотности мощности энергии движущего источника в полосе частот 250–500 Гц

Наглядное представление изменчивости уровней энергии звукового поля показано на 3-мерных спектрограммах (частота, время и уровень) на рис. 3. Горизонтальные линии с повышенным уровнем, идущие параллельно оси времени, соответствуют дискретным составляющим различных источников шума. При обработке сигнала применялся нелинейный алгоритм выделения помехи из суммарного процесса

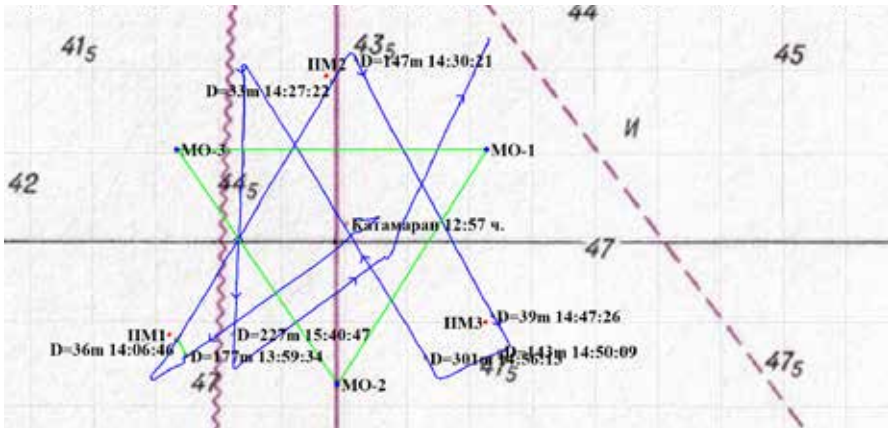


Рис. 1. Карта постановки приемных модулей ПМ1, ПМ2, ПМ3 и миссии аппарата (синяя линия)

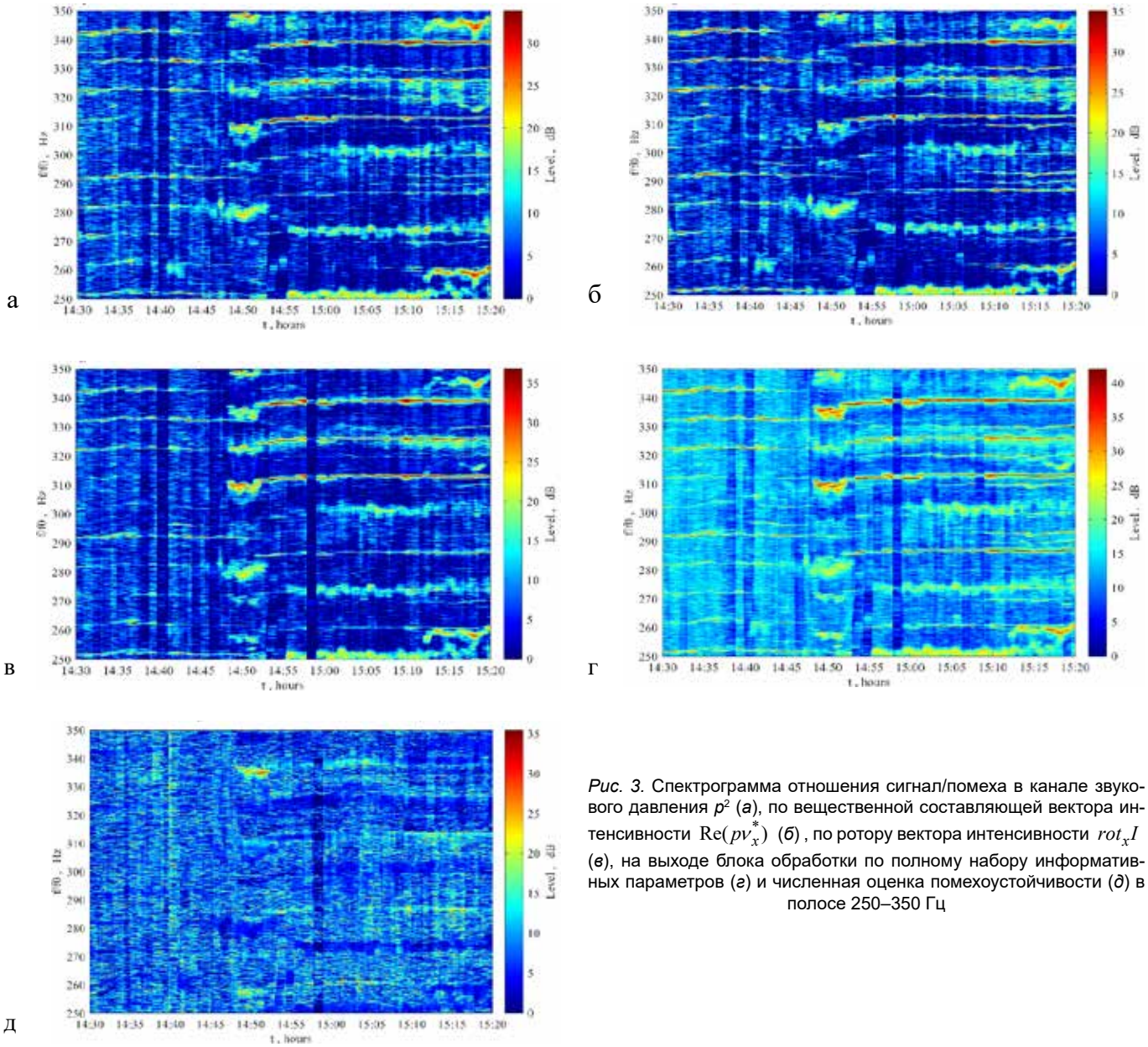


Рис. 3. Спектрограмма отношения сигнал/помеха в канале звукового давления p^2 (*а*), по вещественной составляющей вектора интенсивности $\mathrm{Re}(pv_x^*)$ (*б*), по ротору вектора интенсивности $rot_x I$ (*в*), на выходе блока обработки по полному набору информативных параметров (*г*) и численная оценка помехоустойчивости (*д*) в полосе 250–350 Гц

«сигнал+помеха». Для уменьшения помехи применялась функция оконного сглаживания со следующими настройками: время усреднения 50 с, ширина окна 16,4 с, перекрытие 50%. Численная оценка помехоустойчивости определялась как результат выигрыша отношения сигнал/помеха в векторных каналах по сравнению с отношением сигнал/помеха в канале звукового давления с нормировкой на дисперсию.

Перечисленные информативные параметры, определённые в одном и том же звуковом поле, могут быть коррелированы между собой при больших интервалах усреднения. Пространственная структура для каждого информативного параметра, нормированного на соответствующую помеху, имеет особенности локальной интерференционной структуры, пространственные масштабы которой изменяются в широких пределах, что наглядно показано на рис. 3. Использование процедуры усреднения временным окном по каждому информативному параметру не гарантирует постоянно высокого значения отношения сигнал/помеха в частотной и временной областях. Однако многоканальность приемной системы, как и большой набор информативных параметров, можно использовать для получения максимально возможного выигрыша в отношении сигнал/помеха в частотной и временной областях с помощью компаратора, что подтверждается рис. 3, *г*. Представленное поле сформировано на выходе блока спектральной обработки всех параметров в компараторе по критерию максимального отношения сигнал/помеха. Струк-

тура поля по давлению (рис. 3, *а*) содержит максимальные уровни сигнальной составляющей, более 30 дБ. Структура поля по вещественной компоненте вектора интенсивности в горизонтальной плоскости на рис. 3, *б* и по ротору вектора интенсивности на рис. 3, *в* содержит максимальные уровни сигнальной составляющей, превышающие 35 дБ. Уровни поля сигнальной составляющей на выходе компаратора составляют более 40 дБ (рис. 3, *г*). Численная оценка помехоустойчивости комбинированного приемника в 20–25 дБ представлена на рис. 3, *д* с зонами локального увеличения значения.

По выделяемым отдельным дискретным составляющим, например 332 Гц на рис. 2, и на спектрограммах на рис. 3 можно рассчитать проходные характеристики, которые построены в логарифмическом масштабе для суммарного процесса $(S+N)$ (красная линия) и помехи N (синяя линия).

Уровень суммарного знакопостоянного процесса в канале звукового давления (рис. 4, *а*, верхний график) имеет максимальное значение при нахождении приемника на траверзе движущегося объекта (время 14.45–14.50), при этом значение отношения сигнал/помеха минимально по сравнению со значением в векторных каналах. Изменение уровня в канале звукового давления обусловлено приближением или удалением источника. Во всех векторных каналах поведение суммарного процесса и помехи по вещественной компоненте вектора интенсивности имеет знакопеременный вихревой характер. Уровни активной составляющей в горизонтальной плоскости и в вертикальном канале соизмеримы по величине на любом расстоянии от источника. Особенность поведения вещественной компоненты вектора интенсивности заключается в эффектах компенсации потоков мощности. Резкое пиковое увеличение значения отношения сигнал/помеха на рис. 4, *б* возникает при компенсации потоков мощности в поле помехи. Эффект компенсации потоков мощности в суммарном поле приводит к резкому падению отношения сигнал/помеха. Процедура усреднения естественным образом сглаживает флуктуации суммарного процесса и в поле сигнала, и в поле помехи, но некоторые флуктуации остаются и после процедуры усреднения.

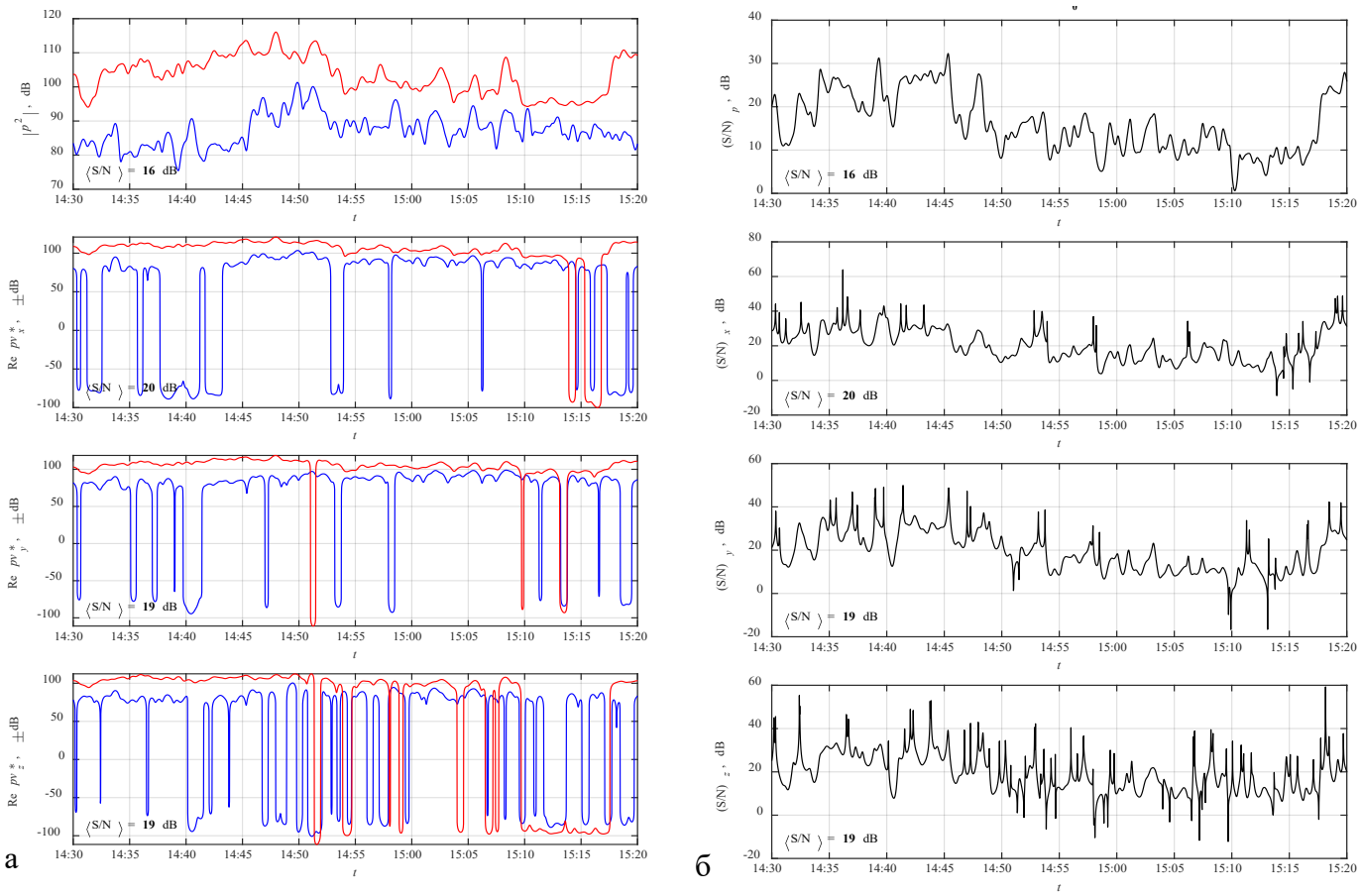


Рис. 4. Результат расчета проходных характеристик на частоте 332 Гц в каналах комбинированного приемника (*а*) и результат вычисления отношения сигнал/помеха (*б*) в каналах комбинированного приемника

Анализ экспериментальных данных для подводного источника с изменяющимся горизонтом движения

Данные второго эксперимента были получены в Уссурийском заливе при работе с приемной системой на основе комбинированных приемников. Подводный объект совершал круговые движения с вертикальным заглублением по спирали вблизи приемной системы с постоянным горизонтом позиционирования (рис. 5).

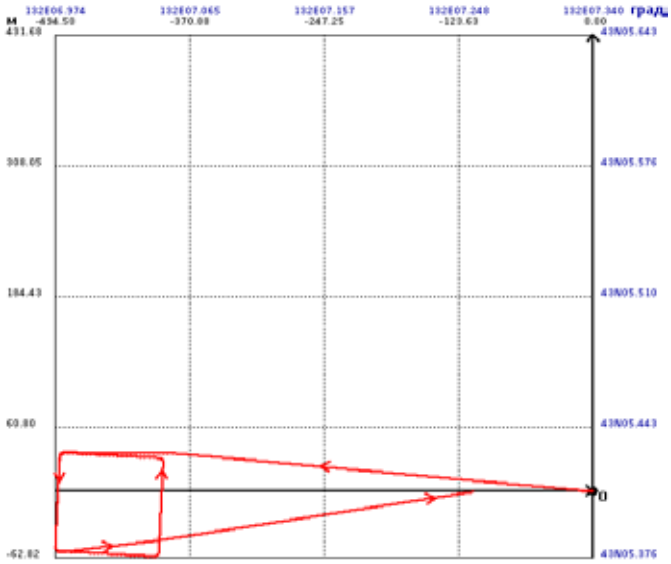
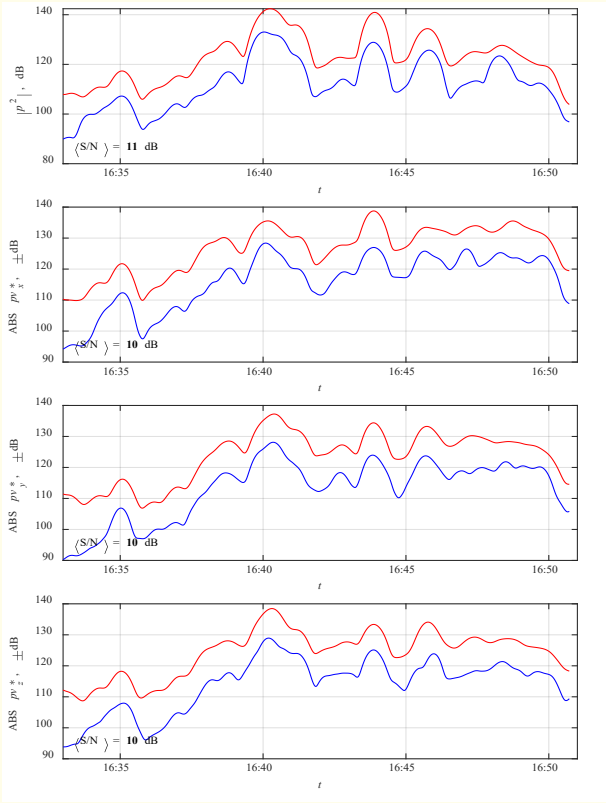


Рис. 5. Карта движения подводного объекта с вертикальным заглублением

Движению подводного объекта со спиральным заглублением присуща широкополосная сигнальная составляющая с отдельными дискретами повышенного уровня, что показано на рис. 6, *а* в канале звукового давления и в вертикальном векторном канале приемника.

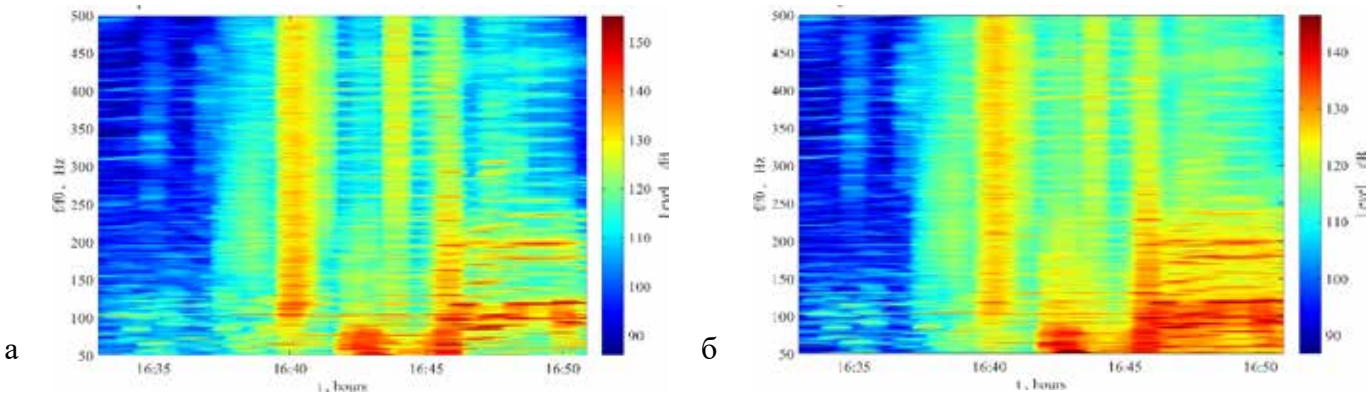


а

Рис. 7. Проходные характеристики на частоте 332 Гц в каналах

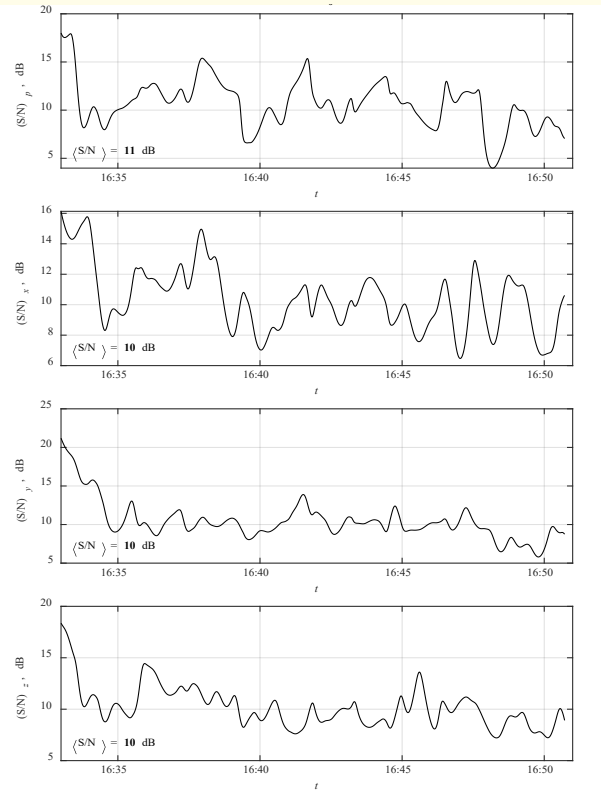
Результат расчета проходных характеристик на частоте 332 Гц в логарифмическом масштабе по звуковому давления и абсолютной величине вектора интенсивности, построенных для суммарного процесса $(S+N)$ (красная линия) и выделенной из суммарного процесса помехи N (синяя линия), а также значение отношения сигнал/помеха представлены на рис. 7.

Результаты обработки данных показывают, что наблюдается изменение уровня суммарного



а б

Рис. 6. Спектрограмма в канале звукового давления p^2 (*а*), по вещественной составляющей вектора интенсивности $\mathrm{Re}(pv_z^*)$ вертикального канала (*б*)



б

комбинированного приемника (а) и отношение сигнал/помеха (б) в каналах комбинированного приемника

процесса и помехи при изменении расстояния между подводным объектом и приемной системой, а также при спиральном заглублении объекта, т.е. приближении к горизонту позиционирования приемной системы.

Анализ экспериментальных данных с тональным источником и глайдером с изменяющимся горизонтом позиционирования

Третий эксперимент проводился в акватории Уссурийского залива в 2025 г. в районе, удаленном от проходящих судов. Схема эксперимента показана на рис. 8. Электромагнитный излучатель на научно-исследовательском судне «Юрий Молоков» располагался на горизонте 20 м, соответствующем середине глубины волновода. Глайдер, оснащенный парой комбинированных приемников, опускался с заякоренной резиновой лодки и равномерно перемещался по всей глубине волновода (33 м). Каждый спуск и подъем глайдера фиксировался в журнале действий. За время эксперимента было выполнено 2 коротких (3–5мин) и 2 затяжных (30 мин) спуска-подъема глайдера. Расстояние между приемной (GLIDER) и излучающей (MOLOKOV) системами составляло 3,9 км.

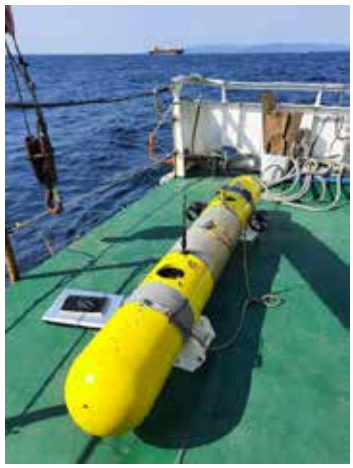


Рис. 8. Район проведения экспериментальных исследований от 19.09.2025 г. и внешний вид глайдера

В данных приемной системы присутствуют шумы ближнего судоходства, поэтому спектральный анализ сводится к узкополосной обработке и вычислению проходных характеристик по выбранным частотам тонального электромагнитного излучателя.

Для выбранной частотной полосы 40–41 Гц с максимальным отношением сигнал/помеха в канале Y приведен результат вычисления проходных характеристик, представленный на рис. 10, *а*; для суммарного процесса $(S+N)$ (красная линия) и выделенной помехи N (синяя линия), для канала звукового давления $|p|^2$ (верхний график) и для векторных каналов $\mathrm{Real}(pv_x^*)$, $\mathrm{Real}(pv_y^*)$, $\mathrm{Real}(pv_z^*)$. Вещественной компоненте вектора интенсивности соответствуют волны, распространяющиеся от источника. В векторных каналах для суммарного процесса и

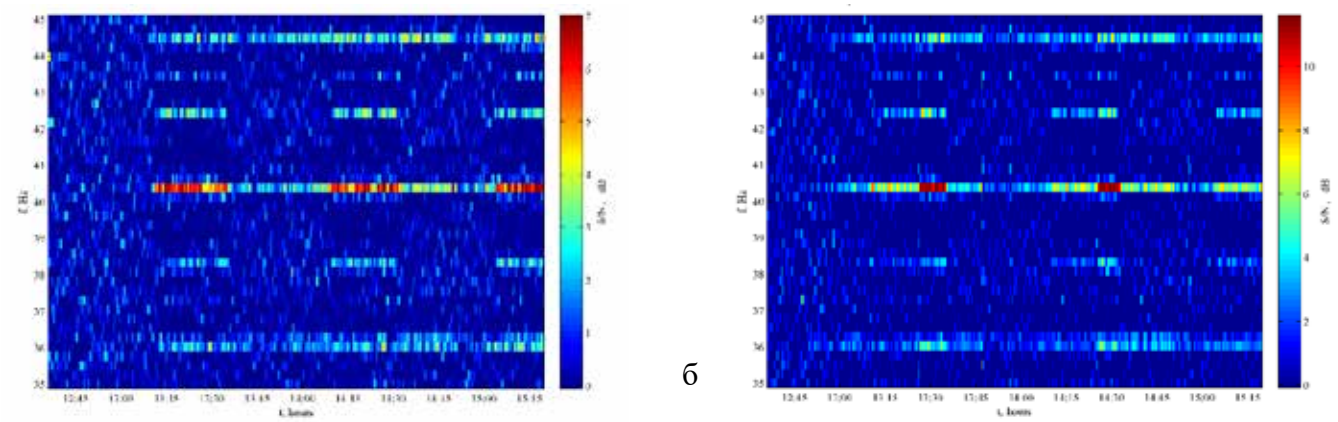


Рис. 9. Спектрограмма отношения сигнал/помеха в горизонтальной плоскости по вещественной компоненте вектора интенсивности $\mathrm{Re}(pv_x^*)$ (*а*) и $\mathrm{Re}(pv_y^*)$ (*б*) в диапазоне 35–45 Гц носового приемника № 16

помехи характерен знакопеременный характер, обусловленный вихревой составляющей вектора интенсивности. Флуктуация уровней этих двух процессов в зависимости от перемещения глайдера по глубине волновода наблюдается только в канале звукового давления.

Проходные характеристики на рис. 10, *б* вычислены для канала звукового давления $|p|^2$ (верхний график) и абсолютной магнитуды интенсивности $\mathrm{ABS}(pv_i^*)$; на графике, соответствующем вертикальному векторному каналу (рис. 10, *б*, нижний график) нанесены траектории перемещения глайдера по глубине. Абсолютная магнитуда вычислена как для бегущих, так и для стоячих волн, соответствующих вещественной и мнимой частям (pv_i^*). Флуктуация уровней суммарного процесса и помехи во всех каналах приемника хорошо соотносятся с вертикальными перемещениями глайдера, которые обозначены на графике для вертикального канала (рис. 10, *б*, нижний график).

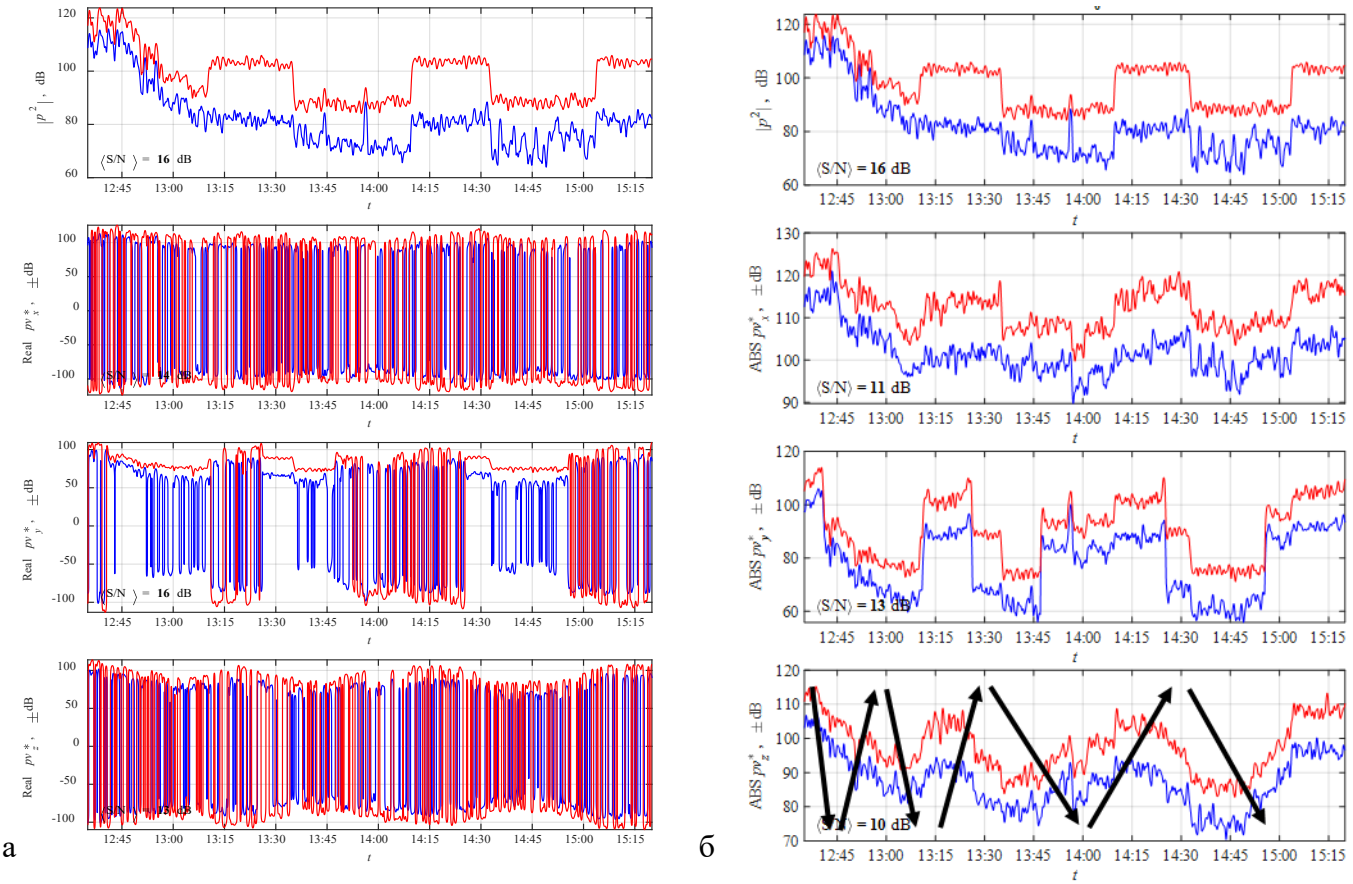


Рис. 10. Проходные характеристики в каналах комбинированного приемника в полосе частот 40–41 Гц

Заключение

Выполнен спектральный анализ экспериментальных данных, полученных приемной системой на основе 4-канальных комбинированных приемников. В качестве источника сигналов выступали подводный движущийся объект с различными горизонтами работы и тональный излучатель. В качестве приемной системы использовались как стационарная система на основе комбинированных приемников с постоянным горизонтом работы, так и глайдер с установленной на нем парой приемников, равномерно движущийся по всей глубине волновода. Спектральный анализ высокого разрешения позволил определить отдельные дискретные составляющие на фоне помехи.

Сигнальная составляющая как полученная в каналах приемника, так и вычисленная по полному набору информативных параметров есть нестационарный случайный 3*D* процесс. Показано, что эффекты компенсации потоков мощности, наблюдаемые в векторном поле помехи, значительно увеличивают диапазон изменений отношения сигнал/помеха. Процедура выделения сигнальной составляющей в каждом канале дает собственную численную оценку отношения сигнал/помеха. Использование приведенного полного набора информативных параметров, которые можно сформировать на выходе блока спектральной обработки и компаратора, выделяющего параметр по критерию максимального отношения сигнал/помеха, суммарно увеличивают сигнальную составляющую на выходе комбинированного приемника, т.е. увеличивают вероятность правильного обнаружения полезного сигнала.

Проведенный спектральный анализ полученных экспериментальных данных позволил получить наиболее полное описание особенностей поля источника в реальном волноводе, выигрыш в подавлении помехи и повышение отношения сигнал/помеха в каналах комбинированного приемника.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИПМТ ДВО РАН Е.М. Калистратову, Ю.Г. Ларионову, Е.А. Гетману, принимавшим участие в морских экспериментах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скребнёв Г.К. Комбинированные гидроакустические приёмники. С-Пб.: Элмор, 1997. 200 с.
2. Лукин Г.С. Разработка многоканального устройства преобразования и передачи информации, получаемой с комбинированного гидроакустического приёмника // Наука, техника и образование. 2016. № 11(29). С. 60–62.
3. Каменев С.И. Методы и средства измерения кинематических характеристик акустических волноводов // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 4(54). С. 77–83.
4. Казаков М.Н. Оценка целесообразности использования приёмников колебательной скорости в многоканальных гидроакустических системах // Наука, техника и образование. 2018. № 5 (46). С. 19–22.
5. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 479 с.
6. Стаценко Л.Г., Кузин Д.А. Спектральные признаки гидроакустических шумов в решении задач классификации подводных объектов // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2021. № 4(49). С. 28–38.
7. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 837–843.
8. Журавлёв В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Потоки энергии в окрестности дислокаций фазового фронта // ЖЭТФ. 1993. Т. 104, вып. 5(11). С. 3769–3783.
9. Касаткин Б.А. Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Обнаружение и идентификация малошумного движущегося источника на фоне шумов ближнего судоходства в мелком море // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3–1. С. 205–211.
10. Zlobina N., Kasatkin S. Physical principles of implementing increased noise immunity of a combined receiver based on marine // Proceeding of 2025 International Conference on Ocean Studies (ICOS). Vladivostok, 2025. P. 45–48.

Справка об авторах

ЗЛОБИНА Надежда Владимировна, г. н. с., д. т. н.
Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева ДВО РАН
Адрес места работы: г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Область научных интересов: фундаментальная и прикладная гидроакустика
Тел. +7 (423) 243-24-16
E-mail: zlobina@marine.febras.ru
ORCID: 0000-0003-3314-2163

КАСАТКИН Сергей Борисович, в. н. с., к. физ.-мат. н.
Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева ДВО РАН
Адрес места работы: г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Область научных интересов: постановка морских экспериментов, спектральная обработка, эксплуатация глайдера в мелком море
Тел. +7 (423) 243-24-16
E-mail: bigcezar@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0945-8355

Для цитирования:

Злобина Н.В., Касаткин С.Б. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 24–32. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_03. EDN: ZOSACA.

DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_03

EXPERIMENTAL STUDY OF THE SOUND FIELD OF MOVING SOURSE

N.V. Zlobina, S.B. Kasatkin

This paper presents spectral processing of experimental data obtained by a diversity receiving system based on combined receivers. In the experiments the distance between the moving object and the receiving system, the positioning horizon of the moving underwater object, and the positioning horizon of the receiving system were varied. The goal of the analysis is to determine the signal components of a low-noise object and other characteristics of the source's sound field in shallow water conditions and in the presence of nearby shipping noise using scalar, vector, and tensor descriptions of the sound field.

Keywords: combined receiver, shallow water, power spectral density, intensity vector, signal processing.

References

1. Skrebnev G.K. Combined hydroacoustic receivers. St. Petersburg: Elmor, 1997. 200 p.
2. Lukin G.S. Development of a multi-channel device for converting and transmitting information received from a combined hydroacoustic receiver // Science, Technology and Education. 2016. No. 11(29). P. 60–62.
3. Kamenev S.I. Methods and means for measuring the kinematic characteristics of acoustic waveguides // Underwater investigations and robotics. 2025. No. 4 (54). P. 77–83.
4. Kazakov M.N. Evaluation of the feasibility of using particle velocity receivers in multichannel hydroacoustic systems // Science, Technology and Education. 2018. No. 5 (46). P. 19–22.
5. Gordienko V.A. Vector-phase methods in acoustics. Moscow: Fizmatlit, 2007. 479 p.
6. Statsenko L.G., Kuzin D.A. Spectral features of hydroacoustic noise in solving problems of classification of underwater objects // Bulletin of the FEFU Engineering School. 2021. No. 4(49). P. 28–38.
7. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vortexes of Acoustic Intensity in Shallow Sea // Akust. Zh 2011. Vol. 57, No. 6. P. 837–843.
8. Zhuravlev V.A., Kobozev I.K., Kravtsov Yu.A. Detecting dislocations by measuring the energy flux of an acoustic field // JETP. 1993. Vol. 104, No. 5. P. 808–814.
9. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B. Detection and identification of a low-noise source against the background of noise from short-range shipping in shallow sea // Marine Intellectual Technologies. 2022. No. 3–1(57). P. 205–211.
10. Zlobina N., Kasatkin S. Physical principles of implementing increased noise immunity of a combined receiver based on marine / Proceeding of 2025 International Conference on Ocean Studies (ICOS). Vladivostok, 2025. P. 45–48.

Information about the authors

ZLOBINA Nadezhda Vladimirovna, Chief Researcher, Dr. Sc.
Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences
Work address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5
Research interests: fundamental and applied hydroacoustics
Phone : +7 (423) 243-24-16. **E-mail**: zlobina@marine.febras.ru
ORCID: 0000-0003-3314-2163,

KASATKIN Sergey Borisovich, Leading Researcher, Ph. D.
Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences
Work address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5
Research interests: setting up marine experiments, spectral processing, glider operation in shallow waters
Phone : +7 (423) 243-24-16. **E-mail**: bigcezar@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0945-8355

УДК 534.232:534.8
EDN: ZSOFXZ
DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_04

РЕГИСТРАЦИЯ МОДУЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

С.А. Шпак, К.П. Бойко, В.С. Колмогоров

Одним из важнейших свойств подводных морских объектов является их скрытность. Подводный шум морского объекта является её демаскирующим фактором. По характерным особенностям шума морского объекта возможно определение класса морского объекта и определение элементов его движения. К основному направлению повышения эффективности регистрации первичного поля малошумных подводных объектов следует отнести расширение номенклатуры измеряемых характеристик, включая спектральные, в том числе и модуляционные характеристики. В статье рассматриваются модуляционные характеристики первичного гидроакустического поля морского объекта, полученные экспериментально в мелком море. Моделирование акустического поля, создаваемое точечным источником широкополосного сигнала в морском волноводе, подтвердило формирование частотно-пространственной модуляции широкополосного сигнала в мелководной акватории за счет интерференции прямого и отраженного от поверхности моря сигнала. Моделирование показало, что для регистрации частотно-пространственной модуляции широкополосного сигнала в мелководной акватории при малых траверзных расстояниях прохода морского объекта необходимо использование распределенных в вертикальной плоскости приемников. Показано, что регистрация модуляционных характеристик шумоизлучения морских объектов в виде дискретных составляющих спектра демодулированного сигнала возможна с использованием гомоморфной фильтрации на основе кепстральной обработки сигнала.

Ключевые слова: первичное гидроакустическое поле, частотно-пространственная интерференция, модуляционные характеристики, кепстральная обработка сигнала, гомоморфная фильтрация.

Введение

Уровни и спектральный состав подводного шума, излучаемого морскими объектами, в настоящее время стоят в одном ряду с такими традиционно важными тактико-техническими их характеристиками, как скорость полного хода, живучесть энергетической установки, параметры вооружения и т.д. В соответствии с этим задача измерения акустических параметров морских объектов является одной из важнейших [1, 2].

Малошумные морские объекты (ММО), и в частности автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), способны выполнять поставленные задачи как в океане, так и в мелководных морских районах, которые имеют специфику формирования первичного гидроакустического поля (ПГАП) из-за наличия и существенного влияния поверхности и дна морской акватории.

Как показали экспериментальные исследования, основной вклад в шумоизлучение АНПА при движении в мелководной акватории вносит кавитационный шум винтов [3, 4], который имеет широкополосный характер, поскольку он образуется за счет коротких импульсных сигналов схлопывания воздушных пузырьков. Другой весомой причиной широкополосного шума движущегося АНПА является обтекание водой его корпуса. При этом турбулентными потоками воды кроме создания гидродинамического широкополосного шума возбуждаются резонансные колебания корпуса аппарата, добавляющие в шум АНПА дополнительные дискретные составляющие [3]. Поэтому широкополосный шум АНПА, имеющий высокоскоростные винты, является характерной особенностью шумоизлучения АНПА в мелководной акватории.

Широкополосный шум в условиях кавитации модулируется частотами вращения винтов АНПА,

создавая так называемый вально-лопастной звукоряд (ВЛЗР). При этом коэффициент модуляции существенно зависит от скорости вращения винта. Резкий рост коэффициента модуляции начинается со скорости, на которой появляется кавитация на гребном винте [3–6].

К модуляционным процессам в условиях многолучевости распространения акустических сигналов в морской среде следует также отнести интерференционные явления за счет сложения акустических лучей в точке приема.

Модуляционные характеристики шумоизлучения морских объектов, и в частности вально-лопастная модуляция и интерференционная модуляция, требуют оценки и регистрации при контроле уровня и спектрального состава ПГАП АНПА. В работе [7] рекомендуется к основному направлению повышения эффективности регистрации первичного поля малошумных подводных объектов отнести расширение номенклатуры измеряемых характеристик, включая модуляционные характеристики. Необходимость расширения номенклатуры измеряемых характеристик и контролируемых параметров гидроакустических полей морских объектов обусловлена возможностями иностранных средств обнаружения регистрировать модуляционные характеристики шумоизлучения, по которым возможны классификация морских объектов и определение их элементов движения [8].

Поэтому эффективность регистрации ПГАП малошумных подводных объектов в мелководных акваториях будет зависеть не только от повышения помехоустойчивости и точности измерений [7], но и за счет расширения номенклатуры измеряемых характеристик шумоизлучения, включая модуляционные характеристики ПГАП ММО.

1. Акустическое поле, создаваемое точечным источником широкополосного сигнала в морском волноводе

Существует два теоретических подхода к описанию акустического поля в мелком море – волновой подход и лучевой. Оба подхода используют функции, являющиеся решениями волнового уравнения.

В ряде работ анализируется акустическое поле, создаваемое широкополосным сигналом в морском волноводе, которое приводит к частотно-пространственной интерференции в морской среде. Так, в [9–12] показано, что акустическое поле может быть описано на основе волновой теории с использованием модовой структуры акустического поля. Благодаря дисперсии нормальных волн в морском волноводе формируется устойчивая интерференционная картина в переменных частота–расстояние или частота–время.

Но как показано в [13], при описании акустического поля лучевая теория более удобна, особенно для малых расстояний, где вклад мнимых источников высоких порядков быстро ослабевает из-за потерь при отражении от границ волновода. Это характерно для решения задач регистрации уровня и спектрального состава шумоизлучения морского объекта в мелководной акватории.

Одним из способов описания акустического поля в морском волноводе на основании лучевой теории является способ с использованием мнимых источников [9]. Акустическое поле в этом случае описывается путем сложения прямого и отраженных от границ акустического волновода широкополосных сигналов. При этом возникает виртуальная антенна, состоящая из мнимых источников звука.

Виртуальная антенна с определенным амплитудно-фазовым распределением по её апертуре имеет интерференционную зону (Френеля), размер которой определяется выражением $r = 2L/\lambda 2$, где L – размер виртуальной антенны, определяемый глубиной погружения АНПА ($h_и$), глубиной моря ($H_м$) и коэффициентами отражения от границ волновода.

В этом случае расчет акустического поля сводится к расчёту зоны Френеля виртуальной антенны. На рис. 1 для примера представлены демонстративные расчеты распределения звукового давления с расстоянием в зоне Френеля излучателя для различных частот.

Как видно из рис. 1, на расстоянии r_1 наибольший вклад в общее звуковое поле будет вносить спектральная составляющая на частоте f_2, а на расстоянии r_2 – спектральная составляющая на частоте f_1 и т.д. Поэтому в ближнем поле излучателя с расстоянием будет происходить перераспределение уровня спектральных составляющих, приводящих к формированию частотно-пространственной интерференции от широкополосного излучателя (шумоизлучение АНПА).

Таким образом, частотно-пространственную интерференцию шумоизлучения АНПА можно рассматривать как звуковое поле антенной решетки, состоящей из мнимых источников, с амплитудно-фазовом распределением по апертуре виртуальной антенны, зависящего от коэффициентов отражения от дна и поверхности для каждого луча. Коэффициенты отражения от взволнованной поверхности и неровного дна будут определяться параметром Рэлея $\mathrm{Re}l=2\pi h\cdot\cos\theta/\lambda$, где h – среднее значение высоты неровностей поверхности; λ – длина гидроакустической волны; θ – угол скольжения падающей волны.

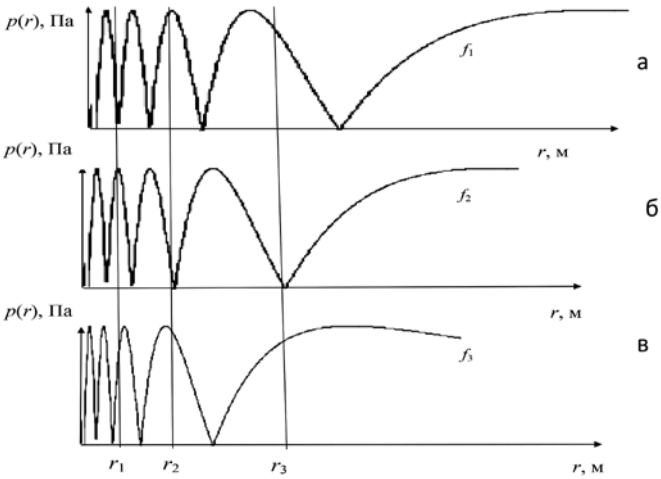


Рис. 1. Распределение звукового давления в зоне Френеля излучателя для различных частот

При этом в акустическом волноводе акустическое поле определяется дискретным набором мод (лучей) [9]. Тогда когерентное звуковое давление, определяющее интерференционные явления в мелководной прибрежной области, будет описываться выражением:

$$p(r) = p_0 \sum_{i=0}^{N} \frac{K_{\text{отр}_i}(\mathrm{Re}l,\ \theta,\ \rho c) \cdot p_i(r) \cdot e^{jkr_i}}{r_i}, \qquad (1)$$

где p_0 – звуковое давление, создаваемое источником звука на единичном расстоянии;

$K_{\text{отр}_i}(\mathrm{Re}l,\ \theta,\ \rho c)$ – коэффициент отражения от границ морской среды для i-го мнимого источника;

ρc – удельное акустическое сопротивление отражающей среды;

Rel – параметр Рэлея;

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число излученного сигнала;

r_i – расстояние от источника звука до точки поля для i-го мнимого источника.

Как видно из выражения (1), формирование интерференционного акустического поля в морской среде зависит от параметра Рэлея, который, в свою очередь, определяется частотой сигнала. Интерференционное поле формирует когерентная составляющая индикатрисы рассеяния отраженного сигнала шумоизлучения. При этом коэффициент отражения когерентной компоненты акустического сигнала, зеркально отраженного от поверхности, можно оценить с использованием выражения:

$$K_{\text{отр}} = \left|K_0\right| \cdot \mathrm{e}^{-(\mathrm{Re}l)},$$

где K_0 – коэффициент отражения от гладкой поверхности моря.

В реальных средах когерентность может нарушаться не только из-за высокого показателя Рэлея, но и из-за воздействия флуктуаций показателя преломления на амплитуду и фазу интерферирующих волн.

В результате интерференции лучей спектр сигнала в точке приема будет определяться [11] как:

$$p_\omega(\omega, r, h_u, h_{np}, \theta) = \\ = \sum_{i=1}^{M} A_i(\omega, r, h_u, h_{np}, \theta) s(t) \exp\left[-i\omega\tau_i(r, h_u, h_{np}, \theta) - \varphi_i\right],$$

где $A_i(\omega, r, h_u, h_{np}, \theta)$ – амплитуда сигнала по i-му лучу;

$s(t)$ – излучаемый сигнал;

τ_i – время распространения по i-му лучу;

φ_i – учитывает изменение фазы волны при отражении от границ.

В спектральном представлении акустический волновод следует рассматривать как пространственный фильтр со своей амплитудно-частотной характеристикой, преобразующий первоначальный спектр шумоизлучения АНПА и приводящий к частотно-пространственной модуляции широкополосного спектра шумоизлучения АНПА.

2. Экспериментальные исследования в мелководной акватории

Экспериментальные исследования в мелководных районах моря показали наличие частотно-пространственной интерференции. Так на рис. 2 представлены спектрограммы шумоизлучения АНПА ММТ-300 и АНПА «Клавесин» в широкой полосе при проходе в районе приемной базы (гидрофона).

На рис. 2, *б* наблюдается несколько проходов АНПА в районе измерительного гидрофона, что соответствовало схеме маневрирования АНПА.

Экспериментальные исследования в мелководных районах моря также показали наличие вально-лопастной модуляции широкополосного шумоизлучения АНПА, которая проявлялась в виде ВЛЗР. На рис. 3 представлены спектрограмма ВЛЗР шумоизлучения в мелководной акватории и внешний вид АНПА типа ММТ-300.

Как видно из рис. 3, шумоизлучение АНПА имеет дискретные составляющие ВЛЗР, соответствующие скорости вращения винтов АНПА.

На рис. 3 видно, что частота ДС имеет девиацию в зависимости от скорости вращения винтов АНПА. Средняя скорость движения АНПА при проведении эксперимента составляла v ≈ 1 м/с, при скорости вращения винта n ≈ 1400 об/мин. При нестационарном режиме движения АНПА происходит расщепление дискретных составляющих ВЛЗР за счет разницы скоростей вращения винтов АНПА.

Экспериментальные исследования показали, что шумоизлучение АНПА имеет модуляционные харак-

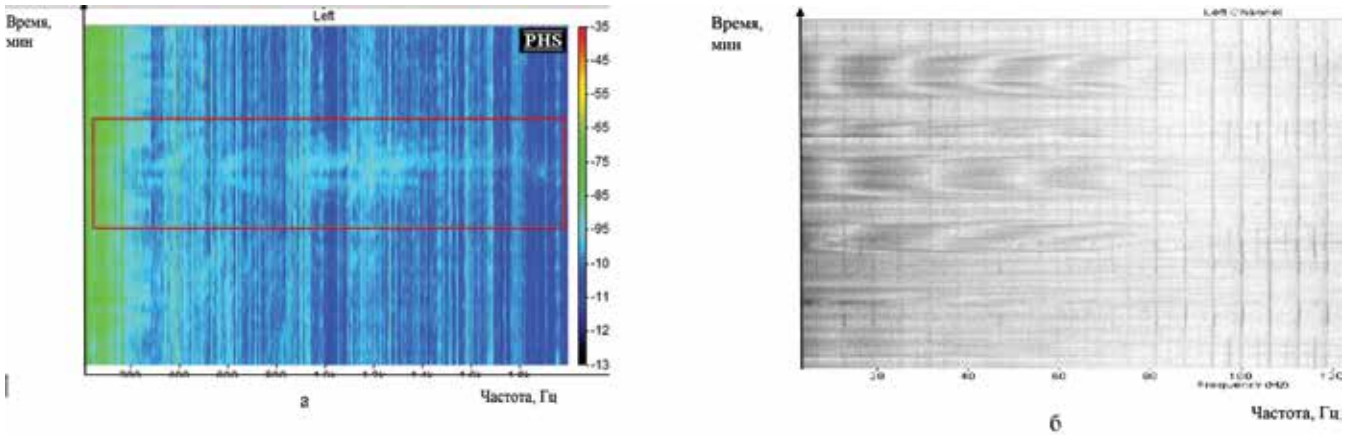


Рис. 2. Спектрограммы шумоизлучения АНПА ММТ-300 (а) и АНПА «Клавесин» (б) при проходе в районе приемного гидрофона

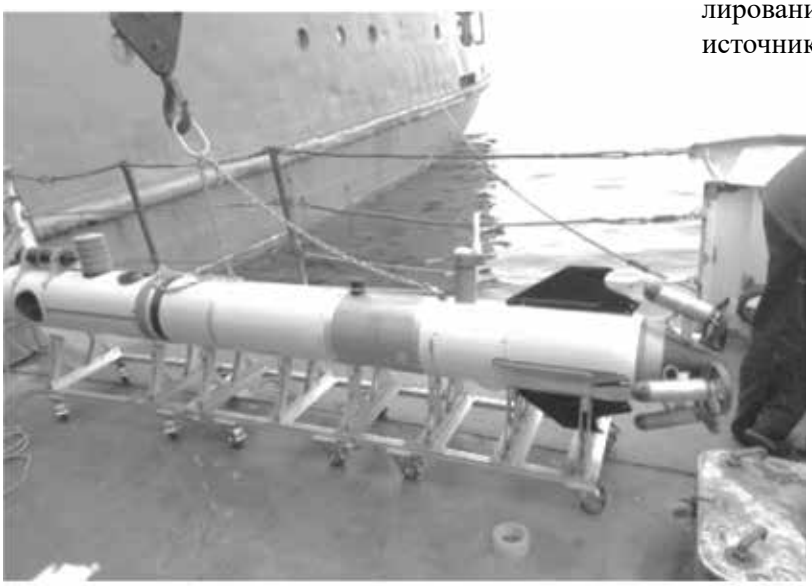
теристики. Кроме вально-лопастной модуляции, при проходе морской цели, имеющей широкий спектр шумоизлучения в мелководой акватории, наблюдается частотно-пространственная интерференция. В спектре сигнала присутствуют интерференционные максимумы и минимумы. Поэтому спектр шумоизлучения АНПА имеет вид модулированного сигнала с определенным частотным интервалом модуляции.

Известно, что при измерении характеристик шумоизлучения морского объекта контрольным является участок траектории движения с минимальным «траверзным» расстоянием между измерительным гидрофоном и морским объектом [14]. Как показывают экспериментальные и модельные эксперименты, оценка времени прохода ММО на траверзном расстоянии возможна путем анализа интерференционной картины шумоизлучения ММО.

3. Моделирование частотно-пространственной интерференции широкополосного сигнала на одиночном гидрофоне

Для оценки особенностей формирования акустического поля, создаваемого точечным источником широкополосного сигнала в морском волноводе, было произведено моделирование в среде Matlab подсистемы Simulink с использованием генератора широкополосного сигнала при приеме его на одиночный гидрофон. Схемы моделирования траектории движения источника широкополосного сигнала в горизонтальной и вертикальных плоскостях показаны на рис. 4.

Исходными данными для расчетов являлись: глубина погружения источника шумоизлучения широкополосного сигнала $h_и$; глубина приемного гидрофона $h_{пр}$; траверзное расстояние прохода источника звука от приемного гидрофона $r_{тр}$; расстояние начала моделирования $r_{нач}$; частотный диапазон шумоизлучения источника звука.



а

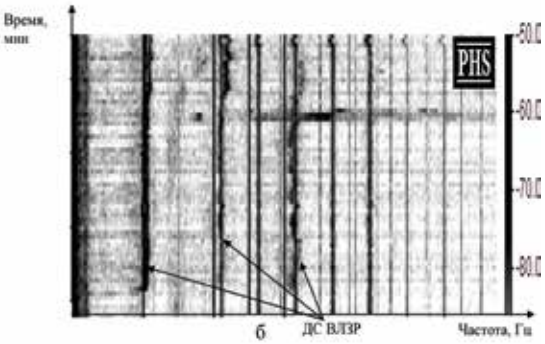


Рис. 3. Внешний вид АНПА ММТ-300 (а) и спектрограмма амплитудной огибающей шумоизлучения АНПА (б)

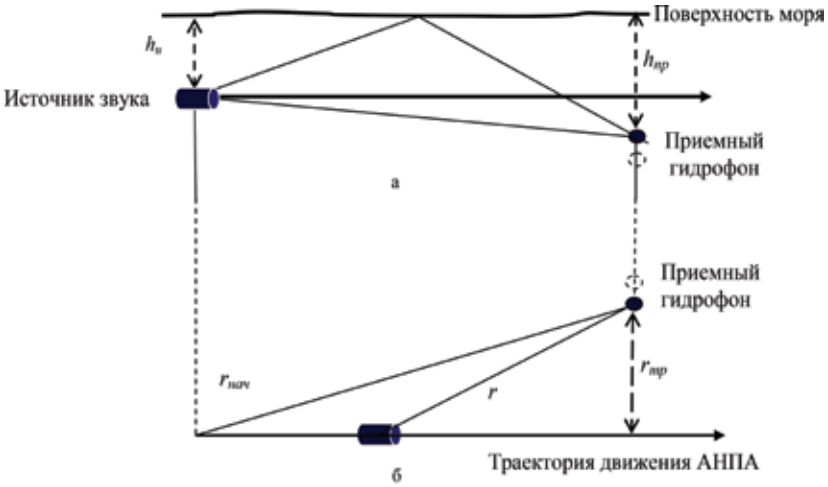


Рис. 4. Схемы моделирования траектории движения АНПА в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях

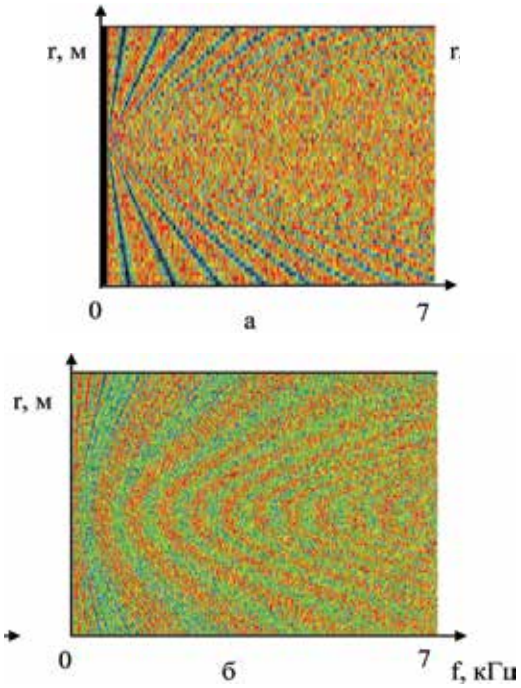


Рис. 6. Частотно-пространственная интерференционная картина при приеме на:
а – одиночный гидрофон h_u=10 м; $h_{пр}$=10м; $r_{тр}$=5 м;
б – два гидрофона h_u=10 м; $h_{пр}$=10 м и 11 м; $r_{тр}$=5 м

Результаты моделирования частотно-пространственной интерференции в координатах частота-расстояние показан на рис. 5.

Как видно из рис. 5, при движении источника звука относительно приемника наблюдаются интерференционные явления. Максимумы наблюдаются на частотах, для которых разность хода лучей $\varphi = 2\pi r/\lambda$ равна целому числу длин волн λ. При этом происходит синфазное сложение сигналов, что приводит к увеличению уровня сигнала. На частотах, для которых разность хода равна нечетному числу полуволн $n\lambda/2$, (n = 1, 3, 5,..) (сложение в противофазе), происходит взаимное подавление сигналов, и наблюдаются интерференционные минимумы. При этом при изменении расстояния r между источником звука и приемным гидрофоном интервал интерференции Δf изменяется и становится минимальным при минимальном траверзном расстоянии, как это видно на рис. 5. Величина частотного интервала Δf интерференционных полос изменяется при изменении глубины источника h_u, глубины приемника $h_{пр}$ и траверзного расстояния $r_{тр}$ при проходе морского объекта.

Расчеты показывают, что при проходе на малом траверзном расстоянии, из-за малого значения интервал интерференции Δf, частотно-пространственная интерференционная картина в мелководной акватории (малые глубины источника и приемника) становится размытой, как это показано на рис. 6, *а*.

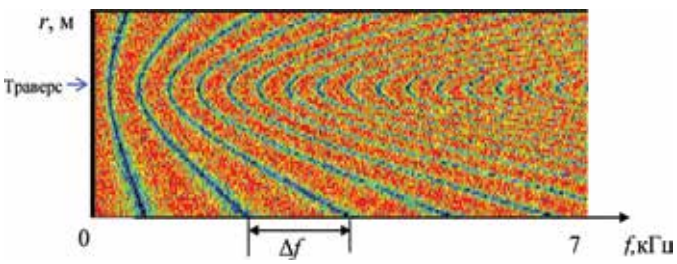


Рис. 5. Частотно-пространственная интерференционная картина на одиночном гидрофоне (h_u = 10 м; $h_{пр}$ = 10 м; $r_{тр}$ = 50 м)

Для формирования частотно-пространственной интерференции возможно использование двух гидрофонов, сигналы с выходов которых суммируются. Частотно-пространственная интерференционная картина при использовании двух гидрофонов h_u = 10 м; $h_{пр}$ = 10 и 11 м при траверзном расстоянии $r_{тр}$ = 5 м показана на рис. 6, *б*.

Как видно из рис. 6, *б* при использовании двух гидрофонов возможно формирование интерференционной картины и фиксации минимального расстояния между измерительным гидрофоном и АНПА.

При регистрации частотно-пространственной интерференционной картины в морских условиях следует учитывать, что лучевая теория для мелкого моря применима при частотах выше 50 Гц [15], поэтому в реальных морских условиях интерференционная картина на низких частотах может не регистрироваться.

4. Гомоморфная фильтрация на основе кепстральной обработки сигнала шумоизлучения АНПА

Измерение модуляционных характеристик широкополосного спектра возможно путем гомоморфной фильтрации на основе кепстральной обра-

ботки широкополосного сигнала. Как показано в [16], гомоморфные фильтры находят применение в тех приложениях, где входной сигнал формируется в виде произведения двух различных сигналов: $S(t) = s_1(t)s_2(t)$.

С помощью гомоморфных фильтров мы можем обрабатывать компоненты $s_1(t)$ и $s_2(t)$ отдельно, т.е. можно, например, работать с модуляционными составляющими сигнала, выделяя их с использованием линейного фильтра. Для этих целей используется логарифмирование модулированного сигнала $\ln S(t) = \ln s_1(t) + \ln s_2(t)$. В итоге, после логарифмирования мы получаем вместо произведения компонентов их сумму и можем использовать линейную фильтрацию для обработки сигнала.

Частным случаем гомоморфного преобразования является кепстральный анализ. Принцип кепстральной обработки при анализе гидроакустического сигнала, основан на выделении модуляционных составляющих. При регистрации шумоизлучения АНПА к модуляционным составляющим можно отнести вально-лопастную модуляцию в виде ВЛЗР и интерференционную модуляцию широкополосного спектра шумоизлучения АНПА.

Общий вид амплитудно-модулированного сигнала $S(\tau)$, где в качестве несущего колебания является шум $s_1(t)$, а в качестве модулирующего сигнала может выступать смесь гармонических составляющих, на частотах ω_i может быть описан выражением:

$$S(t) = A_0(1 + ms_2(t))s_1(t),$$

где $s_1(t)$ – несущее колебание (шум);

$s_2(t)$ – модулирующий сигнал;

A_0 – амплитуда несущего колебания (постоянная составляющая);

m – индекс модуляции.

В общем виде спектр $S(\omega)$ анализируемого амплитудно-модулированного полезного сигнала можно вычислить, используя выражение:

$$S(\omega) = \int_0^{+\infty} S(t)\, e^{-i\omega t} dt = \int_0^{+\infty} \left(A_0 + A_0 m s_2(t)\right) s_1(t) e^{-i\omega t} dt.$$

Введем обозначения:

$s_1(\omega) = \int_0^{+\infty} s_1(t) e^{-i\omega t} dt$ – спектр несущего колебания;

$s_2(\omega) = \int_0^{+\infty} \left(A_0 + A_0 m s_2(t)\right) e^{-i\omega t} dt$ – спектр модулирующего сигнала.

Применяя операцию логарифмирования к спектральному представлению амплитудно-модулированного полезного сигнала $S(\omega)$:

$$S(\omega) = s_1(\omega) \cdot s_2(\omega),$$

получим:

$$\ln S(\omega) = \ln s_1(\omega) + \ln s_2(\omega).$$

Тогда кепстр можно представить как:

$$C(\tau) = \int_0^{\infty} \ln s_1(\omega) \cos\omega\tau d\omega + \int_0^{\infty} \ln s_2(\omega) \cos\omega\tau d\omega.$$

Следовательно, с помощью проведения низкочастотной фильтрации возможно выделение модулирующего сигнала в виде периодических составляющих $\ln s_2(\omega)$ путем исключения несущего колебания $\ln s_1(\omega)$.

В результате операций, предусмотренных кепстральной обработкой и преобразованиями Фурье, возможно выделить ДС амплитудно-модулированного сигнала, экспериментально подтвержденные в [18] путем выделения ВЛЗР шумоизлучения ММО.

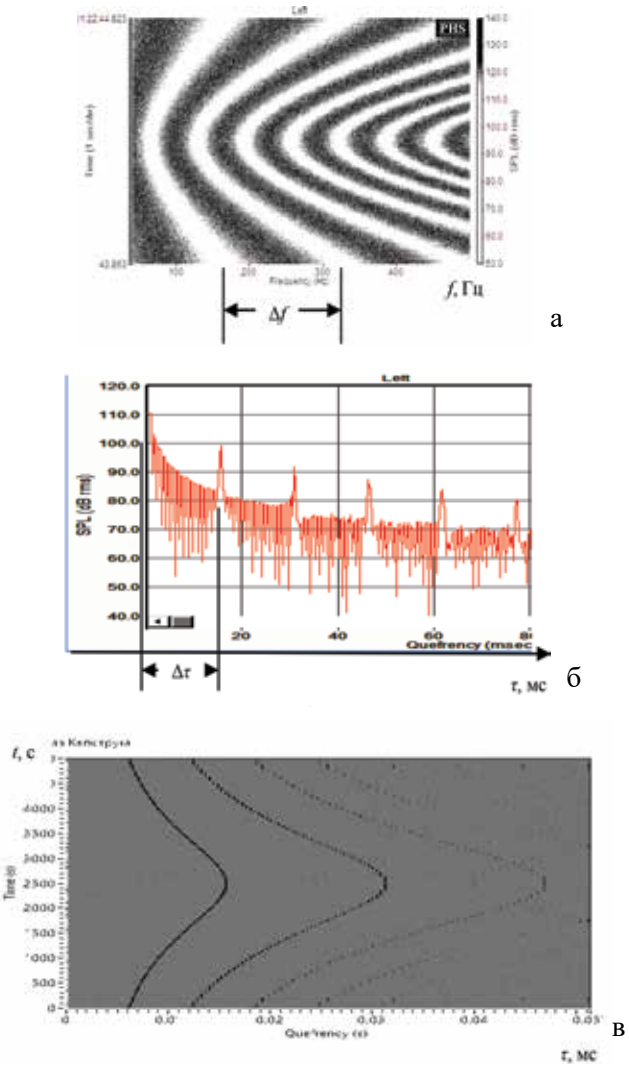


Рис. 7. Интерференционная картина широкополосного сигнала (а); его кепстр (б) и кепстрограмма (в)

С целью возможности выделения ДС, определяющих интервал интерференции широкополосного сигнала, была произведена кепстральная обработка с использованием программы Spectlab. На рис. 7, *а* показаны смоделированный в системе Labweiv интерференционный сигнал и его кепстральная обработка с использованием программы Spectlab.

При этом на сочастоте (quefrence) $\Delta\tau$ измеряется в милисекундах (рис. 7, *б, в*). Поэтому интервал интерференции определяться как $\Delta f = 1/\Delta\tau$, Гц. К примеру на рис. 7, *б* кепстр приведен для интервала $\Delta f =$ 63,89 Гц, что соответствует сочастоте 0,015 мс, вторая гармоника на сочастоте 0,03 мс и т.д.

Поэтому при сближении морского объекта с гидрофоном сочастота увеличивается (рис. 7, *в*), а интервал интерференции уменьшается (рис. 7, *а*).

Как видно из рис. 7, при кепстральной обработке выделяются дискретные составляющие, которые при топографической регистрации позволят осуществить трассовую обработку кепстральных ДС, которая имеет повышенную помехоустойчивость по сравнению с анализом мгновенных кепстров.

Заключение

Малошумные морские объекты, включая АНПА, выполняют поставленные задачи в мелководных акваториях. АНПА имеют высокооборотные движители, что может привести к возникновению кавитации на винтах и, как следствие, к повышенному уровню ПГАП в широкой полосе частот. Широкополосное шумоизлучение имеет модуляционные характеристики в спектральной области в виде частотно-пространственной интерференции и во временной области в виде вально-лопастной модуляции, что является демаскирующими признаками морского объекта.

Методика регистрации ПГАП должна предполагать регистрацию демаскирующих характеристик АНПА, включая частотную-пространственную интерференционную спектрограмму и дискретные составляющие ВЛЗР шумоизлучения АНПА. Гомоморфная фильтрация на основе кепстральной обработки сигнала шумоизлучения АНПА позволяет выделить модуляционные характеристики ПГАП в виде дискретных составляющих шумоизлучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цыганков С.Г., Теверовский Г.И. Шумность – задача стратегическая // Национальная оборона. 2013. № 9.
2. Шлемов Ю.Ф. Современные методы и технологии акустических испытаний кораблей для измерения характеристик их подводного шума // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 5.
3. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В. Характеристики собственного шумоизлучения малогабаритного АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4(30). С. 58–63.
4. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В., Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Ткаченко С.А. Спектральные характеристики шумового поля малогабаритного автономного необитаемого подводного аппарата в дальней зоне // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 4(42). С. 84–88.
5. Кудрявцев А.А., Лугинец К.П., Машошин А.И. Об амплитудной модуляции подводного шума морских судов // Акустический журнал. 2003. Т. 49, № 2. С. 224–228.
6. Машошин А.И. Оптимизация устройства обнаружения и измерения параметров амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов // Акустический журнал. 2013. Т. 59, № 3. С. 347–353.
7. Цыганков С.Г., Теверовский Г.И. Метрологическое обеспечение гидроакустических измерений // Национальная оборона. 2013. № 9.
8. DEMON Acoustic Ship Signature Measurements in an Urban Harbor / G. Slamnoiu, O. Radu, V. Rosca [et al.]. URL: https://www.hindawi. com/journals/aav/2011/952798/#introduction (дата обращения: 16.01.2023).
9. Толстой И., Клей К.С. Акустика океана / перевод Ю.П. Лысанова под ред. Л.М. Бреховских. М.: Мир, 1969. 302 с.
10. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане // Акустика океана: современное состояние / под ред. Л.М. Бреховских, И.Б. Андреевой . М.: Наука, 1982. С. 71–82.
11. Орлов Е.Ф., Шаронов Г.А. Интерференция звуковых волн в океане. Владивосток: Дальнаука, 1998. 196 с.
12. Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Голографические методы обработки гидроакустических сигналов (обзор) // Акустический журнал. 2025. Т. 71, № 1. С. 96–117.
13. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики / пер с англ. под ред. Е.Л. Шендорова. М.: Мир, 1973.
14. Новиков А.К. Статистические измерения и обнаружение сигналов. Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2006.
15. Лободин И.Е., Машошин А.И. Определение границы по частоте применимости лучевой акустики // Морская радиоэлектроника. 2022. № 1 (79). С. 36–37.
16. Сорокин С.В., Щербаков М.А. Сравнительный анализ методов нелинейной фильтрации сигналов и изображений // Надежность и качество: тр. Междунар. симп. в 2-х т. Пенза: Инф.-издат. центр Пенз. гос. ун-та, 2006. С. 89–91.
17. Викторов Р.В., Колмогоров В.С., Пономарев М.О., Решетников Д.С. Экспериментальные исследования возможности выделения вально-лопастного звукоряда движущегося морского объекта // Гидроакустика. 2017. № 29 (1). С. 63–69.

Сведения об авторах

ШПАК Степан Анатольевич, к.т.н., доцент, начальник кафедры Гидроакустики ТОВВМУ
Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова» Министерства обороны Российской Федерации
Адрес: 690062, Владивосток, Камский переулок 7
Научные интересы: гидроакустические измерения, цифровая обработка гидроакустических сигналов
Тел.: +7(914)7-023-976
E-mail: shpak_sa@inbox.ru

БОЙКО Константин Петрович, преподаватель кафедры Гидроакустики ТОВВМУ
Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова» Министерства обороны Российской Федерации
Адрес: 690062, Владивосток, Камский переулок 7
Научные интересы: гидроакустические измерения, цифровая обработка гидроакустических сигналов
Тел.: +7(902)5-252-695
E-mail: kot_a1a2a3@mail.ru

КОЛМОГОРОВ Владимир Степанович, д.т.н., профессор, профессор кафедры Гидроакустики ТОВВМУ
Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова» Министерства обороны Российской Федерации
Адрес: 690062, Владивосток, Камский переулок 7
Научные интересы: гидроакустические измерения, цифровая обработка гидроакустических сигналов
Тел.: +7(914)6-926-567
E-mail: vkolmogorov2015@yandex.ru

Для цитирования:

Шпак С.А., Бойко К.П., Колмогоров В.С. РЕГИСТРАЦИЯ МОДУЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 33–42. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_04. EDN: ZSOFXZ.

DOI:10.37102/1992-4429_2026_57_03_04

REGISTRATION OF MODULATION CHARACTERISTICS OF SEA OBJECTS' NOISE EMISSION

S.A. Shpak, K.P. Boyko, V.S. Kolmogorov

One of the most important properties of underwater marine objects is their stealthiness. The underwater noise of a marine object is its deceptive factor. By analyzing the characteristics of the noise of a marine object, it is possible to determine the class of the marine object and its movement patterns. To improve the efficiency of detecting the primary field of low-noise underwater objects, it is necessary to expand the range of measured characteristics, including spectral and modulation characteristics. This article focuses on the modulation characteristics of the primary hydroacoustic field of a marine object, which were experimentally obtained in a shallow sea. Modeling of the acoustic field created by a point source of a broadband signal in a marine waveguide confirmed the formation of frequency-space modulation of a broadband signal in a shallow water area due to the interference of the direct and reflected signals from the sea surface. The modeling showed that in order to register the frequency-space modulation of a broadband signal in a shallow water area at small traverse distances of a marine object, it is necessary to use receivers distributed in the vertical plane. It has been shown that it is possible to register the modulation characteristics of the noise emission of marine objects in the form of discrete components of the demodulated signal spectrum using homomorphic filtering based on the signal's cepstral processing.

Keywords: primary hydroacoustic field, frequency-space interference, modulation characteristics, cepstral signal processing, and homomorphic filtering.

References

1. Tsygankov S.G., Teverovsky G.I. Noisiness – a strategic task // National Defense. 2013. No. 9.
2. Shlemov Yu.F. Modern methods and technologies of acoustic testing of ships for measuring the characteristics of their underwater noise // Scientific Notes of the Faculty of Physics of Moscow University. 2017. No. 5.
3. Khvorostov Yu.A., Matvienko Yu.V. Characteristics of the Own Noise Emission of a Small-Sized ANPA // Underwater Research and Robotics. 2019. No. 4(30). P. 58–63.
4. Khvorostov Yu.A., Matvienko Yu.V., Kuzkin V.M., Pereselkov S.A., Tkachenko S.A. Spectral Characteristics of the Noise Field of a Small-Sized Autonomous Unmanned Underwater Vehicle in the Far Zone // Underwater Research and Robotics. 2022. No. 4(42). P. 84–88.
5. Kudryavtsev A.A., Luginets K.P., Mashoshin A.I. On the amplitude modulation of the underwater noise of marine vessels// Acoustical Journal. 2003. Vol. 49, No. 2. P. 224–228.
6. Mashoshin A.I. Optimization of the device for detecting and measuring the parameters of the amplitude modulation of the underwater noise of marine vessels.
7. Tsygankov S.G., Teverovskiy G.I. Metrological support of sonar measurements // National Defense. 2013. No.9.
8. DEMON Acoustic Ship Signature Measurements in an Urban Harbor / G. Slamnoiu, O. Radu, V. Rosca [et al.]. URL: https://www.hindawi. com/journals/aav/2011/952798/#introduction.
9. Tolstoy I., Clay K.S. Acoustics of the ocean, translated by Y.P. Lysanov, edited by L.M. Brekhovskikh. Moscow: Mir, 1969. 302 p.
10. Chuprov S.D. Interference structure of the sound field in a layered ocean // Ocean acoustics: current state / edited by L.M. Brekhovskikh, I.B. Andreeva. M. Nauka Publ., 1982. P. 71–82.
11. Orlov E.F., Sharonov G.A. Interference of Sound Waves in the Ocean. Vladivostok: Dalnauka, 1998. 196 p.
12. Kuzkin V.M., Pereselkov S.A. Holographic Methods of Processing Hydroacoustic Signals (Review) // Acoustical Journal. 2025. Vol. 71, No. 1. P. 96–117.
13. Urick R.J. Fundamentals of Hydroacoustics. per. from English. under the editorship of E.L. Shendorov. M.: Mir, 1973.
14. Novikov A.K. Statistical Measurements and Signal Detection. St. Petersburg: TsNII im. akad. A.N. Krylova, 2006.
15. Kolmogorov V.S., Shpak S.A., Priyma A.V. Use of a vertical hydrophone array in an adaptive interference compensator in multipath conditions // Proceedings of the 16th All-Russian Conference "Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics". St. Petersburg: Lema Publishing House, 2023. P. 313–316.
16. Lobodin I.E., Mashoshin A.I. Determination of the frequency limit for the applicability of beam acoustics // Marine Radioelectronics. 2022. No. 1 (79). P. 36–37.
17. Sorokin S.V., Shcherbakov M.A. Comparative analysis of methods of nonlinear filtering of signals and images / Reliability and quality: tr. Int. simp. in 2 vol. Penza: Inf.-izdat. center of Penza state univ., 2006. P. 89–91.
18. Viktorov R.V., Kolmogorov V.S., Ponomarev M.O., Reshetnikov D.S. Experimental studies of the possibility of extracting the shaft-blade sound series of a moving marine object // Hydroacoustics. 2017. No. 29 (1). P. 63–69.

Information about the authors

SHPAK Stepan Anatolyevich, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Hydroacoustics of the Pacific Higher Naval School
Federal State State-Owned Military Educational Institution of Higher Education "Pacific Higher Naval School named after S.O. Makarov" of the Ministry of Defense of the Russian Federation
Address: 690062, Russia, Vladivostok, Kamsky lane 7
Research interests: hydroacoustic measurements, digital processing of sonar signals
Phone: +7(914)7-023-976. **E-mail**: shpak_sa@inbox.ru

BOYKO Konstantin Petrovich, Lecturer of the Department of Hydroacoustics of the Pacific Higher Naval School
Federal State State-Owned Military Educational Institution of Higher Education "Pacific Higher Naval School named after S.O. Makarov" of the Ministry of Defense of the Russian Federation
Address: 690062, Russia, Vladivostok, Kamsky lane 7
Research interests: hydroacoustic measurements, digital processing of sonar signals
Phone: +7(902)5-252-695. **E-mail**: kot_a1a2a3@mail.ru

KOLMOGOROV Vladimir Stepanovich, Dr. of Engineering, Professor, Professor of the Department of Hydroacoustics of the Pacific Higher Naval School
Federal State State-Owned Military Educational Institution of Higher Education "Pacific Higher Naval School named after S.O. Makarov" of the Ministry of Defense of the Russian Federation
Address: 690062, Russia, Vladivostok, Kamsky lane 7
Research interests: hydroacoustic measurements, digital processing of sonar signals
Phone: +7(914)6-926-567. **E-mail**: vkolmogorov2015@yandex.ru

УДК 004.93`
EDN: DPUWAX
DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_05

ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА ПО СТЕРЕОСНИМКАМ

В.А. Бобков, А.А. Шупикова

Рассмотрена задача автоматического прослеживания подводного трубопровода (ПТП) по стереоизображениям с использованием автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). Отмечено, что традиционные методы распознавания границ на векторизованных изображениях часто неэффективны в подводной среде из-за низкого качества снимков, частичного погружения трубопровода в грунт и высокой вычислительной трудоёмкости. Предложена модификация ранее разработанного авторами метода вычисления осевой линии ПТП, основанного на генерации 3D облака точек, которая включает два усовершенствования: варьирование начальной точки текущего участка осевой линии в малой окрестности для снижения погрешности и замена полного перебора угловых положений оптимизацией по алгоритму Нелдера–Мида. Эксперименты проведены на модельных данных в виртуальной среде с реалистичной текстурой морского дна при различных разрешениях снимков, высотах движения АНПА и степени заиливания ПТП. Показано, что модифицированный метод обеспечивает более высокую точность локализации осевой линии и существенно превосходит базовый вариант по вычислительной производительности. Установлено, что метод сохраняет работоспособность при заиливании трубопровода, а также устойчив к кривизне трассы. В заключении отмечено, что дальнейшие исследования будут направлены на тестирование метода на реальных данных.

Ключевые слова: инспекция, подводный трубопровод (ПТП), автономный подводный аппарат, распознавание, стереоизображение, осевая линия

Введение

Актуальной и практически важной задачей сегодня является регулярный контроль состояния подводных коммуникаций (газовые и нефтяные трубопроводы и др.). В последнее время для этих целей всё чаще применяются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), поскольку они не требуют использования дорогостоящих специализированных обеспечивающих судов, а также сокращают сроки обследования подводных коммуникаций. Для решения задач инспекции подводных трубопроводов (ПТП) АНПА должен быть оборудован надежными средствами идентификации объекта с возможностью точного маневрирования относительно него. Одним из эффективных подходов к решению задачи прослеживания ПТП с использованием АНПА является визуальная навигация, которая в интеграции со штатными средствами навигации потенциально может обеспечить высокоточную координацию АНПА относительно ПТП.

Методы, алгоритмы распознавания объектов по снимкам хорошо развиты сегодня для наземных сценариев. Но для подводной среды эти методы не всегда эффективны из-за специфических для нее проблем, к которым относятся: невозможность использовать спутниковые измерения; низкое качество подводных изображений, обусловленное неравномерной освещенностью, мутностью воды, возможными помехами в виде водорослей и обрастания объекта ракушками; занесение ПТП песком и скоплением мусора вдоль ПТП. Поэтому технологии, ориентированные, в частности, на распознавание и прослеживание подводных ПТП по видеоинформации, постоянно развиваются.

Как правило, алгоритмы распознавания ПТП основываются на поиске видимых границ ПТП. Сегментация является неотъемлемой частью обработки изображений, которая закладывает основу для последующего анализа изображения путем выделения на нем информационно значимых областей с различны-

ми характеристиками [1]. Для выделения объектов на подводных снимках чаще всего используются градиентные методы: Кэнни-детектор [2], оператор Собеля [3], или кластерные – Отсу [4], К-средних [5]. Для поиска границ ПТП на бинарном изображении чаще всего применяют метод Хафа [6], реже фильтр частиц [7].

Во многих предлагаемых методах выделения границ объектов на изображениях успешно используется комбинация преобразования Хафа с детектором границ Кэнни. А в работе [8] был предложен модифицированный алгоритм Хафа в комбинации с методом Оцу для повышения вычислительной производительности при построении прямолинейных границ ПТП на изображении.

В статье [9] дается сравнительный анализ видеоориентированных систем, предназначенных для слежения за ПТП и кабелями, а обзор [10] охватывает наиболее часто используемые технологии подводных инспекций и мониторинга.

В основном в описываемых технологиях предлагаются методы определение границ ПТП и кабелей с применением преобразования Хафа. Однако применение этих методов в задачах инспекции ПТП не всегда эффективно по нескольким причинам:

– характерная трудоемкость вычислений препятствует обеспечению режима реального времени;

– ПТП может быть частично погружен в грунт (песок), в этом случае метод Хафа неприменим для выделения границ ПТП, поскольку они утрачивают прямолинейный характер;

– упомянутое выше низкое качество подводных изображений, обусловленное разными помехами, препятствует надежному распознаванию ПТП.

В предыдущих работах авторов настоящей статьи [11, 12] был описан альтернативный подход с обработкой видеоинформации, направленный на преодоление отмеченных трудностей. В настоящей работе предлагается дальнейшее развитие этого подхода в целях повышения его эффективности.

Постановка задачи

Решается задача автоматического прослеживания ПТП по стереоизображениям с использованием АНПА. Предполагается, что в процессе движения АНПА ведет видеосъемку ПТП с заданной частотой. Диаметр трубопровода известен. Траектория АНПА вычисляется с помощью авторского метода визуальной навигации (МВН) [13]. Поскольку побочным результатом работы МВН является генерация по стереопаре изображений 3D облака точек, этот результат может использоваться в алгоритме распознавания трубопровода. Предполагается, что выход в район инспекции ПТП осуществляется штатными навигационными средствами АНПА, а первоначальная привязка к трубопроводу выполняется с помощью метода локального распознавания, основанного на вычислении осевой линии трубопровода, с использованием векторизованной формы подводных изображений [11]. А в [12] была предложена более эффективная в вычислительном отношении модификация метода слежения с критерием достоверности, использующим 3D облако точек. Вместе с тем результаты тестирования выявили необходимость и возможности повышения эффективности метода как в части повышения точности локализации ПТП, так и в части скорости вычислений. Поэтому в настоящей работе ставилась задача разработки модификации метода с лучшими показателями эффективности в сравнении с теми, которые были получены в указанных выше работах, за счет оптимизации вычислительной схемы.

Оптимизация метода отслеживания ПТП

Базовый вариант метода слежения

Локализация ПТП при отслеживании реализуется посредством вычисления осевой линии видимого камерой участка трубопровода в каждой текущей (расчетной) позиции траектории движения АНПА. Вычисленное положение ПТП в системе координат АНПА позволяет одновременно получить и все необходимые для управления параметры взаимного расположения АНПА и ПТП (отстояние от трубопровода, скорость приближения к нему и др.). Идея метода заключается в вариабельном поиске истинного положения осевой линии текущего участка ПТП с учетом знания о непрерывности осевой линии и вычисленном положении предыдущего участка. Тогда: а) начальная точка искомого участка осевой линии совмещается с концевой точкой предыдущего участка осевой линии; и б) выполняется итеративный поиск истинного положения осевой линии в пространстве углов в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Критерием достоверности при поиске истинного положения служит проверка принадлежности видимых 3D точек поверхности трубопровода. Принципиальная вычислительная схема выглядит следующим образом.

В каждой расчетной /текущей позиции:

1. Генерация 3D облака точек в процессе работы МВН.

2. Пересчет координат концевой точки осевой линии предыдущего участка в систему координат (СК) текущей позиции и совмещение с ней начальной точки осевой линии текущего участка.

3. Итеративный перебор вариантов положения осевой линии с заданным шагом и ограничением в угловом пространстве.

4. Применение критерия достоверности варианта.

5. Выбор наилучшего варианта.

Модификация метода

Предлагаемая модификация включает две позиции усовершенствования:

а) вместо жесткой привязки начальной точки текущего участка осевой линии ПТП к конечной точке предыдущего участка (см. п. 2 вычислительной схемы) осуществляется вариация координат начальной точки в малой окрестности точки совмещения. Данный подход позволяет повысить сходимость алгоритма на начальном этапе оптимизации, когда в качестве начального приближения выступает осевая линия, полученная методом векторизации изображения, а также снизить влияние погрешности в процессе генерации 3Д точек. Экспериментальным путем установлено, что оптимальный размер данной окрестности составляет 10 % от поперечного радиуса ПТП;

б) вместо «переборного» варианта (см. п.3 вычислительной схемы) реализуется метод оптимизации поиска на основе применения алгоритма Нелдера–Мида [14].

Минимизируется функция среднеквадратичного расстояния точек от поверхности ПТП:

$$RMSE = (d_i - R)^2,$$

где d_i – расстояние от точки до осевой линии ПТП, R – радиус ПТП. Здесь рассматриваются точки 3D облака, относящиеся к ПТП. Они находятся между двумя касательными плоскостями к ПТП. Как показали вычислительные эксперименты, схема с применением алгоритма Нелдера–Мида имеет существенное преимущество в скорости и точности перед «переборным» вариантом.

Заметим, что метод, по-прежнему сохраняет свойство «отсутствия накопления ошибки локализации ПТП» при прохождении по протяженной траектории.

Эксперименты

Вычислительные эксперименты по оценке эффективности предложенной модификации метода отслеживания ПТП были проведены на модельных данных.

Виртуальная сцена с подводным ПТП (с диаметром 60 см) и АНПА, оснащенного видеостереокамерой, была сгенерирована в среде программного моделирующего комплекса [15]. Траектория прохождения ПТП по морскому дну (с перепадом высот до 5м) включала в себя плавные повороты (и изгибы в вертикальной плоскости) и участки с частичным погружением трубопровода в песок. Радиус кривизны осевой линии трубопровода на разных участках варьировался от 300 м до 1000 м. Использовалась текстура реальной съемки морского дна. Эксперименты проводились на компьютере с характеристиками: Intel Core i7-1160G7 @ 1.20GHz (он рассматривается в качестве гипотетического бортового вычислителя АНПА).

На виртуальной сцене была получена последовательность стереоснимков ПТП длиной 600 м. При выполнении экспериментов оценивалась эффективность (точность и вычислительная производительность метода) предложенной модификации метода прослеживания ПТП в сравнении с базовым вариантом с учетом влияния настроечных параметров сцены и алгоритмов. А именно, учитывались:

– зависимость от геометрических характеристик сцены (геометрия траектории ПТП – прямолинейный характер или повороты/изгибы, высота прохождения АНПА над дном);

– зависимость от разрешения используемых снимков;

– влияние погрешности точек сгенерированного 3D облака в применяемом критерии принадлежности точек поверхности ПТП.

Результаты вычислительных экспериментов

В таблице приведены результаты тестирования (усредненные по всей траектории АНПА) по оценке эффективности (точность локализации ПТП, вычислительная производительность) предложенной модификации метода в сравнении с базовым вариантом в зависимости от высоты АНПА над трубопроводом и разрешения снимков. Поскольку в обеих модификациях применяется МВН, также приведена оценка вычислительной производительности метода МВН.

На рис.1, 2 показано распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП базовым и модифицированным методом при движении АНПА вдоль трубопровода на высоте 2 м для трех разрешений снимков: — 2400x1800, ····, 1800x1200, -- 1200x900. Для базового метода средняя погрешность составила: 5 мм для снимков 1200x900; 2,2 мм для 1800x1200; и 1,9 мм для 2400x1800 (рис. 1). Для модифицированного метода средняя погрешность составила соответ-

Сравнительная эффективность модификации метода с базовым вариантом

Высота АНПА над ПТП	Разрешение снимков	Метод визуальной навигации: скорость (fps)	Модифицированный метод: скорость (fps), погрешность (мм) (макс. ошибка (мм))		Базовый вариант: скорость (fps), погрешность(мм) (макс. ошибка (мм))	
1 м	1200×900	11.9	1142,4	0,8 (4,1)	205,7	3,6(10)
	1800×1200	4.6	777	0,6 (4)	54,4	1,5(4)
	2400×1800	1.6	369	0,4 (2,4)	8,5	1(2,9)
2 м	1200×900	11.5	1870	2,5 (7)	146,2	5(9)
	1800×1200	4.5	964	1,7 (4,7)	16,5	2,2(5,7)
	2400×1800	1.5	464	1 (3,2)	2,2	1,9(4,7)
3 м	1200×900	11.1	2210	6 (20)	77,8	6(34)
	1800×1200	4.4	1074,4	4 (9)	8,8	4(11)
	2400×1800	1.4	437	2,2 (5,7)	2,2	3,2(9)

ственно {2,5 / 1,7 / 1,0} мм для разрешений {1200x900 / 1800x1200 / 2400x1800} (рис.2).

А на рис. 3,4 показано распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП базовым и модифицированным методами при движении АНПА вдоль трубопровода на различных высотах для разрешения снимков 1800x1200. Для базового варианта средняя погрешность составила: 1,5 мм для 1м; 2,2 мм для 2 м; 4,3 мм для 3 м (рис. 3). Для модифицированного метода средняя погрешность составила соответственно {0,6 / 1,7 / 4,0} мм для высот {1 / 2 / 3} м (рис.4).

Как видно из таблицы, при всех комбинациях параметров (высота траектории АНПА над ПТП {1 м, 2 м, 3 м}; разрешение используемых снимков {1200x900, 1800x1200, 2400x1800} модифицированный метод значительно превосходит в эффективности базовый вариант.

Скорость работы модифицированного метода в несколько раз превышает скорость работы базового алгоритма за счет оптимизации поиска локального минимума. Количество итераций в среднем составля-

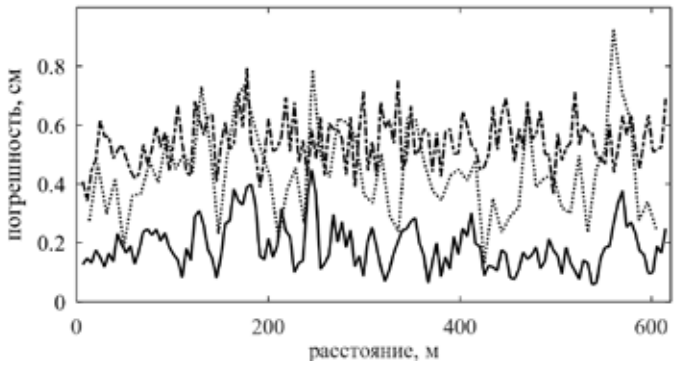


Рис.1. Распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП базовым методом при движении АНПА вдоль трубопровода на высоте 2 м для трех разрешений снимков: — 2400×1800, ···· 1800×1200, -- 1200×900

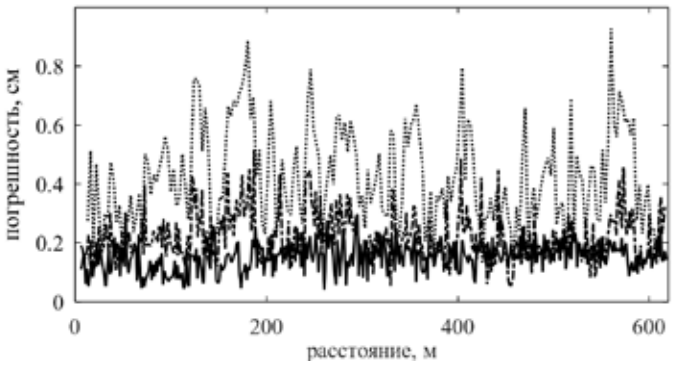


Рис 3. Распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП базовым методом для разрешения снимков 1800x1200 при движении АНПА вдоль трубопровода на высотах: ···· 3 м, -- 2 м, — 1 м

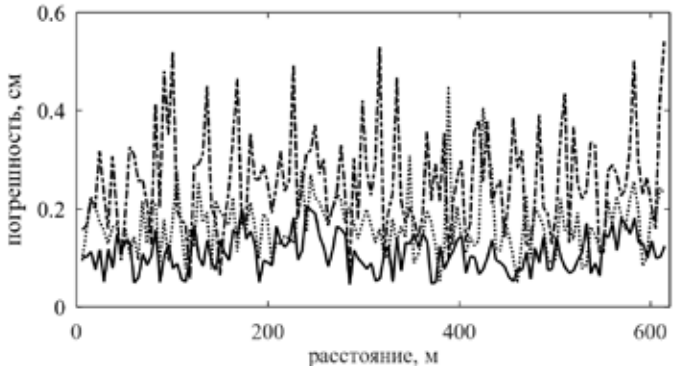


Рис. 2. Распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП модифицированным методом при движении АНПА вдоль трубопровода на высоте 2 м для трех разрешений снимков: — 2400×1800, ···· 1800×1200, -- 1200×900

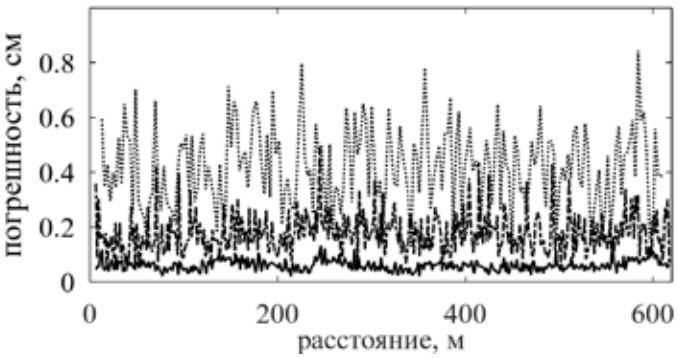


Рис 4. Распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП модифицированным методом для разрешения снимков 1800x1200 при движении АНПА вдоль трубопровода на высотах: ···· 3 м, -- 2 м, — 1 м

ет 110 для Нелдера–Мида и не зависит от положения АНПА над ТП. Для базового алгоритма количество итераций зависит от шага дискретизации и варьируется от 800 на высоте 1 м до 12000 на высоте 3 м. Например, при разрешении снимков 1800x1200 для высот {1 м, 2 м, 3 м} скорость вычислений модифицированного метода выше базового соответственно {в 14 раз, в 58 раз, в 121 раз} (см. табл.). При этом чем выше разрешение снимков, тем больше преимущество модифицированного метода в скорости вычислений. При этом более высокое разрешение обеспечивает более высокую точность.

Количество обрабатываемых 3D точек зависит от области, которую ПТП занимает на снимках. Чем ближе АНПА к ПТП, тем точек больше, что увеличивает время вычисления на каждом шаге для малых высот. Поэтому модифицированный метод работает быстрее на большой высоте.

На рис. 5, 6 демонстрируется влияние кривизны ПТП на погрешность вычисления его осевой линии. Увеличение погрешности на криволинейных участках объясняется тем, что метод вычисления осевой линии основывается на предположении прямолинейности видимых камерой участков трубопровода (например, длина видимого вычисляемого участка при высоте камеры 3 м равна 4 м). Кривизна за счет поворотов / изгибов на таких коротких участках незначительная, но влияет на точность вычисления осевой линии. Для базового метода (рис. 5) увеличение погрешности при увеличении кривизны проявляется наглядным образом для высот АНПА 2 м и 3 м. Это объясняется тем, что на большой высоте видимый участок осевой линии становится длиннее и кривизна проявляется сильнее. Для модифицированного метода влияние кривизны сглаживается благодаря варьированию обеих концевых точек текущего участка осевой линии (в базовом методе варьируется только конечная точка участка) (рис. 6).

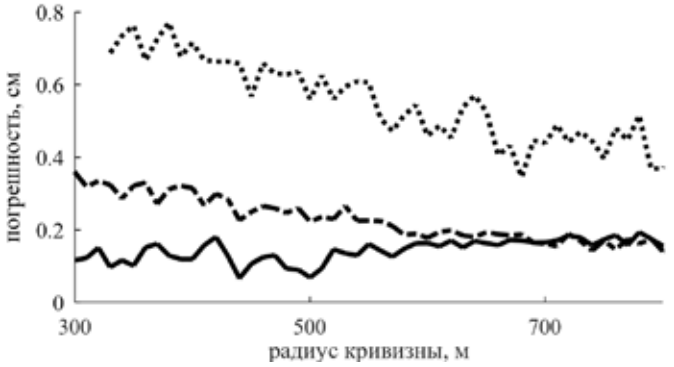


Рис 5. Погрешность вычисления осевой линии ПТП базовым методом в зависимости от изменения радиуса кривизны трубопровода. Для высот АНПА ···· 3 м, -- 2 м, — 1 м. Разрешение снимков 1800x1200

Рис 6 Погрешность вычисления осевой линии ПТП модифицированным методом в зависимости от изменения радиуса кривизны трубопровода. Для высот АНПА ···· 3 м, -- 2 м, — 1 м. Разрешение снимков 1800x1200

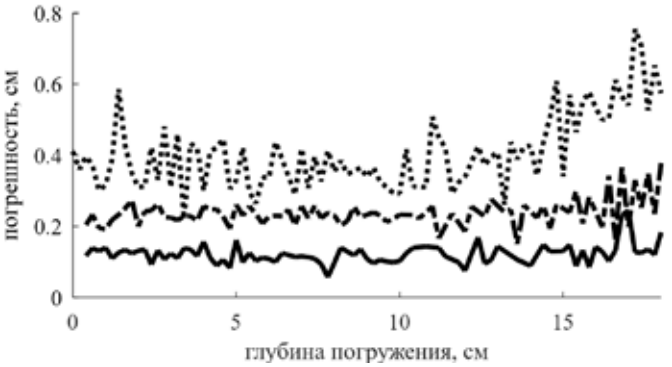


Рис 7 Погрешность вычисления осевой линии ПТП базовым методом в зависимости от степени заиливания трубопровода. Для высот АНПА ···· 3 м, -- 2 м, — 1 м. Разрешение снимков 1800x1200

Рис 8 Погрешность вычисления осевой линии ПТП модифицированным методом в зависимости от степени заиливания трубопровода. Для высот АНПА ···· 3 м, -- 2 м, — 1 м. Разрешение снимков 1800x1200.

На рис. 7 и 8 представлена зависимость погрешности вычисления осевой линии от степени заиливания ПТП. Установлено, что погружение трубопровода в ил на 75 % не оказывает влияния на точность определения осевой линии обоими рассматриваемыми методами. В отличие от методов, основанных на вы-

делении видимых границ ПТП (например, Хафа или Кэни), которые характеризуются высокой погрешностью при определении вертикального положения осевой линии, методы, использующие трёхмерное облако точек, обеспечивают надёжное обнаружение объекта при выступании ПТП над поверхностью дна всего на 25 %.

Заключение

Выполнено исследование по оптимизации ранее разработанного авторами метода прослеживания ПТП по стереоснимкам с использованием АНПА. Результаты тестирования на модельных данных показали преимущество в точности и в вычислительной скорости разработанной модификации метода прослеживания ПТП в сравнении с базовым вариантом. Также была подтверждена работоспособность метода в ситуациях заиливания ПТП. В ближайшей перспективе планируется тестирование метода с оценкой эффективности на реальных данных.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы ИАПУ ДВО РАН № FWFW-2026-0008.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yu Y. et al. Techniques and Challenges of Image Segmentation: A Review // Electronics. 2023. No. 12(5). P. 1199. https://doi.org/10.3390/electronics12051199
2. Canny J.F. A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. 8. P. 679–698.
3. Kanopoulos N., Vasanthavada N., Baker R.L. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1988. Vol. 23(2). P. 358–367.
4. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9, No. 1. P. 62–66.
5. Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en parties // Bull. Acad. Polon. Sci. 1956. Vol. 4. P. 801–804. (in French).
6. Duda R.O., Hart P.E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // Communications of the ACM. 1972. Vol. 15(1). P. 11–15.
7. Elfring J., Torta E., van de Molengraft R. Particle Filters: A Hands-On Tutorial // Sensors. 2021. Vol. 21(2). P. 438.
8. Bobkov V., Shupikova A., Inzartsev A. Recognition and Tracking of an Underwater Pipeline from Stereo Images during AUV-Based Inspection // J. Mar. Sci. Eng. 2023. Vol. 11(10).
9. Alex Raj S.M., Abraham R.M., Supriya M.H. Vision-Based Underwater Cable/Pipeline Tracking Algorithms in AUVs: A Comparative Study // Int. J. Eng. Adv. Technol. (IJEAT). 2016. Vol. 5. P. 48–52.
10. Ho M., El-Borgi S., Patil D., Song G. Inspection and monitoring systems subsea pipelines: A review paper // Review. Structural Health Monitoring. 2020. Vol. 19(2). P. 606–645.
11. Bobkov V., Shupikova A., Inzartsev A. Recognition and Tracking of an Underwater Pipeline from Stereo Images during AUV-Based Inspection // J. Mar. Sci. Eng. 2023. Vol. 11(10)
12. Бобков В.А., Шупикова А.А. Метод слежения за подводным трубопроводом по стереоизображениям с использованием автономного подводного аппарата // Информационные технологии. 2024. № 10. С. 528–536.
13. Bobkov V.A., Kudryashov A.P., Inzartsev A.V. Technology of AUV High-Precision Referencing to Inspected Object // Gyroscopy and Navigation. 2019. Vol. 10, No. 4. P. 322–329. https://doi.org/10.1134/S2075108719040060.
14. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // Computer Journal. 1965. Vol. 7 (4). P. 308–313.
15. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // Proc. of the OCEANS'15 MTS/IEEE Washington DC. October 19-22, 2015. ISBN DVD:978-0-933957-43-5.

Сведения об авторах

БОБКОВ Валерий Александрович, доктор технических наук, главный научный сотрудник
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Почтовый адрес: 690041 Владивосток, ул. Радио, 5, к 408
Область научных интересов: Компьютерная графика, Машинное зрение, Автономные подводные аппараты
Тел.: 89147967295
E-mail: bobkov@dvo.ru
ORCID: 0000-0001-9722-5158

ШУПИКОВА Антонина Аркадьевна, ведущий инженер-программист
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Почтовый адрес: 690041 Владивосток, ул. Радио, 5, к 408
Область научных интересов: Компьютерная графика, Машинное зрение, Автономные подводные аппараты
Тел.: (+74232)313776
E-mail: antoninash@inbox.ru
ORCID: 0000-0003-4308-9191

Для цитирования:

Бобков В.А., Шупикова А.А. ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА ПО СТЕРЕОСНИМКАМ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 43–49. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_05. EDN: DPUWAX.

DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_05

OPTIMIZED UNDERWATER TRACKING METHOD PIPELINE BASED ON STEREO IMAGES

V.A. Bobkov, A.A. Shupikova

The problem of automatic tracking of an underwater pipeline (UP) from stereo images using an autonomous uninhabited underwater vehicle (AUV) is considered. It is noted that traditional methods of boundary recognition on vectorized images are often ineffective in an underwater environment due to poor image quality, partial immersion of the pipeline in the ground, and high computational complexity. A modification of the method previously developed by the authors for calculating the centerline of UP based on the generation of a 3D point cloud is proposed, which includes two improvements: varying the starting point of the current section of the centerline in a small neighborhood to reduce the error and replacing the complete enumeration of angular positions with optimization using the Nelder–Meade algorithm. The experiments were carried out on model data in a virtual environment with a realistic seabed texture at different image resolutions, the heights of the AUV movement and the degree of siltation of the UP. It is shown that the modified method provides higher accuracy of localization of the centerline and significantly exceeds the basic version in computational performance. It has been established that the method remains operational when the pipeline is silted, and is also resistant to the curvature of the route. In conclusion, it is noted that further research will be aimed at testing the method on real data.

References

1. Yu Y. et al. Techniques and Challenges of Image Segmentation: A Review // Electronics. 2023. No. 12(5). P. 1199. https://doi.org/10.3390/electronics12051199

2. Canny J.F. A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. 8. P. 679–698.

3. Kanopoulos N., Vasanthavada N., Baker R.L. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1988. Vol. 23(2). P. 358–367.

4. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9, No. 1. P. 62–66.

5. Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en parties // Bull. Acad. Polon. Sci. 1956. Vol. 4. P. 801–804. (in French).

6. Duda R.O., Hart P.E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // Communications of the ACM. 1972. Vol. 15(1). P. 11–15.

7. Elfring J., Torta E., van de Molengraft R. Particle Filters: A Hands-On Tutorial // Sensors. 2021. Vol. 21(2). P. 438.

8. Bobkov V., Shupikova A., Inzartsev A. Recognition and Tracking of an Underwater Pipeline from Stereo Images during AUV-Based Inspection // J. Mar. Sci. Eng. 2023. Vol. 11(10).

9. Alex Raj S.M., Abraham R.M., Supriya M.H. Vision-Based Underwater Cable/Pipeline Tracking Algorithms in AUVs: A Comparative Study // Int. J. Eng. Adv. Technol. (IJEAT). 2016. Vol. 5. P. 48–52.

10. Ho M., El-Borgi S., Patil D., Song G. Inspection and monitoring systems subsea pipelines: A review paper // Review. Structural Health Monitoring. 2020. Vol. 19(2). P. 606–645.

11. Bobkov V., Shupikova A., Inzartsev A. Recognition and Tracking of an Underwater Pipeline from Stereo Images during AUV-Based Inspection. J. Mar. Sci. Eng. 2023. Vol. 11(10)

12. Bobkov V.A., Shupikova A.A. A method for tracking an underwater pipeline from stereo images using an autonomous underwater vehicle. Informacionnye Tehnologii. 2024. Vol. 30. No. 10. P. 528-536. doi:10.17587/it.30.528-536

13. Bobkov V.A., Kudryashov A.P., Inzartsev A.V. Technology of AUV High-Precision Referencing to Inspected Object // Gyroscopy and Navigation. 2019. Vol. 10, No. 4. P. 322–329. https://doi.org/10.1134/S2075108719040060.

14. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // Computer Journal. 1965. Vol. 7 (4). P. 308–313.

15. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // Proc. of the OCEANS'15 MTS/IEEE Washington DC. October 19-22, 2015. ISBN DVD:978-0-933957-43-5.

Information about the authors

BOBKOV Valery Alexandrovich, д-р техн. наук, глав. науч. сотр.
Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
Work address: Russia, Vladivostok, st. Radio 5
Research Interests: computer graphics, computer vision, image processing and pattern recognition
E-mail: bobkov@iacp.dvo.ru
Тел. раб.: (+74232)313776
ORCID: 0000-0001-9722-5158

SHUPIKOVA Antonina Arkadyevna, вед. инженер-программист,
Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
Work address: Russia, Vladivostok, st. Radio 5
Research Interests: computer graphics, computer vision, image processing and pattern recognition
E-mail: antoninash@inbox.ru
Тел. раб.: (+74232)313776,
ORCID: 0000-0003-4308-9191

УДК 527.62
EDN: GEEWUG
DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_06

О МЕТОДЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ АНПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАНС КБ

А.Ф. Щербатюк

В статье предложен экономичный способ решения задачи одновременного определения координат группы недорогих автономных необитаемых подводных аппаратов /АНПА/. Полагается, что на борту каждого АНПА отсутствуют дорогостоящие системы точного времени и абсолютные датчики скорости. Представленный способ навигационного обеспечения группы АНПА основан на использовании гидроакустической навигационной системы с короткой базой /ГАНС КБ/. Рассмотрено исполнение ГАНС КБ, которое включает две приемные антенны на борту каждого АНПА и один излучающий маяк с известным местоположением. Для решения навигационной задачи используются измерения разности времени прихода сигнала в каждом такте на приемные антенны ГАНС КБ, разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну и измерения частоты принятого на борту АНПА сигнала. Описан алгоритм оценивания местоположения АНПА на основе фильтра частиц, предназначенный для работы на борту каждого АНПА в режиме реального времени. Представлены результаты работы предложенного алгоритма, полученные в процессе компьютерного моделирования, которые подтвердили его более высокую точность по сравнению с версией алгоритма, в которой измерения разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну не используются.

Ключевые слова: гидроакустическая навигация с короткой базой, групповая навигация, автономный необитаемый подводный аппарат.

1. Введение

В последние годы интенсивно разрабатываются методы, связанные с применением групп АНПА для решения широкого круга задач. АНПА все чаще применяются в задачах, связанных с поисковыми и наблюдательными миссиями. Примерами таких сценариев могут быть поисковые и инспекционные операции [1–3], миссии по охране акваторий [4, 5], отслеживание морских животных [6]. При выполнении экологического мониторинга водной среды возникают задачи локализации неоднородных областей в толще воды, оценивания запасов полей фитопланктона, обследования разливов нефти и других пространственных загрязнений [7].

Применение групп подводных аппаратов позволяет повысить эффективность выполнения подобных миссий по сравнению с использованием одиночного АНПА. В частности, использование таких групп обеспечивает более высокую надежность робототехнического комплекса в целом за счет введения некоторого уровня избыточности, позволяющей получать более качественные результаты и добиваться успешного решения поставленной задачи даже в случае возникновения аварийных ситуаций, например, выхода из строя одного или нескольких АНПА. В статье [8] рассмотрена задача организации эффективного сбора информации с сенсорных узлов автономной подводной сети на морском дне с помощью группы АНПА.

В связи с увеличением работ, в которых используются группы АНПА, актуальной становится задача уменьшения стоимости как самих АНПА, так и их навигационного обеспечения. При этом достижение требуемой точности навигации каждого АНПА из состава группы является одной из важнейших задач, определяющих успешность и качество выполнения подводных миссий. В настоящее время в большинстве случаев требуется знание координат АНПА с точностью не хуже 10 метров, а в отдельных случаях необходимо обеспечить субметровую точность при условии, что продолжительность работы подводно-

го аппарата может составлять несколько десятков часов. В работе [9] предложен экономичный метод групповой навигации АНПА при обслуживании сети донных сенсорных узлов, позволяющий обойтись без использования штатных гидроакустических маяков и дорогостоящих опорных подводных аппаратов, оснащенных высокоточными навигационными системами.

В представленной статье предложен экономичный способ решения задачи одновременного определения координат группы недорогих АНПА, основанный на использовании гидроакустической навигационной системы с короткой базой. Рассмотрен вариант исполнения ГАНС КБ, который включает отдельный маяк, периодически излучающий акустический сигнал, и две приемные антенны на борту каждого АНПА. Для решения навигационной задачи используются измерения разности времени прихода сигнала в каждом такте на приемные антенны ГАНС КБ, разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну и измерения частоты принятого на борту АНПА сигнала. Описан алгоритм оценивания местоположения АНПА на основе фильтра частиц. Использование измерений разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну позволяет повысить точность позиционирования АНПА по сравнению с навигационной системой, описанной в [10], в которой эти данные не используются.

В части 2 статьи рассмотрена постановка задачи навигационного обеспечения группы АНПА с использованием гидроакустической навигационной системы с короткой базой. Алгоритм одновременного определения местоположения всех АНПА из группы на основе модели их движения и использования информации от ГАНС КБ, рассмотрен в части 3. Описание результатов компьютерного моделирования работы предложенного алгоритма позиционирования АНПА приведено в части 4.

2. Задача обеспечения навигации группы АНПА с использованием ГАНС КБ

Рассмотрим оценивание местоположения произвольного АНПА из группы в неподвижной системе координат, связанной с наземным пунктом управления, в которой оси *Ox, Oy* и *Oz* направлены соответственно на север, восток и вертикально вниз. Положим, что траектория АНПА лежит в горизонтальной плоскости и состоит из прямолинейных галсов, при выполнении которых подводный аппарат движется постоянным курсом с фиксированной скоростью на заданной глубине. Такой способ формирования траектории используется при решении большинства практических задач, связанных с обследованием указанных областей или инспектированием подводных технических сооружений, таких как подводные добычные комплексы /ПДК/. Без ограничения общности можно полагать, что маяк находится в заданной точке с координатами (x_a, y_a, z_a). Положим, что на каждом АНПА отсутствуют система точного времени и абсолютный датчик скорости, но известен период τ излучения навигационных сигналов маяком. В связи с отсутствием системы точного времени часы АНПА и маяка рассинхронизированы и отсутствует возможность измерить с требуемой точностью время распространения акустического сигнала от маяка до антенн АНПА.

Задача обеспечения навигации группы АНПА заключается в одновременном определении местоположения с требуемой точностью каждого АНПА из группы [11]. Оцениваемый вектор состояния каждого АНПА включает его горизонтальные координаты (x, y). Положим, что в начальный момент времени местоположение АНПА равновероятно находится в любой точке квадратной области со стороной d_{xy}.

Бортовая навигационная система обеспечивает измерение курса $\tilde{K}_k$:

$$\tilde{K}_k = K_k + K_{\xi k}, \quad (1)$$

где K_k – истинное значения курса, $K_{\xi k}$ – центрированные ошибки в виде белого шума.

Для решения указанной задачи используется информация от ГАНС КБ, которая включает отдельный маяк, местоположение которого известно. Полагается, что маяк установлен примерно на той же глубине, на которой работает АНПА. При выполнении глубоководных обзорно-поисковых операций во многих случаях маяк выставляется на глубине работы АНПА для уменьшения ошибок, связанных с распространением звука в вертикальной плоскости. Аналогичная ситуация и при инспектировании ПДК, где имеется штатный маяк, который включается по сигналу при работе АНПА. Две приемные антенны ГАНС КБ на борту каждого АНПА расположены вдоль его корпуса и фиксируют моменты (t_1, t_2) приема сигналов от маяка в каждом такте работы ГАНС КБ. Интервал времени $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$ пропорционален разности расстояний между приемными антеннами и маяком. Предполагается, что блок обработки принятых акустических сигналов на АНПА обеспечивает измерение частоты принятого сигнала $\tilde{f}_k$:

$$\tilde{f}_k = f_k + \xi_{fk}, \quad (2)$$

где f_k – истинное значения частоты принятого сигнала, ξ_{fk} – центрированные ошибки в виде белого шума.

В соответствии с уравнением Доплера имеем:

$$f_k = (1 + (v_k/c) \cdot \cos\theta_k) \cdot f_s \qquad (3)$$

где f_s – известная частота сигнала источника, v_k – скорость приемника и θ_k – относительный пеленг на источник сигнала (маяк), c – скорость распространения звукового сигнала в воде. Полагалось, что она рассчитывалась на АНПА с учетом информации от бортовых датчиков температуры, солености и давления с необходимой точностью. Знак плюс в выражении (3) выбран в предположении, что АНПА движется по направлению к маяку. В соответствии с [12], относительный пеленг θ_k на маяк связан со значением базового расстояния a между приемными антеннами ГАНС КБ на АНПА в k-ом такте соотношением:

$$\theta_k = \arccos(c \cdot \Delta t_{12k}/a). \qquad (4)$$

Используя выражения (3) и (4), можно получить соотношение для скорости v_k:

$$v_k = (a/\cdot \Delta t_{12k})((\frac{f_k}{f_s}) - 1). \qquad (5)$$

Следуя принципу распределения информации [13, 14] и используя измерения курса $\tilde{K}_k$ и частоты принятого сигнала $\tilde{f}_k$ в качестве входного сигнала в уравнениях для истинных координат отдельного подводного аппарата на $к$-ом такте работ, можно следующим образом записать уравнения для его вектора состояния:

$$x_k = x_{k-1} + \tau \cdot \tilde{v}_k \cdot \cos(\tilde{K}_k) + \xi_x,$$
$$y_k = y_{k-1} + \tau \cdot \tilde{v}_k \cdot \sin(\tilde{K}_k) + \xi_y, \qquad (6)$$

где (ξ_x, ξ_y) – ошибки из-за неточных измерений курса и частоты. При малых $K_{\xi k}$ и ξ_{fk}, с учетом

$$\cos(K_k) \approx \cos(\tilde{K}_k) + \sin(\tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k},$$

$$\sin(K_k) \approx \sin(\tilde{K}_k) - \cos(\tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k}$$

получим

$$\xi_x = \tau\left[\tilde{v}_k \sin(\tilde{K}_k) K_{\xi k} + (\frac{\cos(\tilde{K}_k)a}{(f_s\,\Delta\tilde{t}_{12k})}) \times \left(\frac{\xi_{t1k}(\tilde{f}_k - f_s)}{\Delta\tilde{t}_{12k}} + \xi_{fk}\right)\right]$$

$$\xi_y = \tau[-\tilde{v}_k \cos(\tilde{K}_k) K_{\xi k} + (\frac{\sin(\tilde{K}_k)a}{(f_s\,\Delta\tilde{t}_{12k})})\left(\frac{\xi_{t1k}(\tilde{f}_k - f_s)}{\Delta\tilde{t}_{12k}} + \xi_{fk}\right)],$$

где

$$\tilde{v}_k = (a/\Delta\tilde{t}_{12k})((\tilde{f}_k/f_s) - 1). \qquad (7)$$

При оценке вектора состояния АНПА также используются измерения разности времен распространения сигнала на две приемные антенны АНПА в текущем такте ГАНС КБ $\Delta\tilde{t}_{12k}$ и разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну $\Delta\tilde{t}_{k,k-1}$.

Допустим в k -ом такте работы имеются измерения времен прихода сигналов на первую и вторую антенны на АНПА $\tilde{t}_{1k}$ и $\tilde{t}_{2k}$:

$$\tilde{t}_{1k} = t_{1k} + \xi_{1k}, \tilde{t}_{2k} = t_{2k} + \xi_{2k},$$

в k-1-ом такте работы системы имеется измерение $\tilde{t}_{1k-1}$:

$$\tilde{t}_{1k-1} = t_{1k-1} + \xi_{1k-1},$$

где ξ_{1k}, ξ_{2k} и ξ_{1k-1} – независимые центрированные случайные величины в виде белого шума с дисперсией σ^2.

Для измерения $\Delta\tilde{t}_{12k}$ разности прихода сигнала в одном такте на разные антенны имеем:

$$\Delta\tilde{t}_{12k} = \Delta t_{12k} - \xi_{12k}, \qquad (8)$$
$$\xi_{12k} = \xi_{1k} - \xi_{2k},$$

где Δt_{12k} - истинное значения разности времен, ξ_{12k} – центрированная случайная величина в виде белого шума с дисперсией $\sigma_1^2 = 2\sigma^2$.

Для истинных значений разности времен имеем:

$$\Delta t_{12k} = h_1(x_k, y_k, K_k) = (D_{a2k} - D_{a1k})/c, \qquad (9)$$
$$D_{a2k} = \sqrt{(x_a - x_{a2k})^2 + (y_a - y_{a2k})^2 + (z_a - z)^2},$$
$$D_{a1k} = \sqrt{(x_a - x_{a1k})^2 + (y_a - y_{a1k})^2 + (z_a - z)^2},$$
$$x_{a2k} = x_k + a \cdot \cos(K_k)/2,$$
$$y_{a2k} = y_k + a \cdot \sin(K_k)/2,$$
$$x_{a1k} = x_k - a \cdot \cos(K_k)/2,$$
$$y_{a1k} = y_k - a \cdot \sin(K_k)/2,$$

где (x_k, y_k) – истинные координаты АНПА, (x_{a1k}, y_{a1k}), (x_{a2k}, y_{a2k}) – истинные координаты первой и второй антенн АНПА.

Выразим $\Delta\tilde{t}_{12k}$ через измеренное значение курса $\tilde{K}_k$. С учетом только членов первого порядка малости получим:

$$\Delta\tilde{t}_{12k} = h_1(x_k, y_k, \tilde{K}_k - K_{\xi k}) + \xi_{12k} \approx$$
$$\approx h_1(x_k, y_k, \tilde{K}_k) + \xi_{12k} - g_1(x_k, y_k, \tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k}, \qquad (10)$$

где

$$g_1(x_k, y_k, \tilde{K}_k) =$$
$$= \frac{a}{2c}[((x_a - \tilde{x}_{a2k}) \sin\tilde{K}_k - (y_a - \tilde{y}_{a2k})\cos\tilde{K}_k)/\tilde{D}_{a2k} +$$
$$+((x_a - \tilde{x}_{a1k}) \sin\tilde{K}_k - (y_a - \tilde{y}_{a1k})\cos\tilde{K}_k)/\tilde{D}_{a1k}],$$

$\tilde{D}_{a2k}, \tilde{D}_{a1k}, \tilde{x}_{a2k}, \tilde{y}_{a2k}, \tilde{x}_{a1k}, \tilde{y}_{a1k}$ – дальности от маяка до антенн на АНПА и координаты антенн, полученные на основе измеренных значений курса $\tilde{K}_k$. Следует отметить, что в (10) слагаемое $g_1(x_k, y_k, \tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k}$ приобретает мультипликативный характер из-за

зависимости от оцениваемых координат АНПА.

Для измерения $\Delta\tilde{t}_{k-1,k}$ разности прихода сигнала в последовательных тактах на одну антенну имеем:

$$\Delta\tilde{t}_{k-1,k} = \Delta t_{k-1,k} + \xi_{k-1,k}, \qquad (11)$$
$$\xi_{k-1,k} = \xi_{1k} - \xi_{1k-1},$$

где $\Delta t_{k-1,k}$ – истинное значения разности времен, $\xi_{k-1,k}$ – центрированная случайная величина в виде белого шума с дисперсией $\sigma_2^2 = 2\sigma^2$.

Для истинных значений разности времен имеем:

$$t_k = t_k^s + D_{a1k}/c,\ t_{k-1} = t_{k-1}^s + D_{a1k-1}/c,$$
$$t_k^s - t_{k-1}^s = \tau,$$

где t_k^s и t_k – моменты времени излучения и приема сигнала в *k*-ом такте, t_{k-1}^s и t_{k-1} – моменты времени излучения и приема (*k -1*)-ом такте, откуда вычитанием получаем:

$$\Delta t_{k-1,k} = h_2(x_k, y_k, x_{k-1}, y_{k-1}, K_k, K_{k-1}) =$$
$$= (D_{a1k} - D_{a1k-1})/c + \tau, \qquad (12)$$
$$D_{a1k-1} =$$
$$= \sqrt{(x_a - x_{a1k-1})^2 + (y_a - y_{a1k-1})^2 + (z_a - z)^2},$$
$$x_{a1k-1} = x_{k-1} - a \cdot \cos(K_{k-1})/2,$$
$$y_{a1k-1} = y_{k-1} - a \cdot \sin(K_{k-1})/2,$$

где (x_{k-1}, y_{k-1}) – истинные координаты АНПА и (x_{a1k-1}, y_{a1k-1}) – истинные координаты первой антенны АНПА на $(k-1)$–ом такте работы ГАНС КБ.

Выразим $\Delta\tilde{t}_{k,k-1}$ через измеренные значения курса $\tilde{K}_k$ и $\tilde{K}_{k-1}$. С учетом только членов первого порядка малости, получим:

$$\Delta\tilde{t}_{k,k-1} =$$
$$= h_2(x_k, y_k, x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_k - K_{\xi k}, \tilde{K}_{k-1} - K_{\xi k-1}) +$$
$$+\xi_{k-1,k} \approx h_2(x_k, y_k, x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_k, \tilde{K}_{k-1}) + \xi_{k-1,k} -$$
$$-g_{21}(x_k, y_k, \tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k} - g_{22}(x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_{k-1}) \cdot K_{\xi k-1}, \qquad (13)$$

где

$$g_{21}(x_k, y_k, \tilde{K}_k) =$$
$$\frac{a}{2c}((x_a - x_{a1k}) \sin \tilde{K}_k - (y_a - y_{a1k}) \cos \tilde{K}_k) / \tilde{D}_{a1k},$$
$$g_{22}(x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_{k-1}) = \frac{a}{2c}((x_a - x_{a1k-1}) \sin \tilde{K}_{k-1} -$$
$$-(y_a - y_{a1k-1}) \cos \tilde{K}_{k-1}) / \tilde{D}_{a1k-1},$$

$\tilde{D}_{a1k-1}, \tilde{x}_{a1k-1}, \tilde{y}_{a1k-1}$ – дальности от маяка до антенн на АНПА и координаты антенн, полученные на (k-1)–ом такте работы ГАНС КБ на основе измеренных значений курса $\tilde{K}_{k-1}$. Следует отметить, что в (13) слагаемые $g_{21}(x_k, y_k, \tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k}$ и $g_{22}(x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_{k-1}) \cdot K_{\xi k-1}$ также приобретают мультипликативный характер из-за зависимости от оцениваемых координат АНПА.

Таким образом, задачу оценивания местоположения каждого АНПА будем рассматривать как задачу фильтрации вектора состояния (6) по измерениям (1), (2), (8) и (11) при описанных выше свойствах ошибок $\xi_{k-1,k}, \xi_{12k}, K_{\xi k}$ и ξ_{fk} Случайные величины $\xi_{k-1,k}$ и ξ_{12k} коррелированные с ковариационным моментом $E[(\xi_{1k} - \xi_{2k})(\xi_{1k} - \xi_{1k-1})] = E(\xi_{1k}\,\xi_{1k}) = \sigma^2$.

При этом априорная вероятности оцениваемого вектора состояния в начальный момент времени описывается равномерной функцией в любой точке квадратной области со стороной d_{xy}. На рис. 1 показаны последовательные положения АНПА на *к-1*-ом и *к*-ом тактах работы ГАНС КБ.

3. Алгоритм одновременного оценивания местоположений АНПА в группе на основе данных от ГАНС КБ

В соответствии с постановкой задачи, приведенной в части 2, оцениваемые параметры связаны с измеряемыми величинами нелинейными уравнениями, и функция распределения ошибок (ξ_x, ξ_y) отличается от гауссовского распределения. Для решения указанной задачи, заключающейся в одновременном оценивании местоположения каждого АНПА из группы при наличии описанных ошибок в измерениях, используем алгоритм на основе фильтра частиц /ФЧ/, который работоспособен в нелинейных и негауссовских средах.

Рассмотрим оценивание местоположения произвольного АНПА из группы. Сформируем облако из *N* частиц, равномерно распределенных в 2-мерном пространстве *(x, y),* где *x* и *y* – координаты АНПА в горизонтальной плоскости. Нормированные веса для всех частиц в начальный момент времени принимаются одинаковыми и равными $\omega^i = 1/N$, где *i* – номер частицы. Каждая частица представляет собой возможное местоположение АНПА в соответствии с уравнением (6).

На этапе экстраполяции работы ФЧ выполняется расчет предсказываемого местоположения $(\tilde{x}_k^e, \tilde{y}_k^e)$ в *k*-ом такте работы ГАНС КБ. При этом используются полученные на предыдущем шаге оценки $(\hat{x}_{k-1}^p, \hat{y}_{k-1}^p)$, а также предполагаемое перемещение АНПА:

$$\tilde{x}_k^e = \hat{x}_{k-1}^p + \tau \cdot \tilde{v}_k \cdot \cos(\tilde{K}_k),$$
$$\tilde{y}_k^e = \hat{y}_{k-1}^p + \tau \cdot \tilde{v}_k \cdot \sin(\tilde{K}_k),$$

где $\tilde{v}_k$ – оценка скорости в соответствии с (7), а $\tilde{K}$ – измерение курса движения АНПА.

На этапе коррекции работы фильтра частиц на *k*-ом такте работы ГАНС КБ уточняются веса частиц на основе рассогласования измеренной разности $\Delta\tilde{t}_{12k}$ времени прихода сигналов на первый и второй приемники ГАНС КБ на АНПА и разности времени прихода сигналов Δt^i_{12k}, вычисленной согласно (9) при $x_k = x^i_k, y_k = y^i_k$, для всех частиц с использованием измеренного курса $\tilde{K}_k$, а также рассогласования измеренной разности $\Delta\tilde{t}_{k,k-1}$ времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА и разности времени прихода сигналов $\Delta t^i_{k,k-1}$, вычисленной согласно (12) при $x_k = x^i_k, y_k = y^i_k$ и $x_{k-1} = x^i_{k-1}, y_{k-1} = y^i_{k-1}$ для всех частиц с использованием измеренных курсов $\tilde{K}_k$ и $\tilde{K}_{k-1}$.

При этом коррекция ненормированных весов частиц выполняется с помощью функции правдоподобия, соответствующей приведенной выше модели для измерений:

$$\tilde{\omega}^i_k = (\tilde{\omega}^i_{k-1}/\sqrt{\det D_{i,k,k-1}}) \times \\ \times \exp(-0.5(\Delta\tilde{t}_{12k} - \Delta t^i_{12k})^T \times \\ \times D^{-1}_{i,k,k-1}(\Delta\tilde{t}_{k,k-1} - \Delta t^i_{k,k-1})), \quad (14)$$

где $\tilde{\omega}^i_k$ – ненормированный вес частицы, $D_{i,k,k-1}$ – ковариационная матрица, которая имеет вид:

$$D_{i,k,k-1} = \begin{vmatrix} \sigma_{i,12k}{}^2 & \sigma_{i,12,k,k-1}{}^2 \\ \sigma_{i,12,k,k-1}{}^2 & \sigma_{i,k,k-1}{}^2 \end{vmatrix},$$

где

$$\sigma_{i,12k}{}^2 = \sigma_1^2 + \sigma^2_{i,g_1} = 2\sigma^2 + \sigma^2_{i,g_1}, \sigma_{i,k,k-1}{}^2 = \\ = \sigma_2^2 + \sigma^2_{i,g_{21}} + \sigma^2_{i,g_{22}} = 2\sigma^2 + \sigma^2_{i,g_{21}} + \sigma^2_{i,g_{22}},$$

$$\sigma_{i,12,k,k-1}{}^2 = \sigma^2 + g_1(x_k, y_k, \tilde{K}_k) \times \\ \times [g_{21}(x_k, y_k, \tilde{K}_k) + g_{22}(x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_{k-1})]\sigma^2_K,$$

где σ^2_K – дисперсия ошибки измерения курса. После вычисления весов всех частиц согласно (14) их веса нормируются.

Для повышения эффективности работы фильтра частиц применяется процедура перевыборки [15], связанная с тем, что в процессе его работы лишь небольшое число частиц будет иметь существенные, отличные от нуля веса. Эта процедура выполняется аналогично тому, как это описано в [10]. В качестве оценки местоположения ($\hat{x}^p_{ik}$, $\hat{y}^p_{ik}$) для *i*-го АНПА из группы на *k*-м шаге работы ГАНС КБ используется взвешенное значение координат для всех частиц.

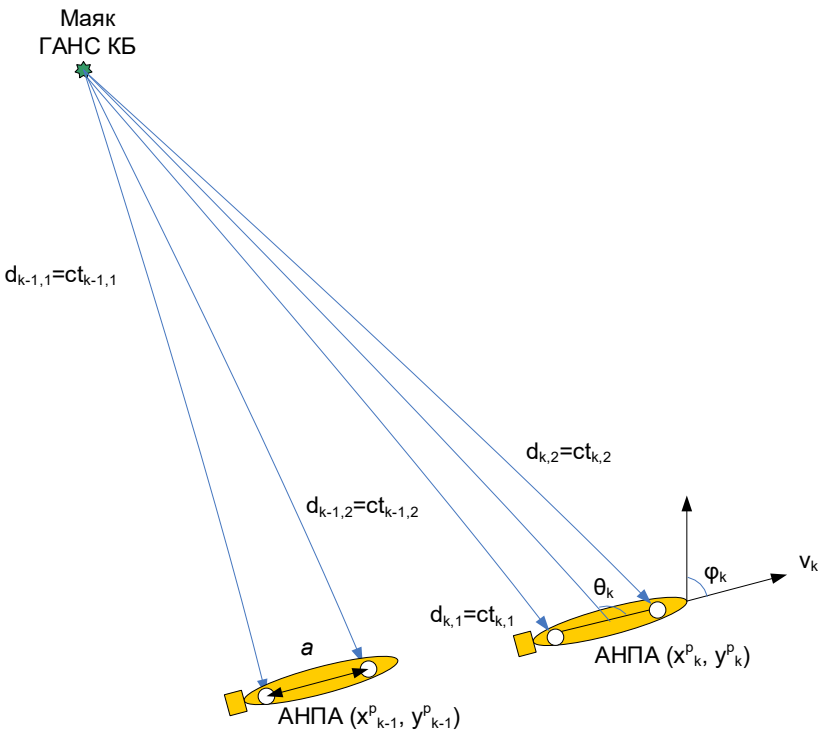


Рис. 1. Последовательные положения АНПА на *к-1*-ом и *к*-ом тактах работы ГАНС КБ

4. Некоторые результаты моделирования работы навигационного алгоритма на основе данных ГАНС КБ

С целью исследования работоспособности навигационного алгоритма определения местоположения АНПА были выполнены численные эксперименты. Для компьютерного моделирования использовалась среда IDLE (Python). При этом были приняты следующие параметры: период работы ГАНС КБ – 10 секунд, расстояние между приемными антеннами на АНПА – 2 метра, скорость распространения звукового сигнала в воде – 1500 м/с. Полагалось, что скорость течения в районе работ отсутствует. Начальная область неопределенности местоположения АНПА представляла собой квадрат со стороной 100 м. Предполагалось равновероятное нахождение АНПА в любой точке указанного квадрата.

В процессе модельных экспериментов использовалось облако из 8000 частиц. При этом каждый эксперимент выполнялся с использованием метода Монте-Карло и заключался в выполнении по 100 раз

моделирования с одинаковыми заданными параметрами и разными случайными ошибками. На основе полученных результатов рассчитывались среднее значение и дисперсия ошибок оценивания местоположения АНПА.

На рис. 2 показана расчетная траектория движения АНПА в течении 150 тактов работы ГАНС КБ, которая была получена в одном из экспериментов. АНПА стартовал из точки с координатами (-3000, -2000) м. Маяк был расположен в точке с координатами (0, 0) м. Параметры движения АНПА в горизонтальной плоскости: скорость 1 м/с, курс 45 град. Пройденный путь составил около 1500 м и время в пути – около 25 мин.

При моделировании на первом такте работы ГАНС КБ для уточнения весов частиц использовались только рассогласования измеренной разности $\Delta\tilde{t}_{121}$ времени прихода сигналов на первую и вторую приемные антенны ГАНС КБ на АНПА и разности времени прихода сигналов Δt^i_{121}, вычисленной согласно (9) при $x_1 = x^i_1, y_1 = y^i_1$ для всех частиц с использованием измеренного курса $\tilde{K}_1$. В последующих тактах работы ГАНС КБ для уточнения весов частиц также использовались рассогласования измеренной разности $\Delta\tilde{t}_{k,k-1}$ времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА и разности времени прихода сигналов $\Delta t^i_{k.k-1}$, вычисленной согласно (12) при $x_k = x^i_k, y_k = y^i_k$ и $x_{k-1} = x^i_{k-1}, y_{k-1} = y^i_{k-1}$ для всех частиц с использованием измеренных курсов $\tilde{K}_k$ и $\tilde{K}_{k-1}$.

Результирующие ошибки оценивания координат формировались посредством вычисления расстояния в одинаковые моменты времени между положениями АНПА при безошибочных измерениях и положениями АНПА, когда измерения курса и разности времен прихода сигналов содержали указанные в данном разделе ошибки.

На первом этапе модельных экспериментов было выполнено сопоставление точности оценивания местоположения АНПА в случае использования для уточнения весов частиц рассогласования измеренной разности $\Delta\tilde{t}_{k,k-1}$ времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА и разности времени прихода сигналов $\Delta t^i_{k,k-1}$, вычисленной согласно (12) только с ним и без его использования.

Во всех модельных экспериментах полагалось, что измерения времен прихода сигналов содержат случайные центрированные и независимые ошибки в виде белого шума в соответствии с моделью, представленной в части 2. Измерения курса АНПА и частоты принятого сигнала также включали случайные центрированные и независимые ошибки в виде белого шума. Полагалось, что случайные ошибки в измерениях частоты находились в диапазоне (-0,01*f_s, 0,01*f_s), а случайные ошибки в измерениях курса – в диапазоне (-0,1, 0,1) град.

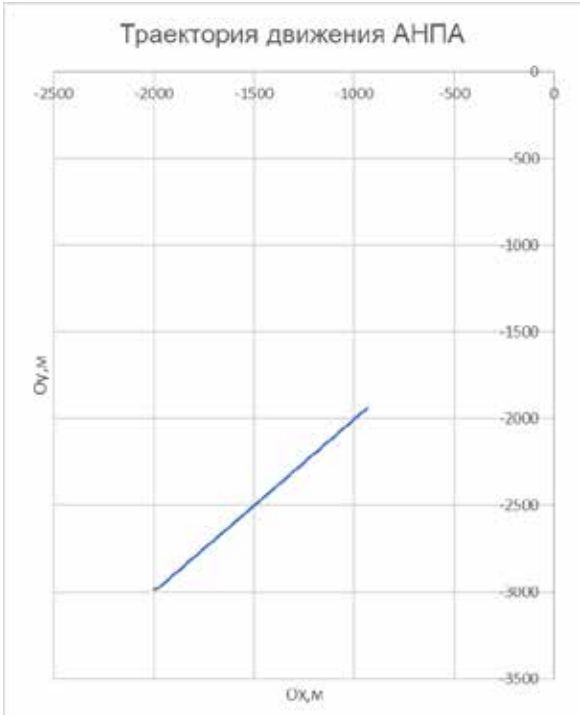


Рис. 2. Траектория АНПА, полученная с использованием указанных параметров его движения (маяк расположен в начале координат)

В случае, когда случайные ошибки в измерениях разности времен прихода сигналов соответствовали ГАНС средней точности и лежали в диапазоне (-0,3*10^{-4}, 0,3*10^{-4}) секунд, для ситуации с использованием рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА и рассогласования измеренной и вычисленной разности прихода сигналов в одном такте на разные антенны, среднее значение ошибки определения местоположения АНПА составило 1,35 м, среднеквадратическое отклонение – 0,87 м. При использовании только рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА среднее значение ошибки определения местоположения АНПА составило 4,43 м, среднеквадратическое отклонение – 1,33 м. При использовании только рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в одном такте на разные антенны среднее зна-

Рис. 3. Ошибки оценивания местоположения АНПА: серая кривая – при использовании рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах ГАНС КБ на одну антенну, оранжевая кривая – при использовании аналогичного рассогласования в одном такте на разные антенны, синяя кривая – при одновременном использовании двух указанных выше рассогласований, полученные при одинаковых уровнях ошибок измерений курса и времени прихода сигнала на антенны АНПА

чение ошибки определения местоположения АНПА составило 9,09 м, среднеквадратическое отклонение – 6,21 м. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА позволяет существенно повысить точность оценивания местоположения АНПА. Ошибки оценивания местоположения в течении работы НС с использованием описанного алгоритма, полученные при выполнении одного из указанных модельных экспериментов, показаны на рис. 3.

Полученный результат имеет физическое объяснений - точность акустической навигации повышается с увеличением размера базы – расстояния между приемными элементами. В рамках одного такта это расстояние соответствует расстоянию между приемными антеннами на корпусе АНПА – в данном случае 2 м. При использовании измерений между тактами это расстояние равно пути, который антенна проходит за период работы ГАНС в данном случае он равен: 10 с* 1м/с =10 м.

Затем были выполнены модельные эксперименты с целью исследования зависимости точности позиционирования АНПА при увеличении уровня ошибок измерения курса и разности времени прихода сигнала на антенны ГАНС КБ на АНПА, когда для уточнения весов частиц использовались рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА и измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в одном такте на разные антенны. В случае, когда случайные ошибки в измерениях разности времен прихода сигналов лежали в диапазоне (-10^{-3}, 10^{-3}) секунд, а случайные ошибки в измерениях курса – в диапазоне (-1, 1) градусов, среднее значение ошибки определения местоположения АНПА составило 3,35 м, среднеквадратическое отклонение – 2,17 м.

Рис. 4. Ошибки оценивания местоположения АНПА: синяя кривая – при ошибках в измерениях разности времен прихода сигналов, лежащих в диапазоне ($-0{,}3*10^{-4}$, $0{,}3*10^{-4}$) секунд и ошибках измерения курса - в диапазоне (-0.1, 0.1) градусов, оранжевая кривая – при ошибках в измерениях разности времен прихода сигналов, лежащих в диапазоне (-10^{-3}, 10^{-3}) секунд и ошибках измерения курса – в диапазоне (-1, 1) градусов

Полученный результат свидетельствует о работоспособности алгоритма, использующего для уточнения весов частиц рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну на АНПА и измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в одном такте на разные антенны, и в случае высокого уровня ошибок, соответствующих низкоточным ГАНС. На рис. 4 приведены ошибки оценивания местоположения, полученные в ходе одного из модельных экспериментов с указанными параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ferri G. et al. Cooperative robotic networks for underwater surveillance: an overview // IET Radar, Sonar & Navigation. 2017. Vol. 11, no. 12. P. 1740–1761.
2. Gabriele Ferri, Raffaele Grasso et al. A Hybrid Robotic Network for Maritime Situational Awareness // Results from the INFORE22 Sea Trial. Proceedings of the OCEANS 2022 MTS/IEEE Conference, Hampton, USA.
3. Kim, S.-M. et al. Operational concept and design of multiple AUVs for rapid underwater investigation in case of maritime accidents // Proceedings of the OCEANS 2024 MTS/IEEE Conference, Halifax, USA.
4. McNelly B., Whitcomb L., Brusseau J., Carr S. Evaluating Integration of Autonomous Underwater Vehicles into Port Protection // Proceedings of the OCEANS 2022 MTS/IEEE Conference, Hampton Roads, USA.
5. Павин А.М., Щербатюк А.Ф. О поиске источников шума группой взаимодействующих АНПА с применением генетического алгоритма // Подводные исследования и робототехника. 2024. №. 2 (48). С. 26–37.
6. Lin Y. et al. A Multi Autonomous Underwater Vehicle System for Autonomous Tracking of Marine Life // J. of Field Robotics. 2017. Vol. 34, no. 4. P. 757–774.
7. Tuphanov I.E., Scherbatyuk A.F. Designing Group Behavior Algorithms for Autonomous Underwater Vehicles in the Underwater Local Heterogeneities Survey Problem // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76, no. 5. P. 885–896.
8. Thompson J. at al. Multi-AUV Placement for Coverage Maximization in Underwater Optical Wireless Sensor Networks // Proceedings of the MTS/IEEE International Conference OCEANS 2020 MTS/IEEE. San-Diego, USA.
9. Щербатюк А.Ф. О методе навигации группы АНПА без использования гидроакустических маяков // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30, № 4 С. 106–121. DOI 10.17285/0869-7035.00106
10. Щербатюк А.Ф. Об экономичном способе обеспечения навигации недорогих АНПА с использованием ГАНС с короткой базой // Гироскопия и навигация. 2025. № 4.
11. Atwood D.K., Leonard J.J., Bellingham J.G., Moran B.A. An Acoustic Navigation System for Multiple Vehicles // Proc. Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology. September, 1995. P. 202–208.
12. Бородин В., Смирнов Г., Толстякова Н. и др. Гидроакустические навигационные средства. Л.: Судостроение, 1983, 263 с.
13. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. М.: Наука, 1979. 448 с.
14. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб: ГНЦ РФ - ЦНИИ «Электроприбор», 1998. 370 с.
15. Васильев В.А., Исаев А.М., Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы Монте-Карло в задачах обработки измерительной информации с использованием процедур перевыборки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2026. № 1.

Сведения об авторе

ЩЕРБАТЮК Александр Федорович, д.т.н., чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, улица Радио, 5

Научные интересы: разработка и использование морских робототехнических комплексов, навигационное обеспечение необитаемых подводных аппаратов

Тел. +7(902)52-38-156

E-mail: alex-scherba@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-7600-6711

Для цитирования:

Щербатюк А.Ф. О МЕТОДЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ АНПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАНС КБ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 50–58. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_06. EDN: GEEWUG.

DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_06

ABOUT METHOD OF INCREASING THE ACCURACY FOR AUVS GROUP POSITIONING USING ACOUSTICAL NAVIGATION SYSTEM WITH SHORT BASE LINE

A.F. Scherbatyuk

The paper proposes a cost-effective solution for simultaneously determining the coordinates for a group of inexpensive autonomous underwater vehicles (AUVs). It is assumed that each AUV lacks expensive precision time system and absolute velocity log. The presented method for providing navigation support for a group of AUVs is based on the use of a short-baseline acoustic navigation system (SB ANS). SB ANS implementation is considered, which includes two receiving antennas on board each AUV and one emitting beacon with a known location. To solve the navigation problem, measurements are made of the difference in signal arrival times in each cycle at the SB ANS receiving antennas, the difference in signal arrival times in two consecutive cycles at a single receiving antenna, and measurements of the frequency for the signal received on board the AUV. An algorithm for estimating the AUV's position based on a particle filter is described, designed for operation on board each AUV in real time. The results of the proposed algorithm computer simulation are presented, which confirmed its higher accuracy compared to the version of the algorithm in which measurements of the difference in the arrival time of signals in two consecutive clock cycles to one receiving antenna are not used.

Keywords: short-baseline acoustical navigation, group navigation, autonomous underwater vehicle.

References

1. Ferri G. et al. Cooperative robotic networks for underwater surveillance: an overview // IET Radar, Sonar & Navigation. 2017. Vol. 11, No. 12. P. 1740–1761.

2. Gabriele Ferri, Raffaele Grasso et al. A Hybrid Robotic Network for Maritime Situational Awareness: Results from the INFORE22 Sea Trial. Proceedings of the OCEANS 2022 MTS/IEEE Conference, Hampton, USA.

3. Kim, S.-M. et al. Operational concept and design of multiple AUVs for rapid underwater investigation in case of maritime accidents. Proceedings of the OCEANS 2024 MTS/IEEE Conference, Halifax, USA.

4. McNelly B., Whitcomb L., Brusseau J., Carr S. Evaluating Integration of Autonomous Underwater Vehicles into Port Protection. Proceedings of the OCEANS 2022 MTS/IEEE Conference, Hampton Roads, USA.

5. Pavin A.M., Scherbatyuk A.F. On the search for noise sources by a group of interacting auvs using a genetic algorithm // Underwater Research and Robotics. 2024. No. 2 (48). P. 26–37.

6. Lin Y. et al. A Multi Autonomous Underwater Vehicle System for Autonomous Tracking of Marine Life // J. of Field Robotics. 2017. Vol. 34, No. 4. P. 757–774

7. I. E. Tuphanov and A. F. Scherbatyuk. Designing Group Behavior Algorithms for Autonomous Underwater Vehicles in the Underwater Local Heterogeneities Survey Problem. Automation and Remote Control, 2015, Vol. 76, No. 5, pp. 885-896.

8. Thompson J. at al. Multi-AUV Placement for Coverage Maximization in Underwater Optical Wireless Sensor Networks // Proceedings of the MTS/IEEE International Conference OCEANS 2020 MTS/IEEE San-Diego, USA.

9. Scherbatyuk, A.F. Multiple AUV Navigation without Using Acoustic Beacons // Gyroscopy and Navigation, No. 4, 2022, pp. 106-121.

10. Scherbatyuk, A.F. A Cost-Effective Method of Navigation for Inexpensive AUVs Using a Short-Baseline Acoustic Positioning System. // Gyroscopy and Navigation, No. 4, 2025, pp. 116-129.

11. Atwood D. K., Leonard J.J., Bellingham J.G., Moran B.A. An Acoustic Navigation System for Multiple Vehicles // In Proc. Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology. September, 1995, pp. 202-208.

12. Borodin V., Smirnov G., Tolstyakova N. et al. Hydroacoustic Navigation Aids, Leningrad: Sudostorenie, 1983, 263 p.

13. Krasovskii, A.A., Beloglazov, I.N., and Chigin, G.P. Theory of Correlation-Extreme Navigation Systems, Moscow: Nauka, 1979, 448 p.

14. Stepanov, O.A. Application of the Theory of Nonlinear Filtering in the Problems of Navigation Information Processing, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 1998, 370 p.

15. Vasil'ev, V.A., Isaev, A.M., Stepanov, O.A., and Toropov, A.B., Monte Carlo methods in measurement information processing using resampling procedures, Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya, 2026, no. 1.

Information about the author

Scherbatyuk Alexander Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, corr.-member of RAS, chief scientist
Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 5, Radio st., Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: designing and application of marine robotic systems, positioning of unmanned underwater vehicles
Phone: +7(902)52-38-156. **E-mail**: alex-scherba@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7600-6711. **Scopus Author ID**: 6507204366
Web of Science Researcher ID: K-8737-2017

УДК 681.5+629.584
EDN: IPFLVU
DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_07

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СУДНА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО РАБОТУ АНПА

А.Ю. Коноплин, А.П. Юрманов, Д.В. Копылов

В статье решается задача обеспечения устойчивой гидроакустической связи между автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) и обеспечивающим его работу судном сопровождения или безэкипажным катером в процессе выполнения этим аппаратом подводных миссий в условиях открытого моря с использованием гидроакустической системы связи и навигации с ультракороткой базой. Известные подходы к позиционированию судна относительно движущегося по произвольному маршруту АНПА часто приводят к ухудшению качества связи или ее потере из-за увеличения расстояния до аппарата и роста собственных шумов судна. Для решения этой проблемы предложен метод формирования программных сигналов управления для позиционирования судна на основе модельно-предиктивного управления. Этот метод позволяет вычислять скорость и курс судна с учётом фактической и прогнозируемой траекторий АНПА, динамических характеристик этого судна и физических параметров гидроакустического канала связи. С целью максимизации отношения сигнал/шум (ОСШ), которое учитывает потери на распространение сигнала, уровень собственных шумов судна и помех моря, формируется целевая функция оптимизации. Для прогноза вектора состояния судна используется его динамическая модель с уравнением рыскания Номото. Задача оптимизации решается на каждом шаге вычислений с помощью квадратичного программирования в среде MATLAB. Проведено численное моделирование для траектории движения АНПА в виде последовательных галсов. Сравнение с двумя альтернативными подходами показало, что разработанный метод обеспечивает стабильно высокий уровень ОСШ, отсутствие потерь связи при минимально возможных перемещениях судна. Результаты исследований подтвердили эффективность предложенного метода для поддержания надёжного гидроакустического канала связи с АНПА, перемещающегося по протяженным морским полигонам.

Ключевые слова: гидроакустический канал связи, отношение сигнал/шум, моделирующее предиктивное управление, судно сопровождения, автономный необитаемый подводный аппарат, оптимизация траектории, гидроакустическая система связи и навигации с ультракороткой базой.

Введение

Эффективность проведения подводных операций с применением автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в условиях отрытого моря во многом зависит от качества и надежности гидроакустической связи между аппаратом и судном сопровождения, посредством которой передается телеметрия от АНПА и корректируются его миссии путем отправки команд по каналу связи. В большинстве случаев для таких работ АНПА оснащается гидроакустической системой связи и навигации с ультракороткой базой (ГАСНС УКБ), качество работы которой сильно зависит от внешних условий, шумовой обстановки, а также дистанции между АНПА и судном сопровождения. При этом рабочая зона действия системы, в которой АНПА должен находиться для обеспечения стабильной связи с судном, характеризуется техническими характеристиками ГАСНС УКБ, к которым относятся дальность связи и угол раскрыва антенны (рис. 1, *а*) [1, 2].

В реальных условиях глубоководных экспедиций при выполнении поисковых, инспекционных и технологических операций [3–5] маршрут и режимы движения АНПА задаются заранее, но они часто могут изменяться в процессе выполнения миссии при

обходе препятствий, движении вблизи идентифицируемого протяженного объекта, а также в случае остановок для дообследования целевого объекта и выполнения манипуляционных работ. Поэтому для обеспечения устойчивого канала связи с АНПА посредством ГАСНС УКБ необходимо согласованно перемещать судно сопровождения или безэкипажный катер (БЭК) вслед за аппаратом.

Наиболее распространенным подходом к организации совместной работы является позиционирование судна в центральной точке обследуемого полигона [6]. Данный подход предполагает, что дальности действия гидроакустического канала достаточно для покрытия всего полигона работ АНПА. Однако на практике это допущение зачастую является ошибочным, что приводит к значительному ухудшению или полной потере связи на периферийных участках маршрута. Такие ситуации возникали при выполнении экспедиционных работ с АНПА ММТ-3500. В частности, на рис. 1, *б* показан участок траектории движения АНПА, на котором аппарат покинул зону действия ГАСНС УКБ и прошел дистанцию около 200 метров, не имея связи с оператором и навигационной привязки, что могло привести к аварийной ситуации. В таких случаях оператор АНПА, основываясь на своем опыте, оценивает приближение аппарата к границам зоны действия ГАСНС УКБ и выдает команды судоводителям для перемещения судна.

Альтернативный подход, предполагающий движение судна по траектории, повторяющей маршрут АНПА [7], также обладает существенными недостатками. Несмотря на кажущуюся простоту реализации, данный подход является энергетически неэффективным. При этом ключевой проблемой является генерация самим судном сопровождения значительных подводных шумов при движении. Шумы работающих двигателей, винтов и вспомогательных систем создают существенные помехи в рабочей полосе частот гидроакустического канала, что приводит к значительному снижению отношения сигнал/шум (ОСШ) и, как следствие, к ухудшению качества связи и надежности передачи данных.

Поэтому в настоящее время все еще остается нерешенной проблема снижения качества или полная потеря связи с АНПА, перемещающимися по протяженным морским полигонам.

1. Постановка задачи

Для решения вышеуказанной проблемы в статье ставится задача разработки метода, который позволит формировать программные сигналы управления для позиционирования судна сопровождения или БЭК с учетом текущей и прогнозируемой траекторий АНПА, динамических характеристик судна и параметров гидроакустического канала связи с целью обеспечения стабильной связи с этим аппаратом.

Чтобы спрогнозировать перемещения судна и качество канала связи в будущем временном интервале, а затем оптимизировать программные сигналы управления с целью максимизации ОСШ на протяжении всей траектории движения АНПА с учётом ограничений, необходимо использовать методологию модельно-предиктивного управления [8, 9]. Указанные вычисления, как показано на рис. 2, должны выполняться на основе информации о положении судна и АНПА, характеристик ГАСНС УКБ, а также динамических характеристик судна, описывающих его инерционность и ограничения на управление. На основе этих данных должна решаться задача максимизации суммарного ОСШ на конечном горизонте прогнозирования, используя динамическую модель

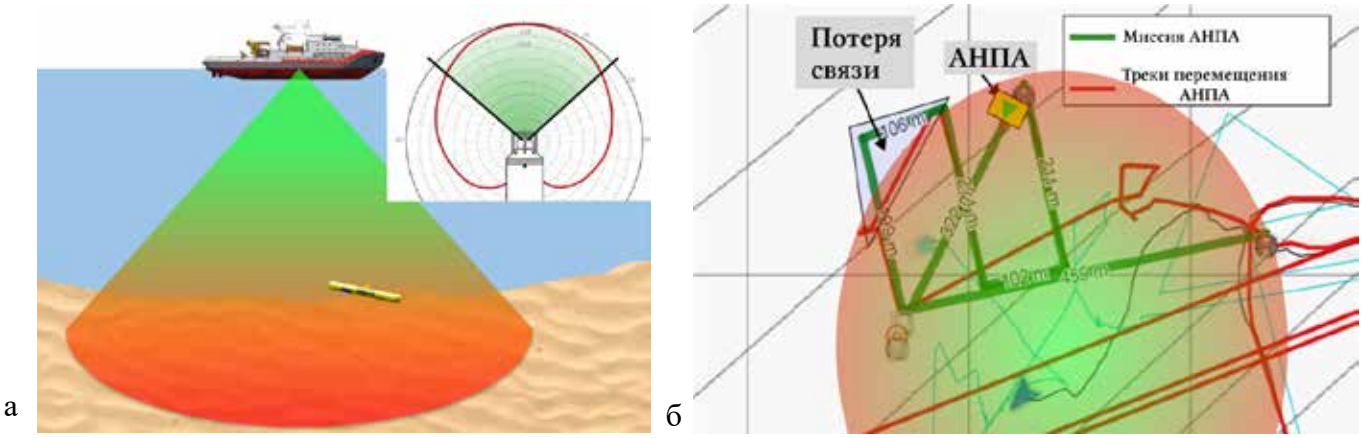


Рис. 1. Работа АНПА с ГАСНС УКБ: а – зона действия ГАСНС УКБ, б – треки перемещений АНПА ММТ-3500 при выполнении экспедиционных работ

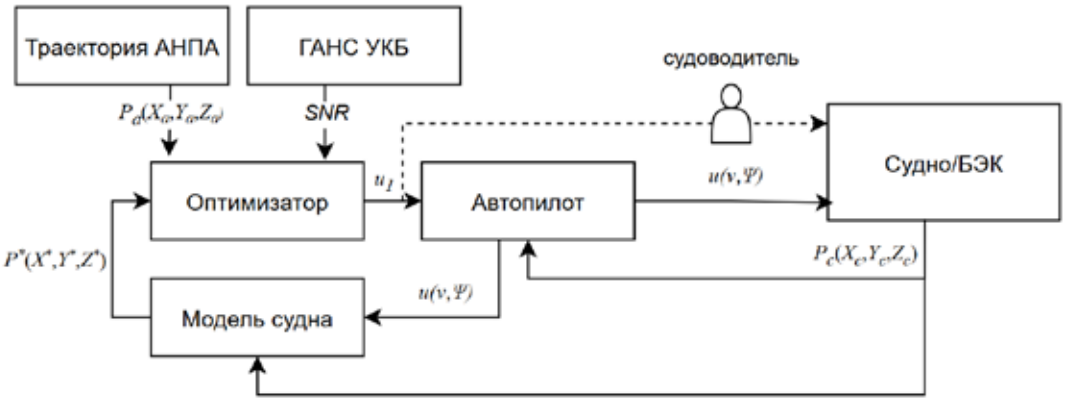


Рис. 2. Структурная схема работы метода

судна для предсказания его будущих положений. Это позволит определить последовательность программных сигналов управления $u_i = [v_i, \psi_i]^T, i \in [0, \frac{T}{\Delta t}]$, где v_i и ψ_i – скорость и курс судна в момент времени $t_i \in [t_0, t_0 + \Delta t, ..., T]$ соответственно; T – время выполнения миссии; Δt – шаг дискретизации. Затем рассчитанные программные сигналы должны передаваться судоводителю или на автопилот, а от него – на исполнительные устройства судна или БЭК. Весь расчет может быть выполнен перед выполнением миссии АНПА, а в случае изменения траектории движения аппарата или внешних условий программные сигналы управления для судна должны пересчитываться в реальном масштабе времени.

При расчетах будем использовать неподвижную прямоугольную систему координат $X_0Y_0Z_0$, которая в момент t_0 совпадает с системой координат судна XYZ, начало которой находится в центре величины судна, ось Y направлена вдоль продольной горизонтальной оси судна, ось Z – вертикально вниз, а ось X дополняет систему до правой тройки. Положение судна $P_c = [X_c, Y_c, 0]$ в каждый момент времени определяется в системе $X_0Y_0Z_0$ до начала миссии по динамической модели, а во время миссии – путем пересчёта географических координат с глобальной навигационной системы в метры относительно начальной точки. Положение АНПА $P_a = [X_a, Y_a, Z_a]$ определяется согласно заданной для него траектории движения в системе координат $X_0Y_0Z_0$ и уточняется по данным, получаемым от ГАСНС УКБ.

2. Целевая функция оптимизационной задачи

При расчете программных сигналов управления важно учитывать параметры качества гидроакустической связи. Для его оценки целесообразно использовать ОСШ, которое описывается следующим выражением [10, 11]:

$$SNR = SL - TL - NL + DI, \qquad (1)$$

где SL – уровень источника; TL – потери при передаче по акустической линии связи; NL – уровень мощности шума в приемном узле; DI – показатель направленности передающей антенны.

Как следует из выражения (1), улучшение качества связи возможно за счёт минимизации TL и NL. Однако при движении судна эти параметры изменяются динамически: TL растёт с увеличением расстояния, NL зависит от скорости судна, ветра, волн и транспортной активности.

Для расчета потерь при распространении акустических сигналов в морской воде необходимо учесть затухание. Выражение потерь на распространение звука с учетом поглощения [10]:

$$TL = 20\lg d + \alpha(f)d,$$

где d – расстояние между приемником и передатчиком; $\alpha(f)$ – коэффициент поглощения.

Для учета влияния шумовой обстановки на функционирование гидроакустической системы требуется определить уровни помех от основных их источников. Самыми значимыми здесь выступают две разновидности: шумы, порождаемые ходом судна NL_s, и помехи, вызванные гидрометеорологическими условиями NL_m. Гидродинамические шумы возникают из-за обтекания корпуса судна потоком воды и работы гребных винтов. В большинстве случаев для приближённой оценки величины шумовой помехи от движущегося судна используют эмпирическую формулу, которая является аппроксимацией серии опытных данных и приведена в работе [11]:

$$NL_s = 30\lg(v) + 9\lg(w) - 20\lg(f) + 23.46,$$

где v – скорость судна, уз; w – водоизмещение судна, т; f – частота работы гидроакустического прибора, кГц.

В основном значение шумовой помехи NL_m зависит от состояния моря и скорости ветра. Количественную оценку шумовой помехи моря можно также получить, используя эмпирическую формулу акустического давления, приведенную в пособии [12]:

$$NL_m = 65.1 + 30\lg(v_w) - 50.4\lg(f),$$

где v_w – скорость ветра м/с.

В результате общую величину шумовой помехи можно представить суммой рассмотренных помех:

$$NL = 10\lg(10^{\frac{NL_s}{10}} + 10^{\frac{NL_w}{10}}).$$

В результате итоговая формула ОСШ (1) с учетом шумов от судна и помех от моря будет выглядеть следующим образом:

$$SNR(v,d) = 10\lg\left(\frac{I_t}{0.67\cdot 10^{-18}}\right) - 20\lg d - \alpha(f)d -$$
$$-10\lg(10^{\frac{NL_s(v)}{10}} + 10^{\frac{NL_w}{10}}) + DI,$$

где $I_t = \dfrac{P_t}{2\pi mz}$, P_t – мощность передачи, Вт.

Исходя из этого целевую функцию J можно представить как сумму значений $SNR(v_i, d_i)$ на протяжении всей миссии, где d_i – расстояние между судном и АНПА на i-м шаге; v_i – скорость судна. Но так как траектория АНПА на протяжении всей миссии может корректироваться в реальном времени, то целесообразно и достаточно рассчитывать программные сигналы управления на горизонте предсказания N для каждого шага расчета t_i:

$$J(u_i) = \sum_{j=i}^{i+N} SNR(v_j, d_j), \qquad (2)$$

где $u_i = \begin{bmatrix} v_j & \psi_j \\ v_{j+1} & \psi_{j+1} \\ \dots & \dots \\ v_{j+N} & \psi_{j+N} \end{bmatrix}^T \in R^{2\times N}$ – вектор управляющих воздействий на горизонте предсказания N.

3. Формирование программных сигналов управления

На основе полученной целевой функции (2) формируется задача оптимизации, которая на каждом шаге расчета заключается в поиске такой последовательности программных сигналов управления u_i на горизонте прогнозирования N, при которой суммарное ОСШ достигает максимума:

$$\max_u J(u) = \sum_{j=1}^{i+N} SNR(v_j, d_j).$$

Вводятся ограничения на управление $u_{\min} \le u \le u_{\max}$ и ограничение на зону связи $c(u) \le 0$. Начальное приближение u_0 для решения оптимизационной задачи задаётся как последовательность из N одинаковых пар (v_0, ψ_0), где v_0 и ψ_0 – текущие скорость и курс судна. На каждом внутреннем шаге итерационного процесса оптимизации выполняется квадратичная аппроксимация целевой функции вокруг текущего приближения u_i^k [13]:

$$J(u_i^k + p) \approx J(u_i^k) + \nabla J(u_i^k)^T p + \frac{1}{2} p^T H_k p,$$

где $\nabla J(u_i^k)$ – градиент J для u_i^k, H_k – гессиан, $p = u_i - u_i^k$, k – номер итерации поиска решений оптимизационной задачи.

Для прогнозирования положения судна на горизонте N используется динамическая модель, учитывающая инерционность судна при отработке программных сигналов скорости и курса. Предполагается, что в реальной системе управления судном присутствует подчинённый контур автоматического управления или судоводитель, который обеспечивает отработку заданных значений v_i и ψ_i.

Математическая модель динамики судна может быть представлена системой уравнений, в которой продольное движение и поперечное смещение описываются отдельными гидродинамическими соотношениями, а движение по курсу – уравнением рыскания, описанному в модели Номото [14, 15]:

$$\begin{cases} (M+\lambda_{11})\dfrac{dv_x}{dt} + (M+\lambda_{22})v_y\omega = -R_x - P_{px} + P_e - A_x, \\ (M+\lambda_{22})\dfrac{dv_y}{dt} + (M+\lambda_{11})v_x\omega = -R_y - P_{py} - A_y, \\ T\dfrac{dr}{dt} + r = K\delta, \end{cases}$$

где M – масса судна; λ_{11} – присоединенная масса при движении по оси X; λ_{22} – присоединенная масса при движении по оси Y; v_x – проекция скорости судна на ось X; v_y – проекция скорости судна на ось Y; ω – угловая скорость судна; R_x – продольная гидродинамическая сила на корпусе; R_y – поперечная гидродинамическая сила на корпусе; P_e – полезная сила упора гребного винта; P_{px} – продольная сила давления воды на руль; P_{py} – поперечная сила руля; A_x – продольная аэродинамическая сила; A_y – по-

перечная аэродинамическая сила; T, K – постоянная времени и коэффициент передачи соответственно; δ – угол поворота пера руля (в градусах).

На следующем этапе, исходя из заданной целевой функции, установленных ограничений и начальных условий, а также с учётом принятой модели поведения объекта решается задача максимизации функционала $J(u)$. При этом нелинейные ограничения линеаризуются, и на текущей итерации исходная задача сводится к задаче квадратичного программирования:

$$\min_d(-\nabla J^T p - \frac{1}{2} p^T Hp),$$

при линейных ограничениях $\nabla c^T p + c(u_i^k) \le 0$.

Для её решения используются стандартные алгоритмы внутренней точки, реализованные в пакете Optimization Toolbox среды Matlab [16].

В результате для каждого шага t_i формируется матрица программных сигналов на весь горизонт предсказания $u_i^k = \begin{bmatrix} v_1 & \psi_1 \\ v_2 & \psi_2 \\ \dots & \dots \\ v_N & \psi_N \end{bmatrix} \in R^{N\times 2}$. Все переменные, число которых составляет $2N$, рассматриваются как единое пространство поиска.

После нахождения оптимальной последовательности u_i^k в качестве реального программного сигнала управления применяется только первый элемент: $v_{cur} = v_1^*, \psi_{cur} = \psi_1^*$. После отработки этого сигнала положение судна $P_c = [X_c, Y_c, 0]$ обновляется на основе динамической модели или данных системы GPS при ее наличии, после чего происходит переход к следующему шагу t_{k+1}. Горизонт прогнозирования сдвигается вперёд, в оптимизатор поступают обновлённые данные, и вычисление новой оптимальной последовательности повторяется для следующего горизонта.

4. Численное моделирование работы метода

Для оценки эффективности функционирования разработанного метода было проведено сравнительное моделирование трёх подходов: разработанный метод, движение судна за АНПА с использованием ПИД–регулятора, движение судна по центру галсов.

Моделирование выполнялось в среде Matlab для траектории АНПА, представляющей собой последовательные галсы в прямоугольной области. Задача нелинейной оптимизации решалась с использованием пакета Optimization Toolbox [16] в среде Matlab. Учитывались физические модели потерь сигнала *TL*, уровня шума *NL*, *SL* принимался равным 80 дБ, на основе которых рассчитывалось ОСШ в реальном времени.

Для модели динамики судна были использованы параметры [17], приведенные в табл. 1:

Таблица 1. Параметры динамической модели судна

Параметр	*M*,кг	λ_{11},кг	λ_{22},кг	*T*, с	*K*, 1/с
Значения	1300	40	600	1.645	0.29

Параметры R_x, R_y, A_x, A_y рассчитывались на основе классической формулы скоростного напора, где для каждой силы подставляются соответствующие плотность среды, безразмерный коэффициент (гидро- или аэродинамический), характерная площадь и скорость набегающего потока [18].

Для каждого режима управления анализировались траектория судна, расстояние до АНПА и изменение ОСШ. Результаты визуализированы в виде карт траекторий (рис. 3). На этом рисунке: синяя пун-

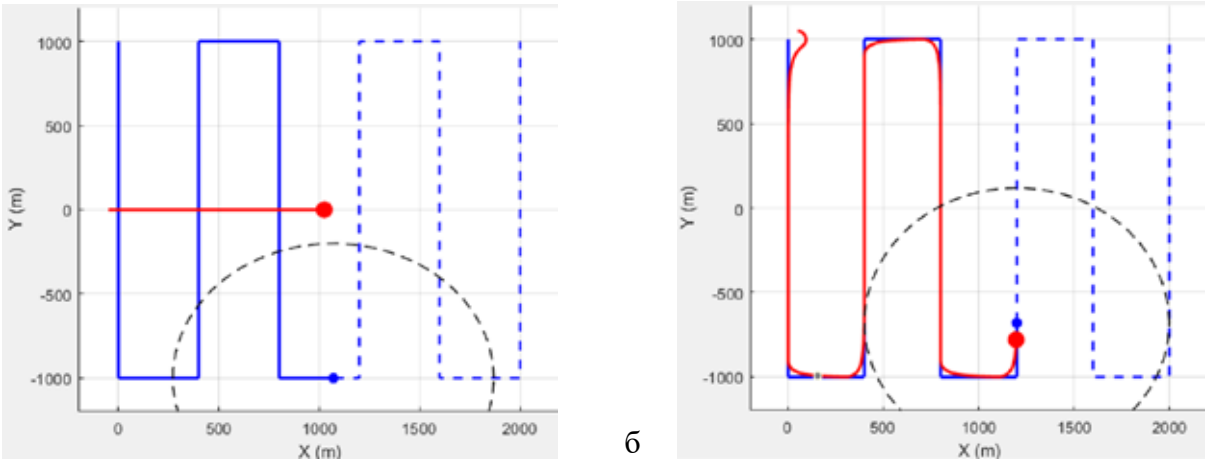


Рис. 3. Траектория судна при движении за АНПА: а – по центру галсов; б – за АНПА с использованием ПИД-регулятора

ктирная линия – заданная траектория АНПА; синяя сплошная линия – пройденная траектория АНПА; синий кружок – АНПА; красная линия – пройденная траектория судна; красный кружок – судно; черная пунктирная линия – примерная зона действия гидроакустической связи.

На рис. 3, *а* показаны результаты использования подхода, при котором судно сопровождения перемещается строго по оси *X* вслед за АНПА. Такой подход изначально предполагает, что АНПА будет удаляться от судна при движении аппарата по оси *Y*. Как следствие, расстояние между судном и АНПА достигает максимальных значений на поворотных участках галсов, что приводит к резкому росту *TL* при передаче. В отличие от этого, применение ПИД-регулятора (рис. 3, *б*) поддерживает минимальное расстояние между АНПА и судном. Однако из-за инерционности судна его реакция на изменение направления движения аппарата происходит с запаздыванием, кроме того, оно постоянно находится в движении.

Результаты численного моделирования разработанного метода формирования программных сигналов представлены на рис. 4. В ходе моделирования судно сопровождения отрабатывало рассчитанные сигналы управления, формируемые методом с учётом прогноза движения АНПА и ограничений ГАСНС УКБ. В результате судно двигалось по оптимальной траектории, имеющей максимальный показатель ОСШ, при этом заблаговременно реагировало на изменения направления движения АНПА. На некоторых участках траектории судно опережало АНПА (поворотные точки галсов), что позволяло ему часть времени находиться в дрейфе.

На представленном графике (рис. 5) приведены временные зависимости ОСШ для трёх подходов. По оси абсцисс отложено время миссии (от 0 до 14 000 с), по оси ординат – текущее значение ОСШ в диапазоне от 0 до 25 дБ. Разработанный метод обеспечивает наиболее стабильный уровень сигнала, который на протяжении почти всего времени равен 15–20 дБ с редкими кратковременными снижениями, не приводящими к потере связи. Движение за АНПА показывает заметно худшие результаты, а именно среднее ОСШ составляет около 10–12 дБ, при этом наблюдаются периодические провалы ниже 5 дБ, особенно в моменты резких манёвров АНПА, что связано с запаздыванием реакции и повышенным уровнем собственных шумов судна. Самая низкая эффективность при движении судна по центру галсов. На протяжении большей части движения АНПА ОСШ опускается практически до нуля, что соответствует потере связи с АНПА. Таким образом, сравнительный анализ результатов (табл. 2) демонстрирует, что разработанный метод обеспечивает не только более высокое среднее ОСШ, но позволяет повысить среднее ОСШ на 47%.

Таблица 2. Сравнение результатов моделирования движения судна сопровождения

Метод	Средний ОСШ, дБ	Минимальный ОСШ, дБ	Время потери связи, с
Разработанный метод	9.9	6.4	0
ПИД-регулятор	6.7	3.8	0
Движение по центру галсов	5.6	0	2000

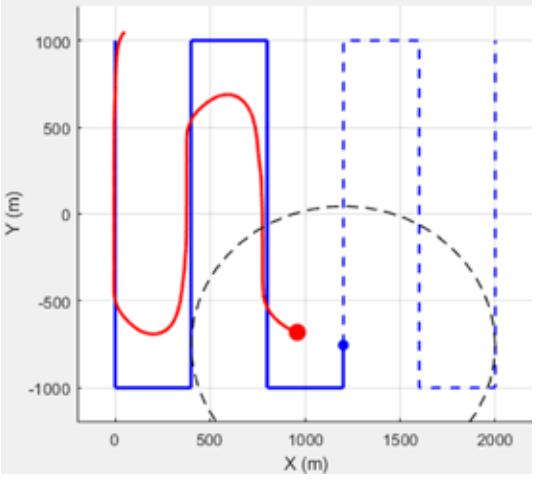


Рис. 4. Траектория судна при использовании разработанного метода

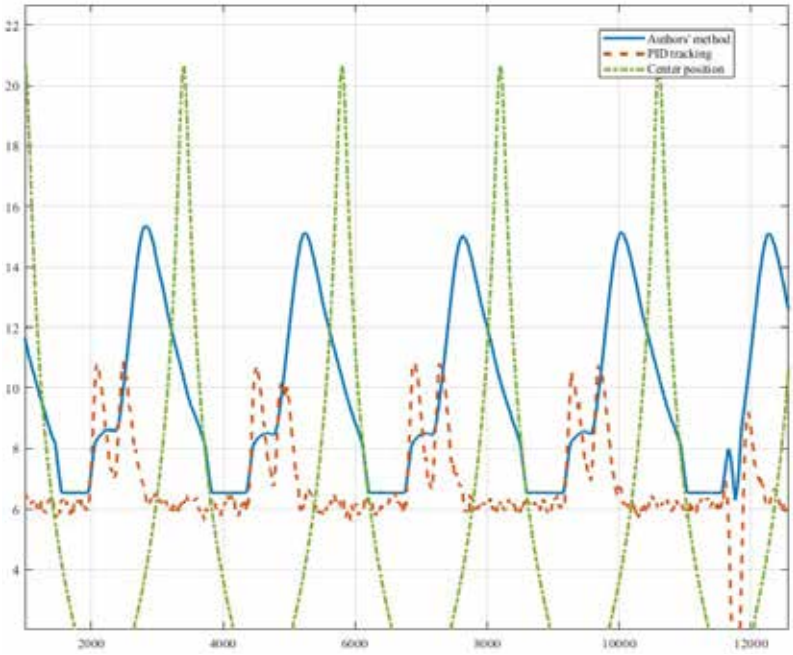


Рис. 5. Временные зависимости ОСШ

Результаты проведенного моделирования позволяют сделать вывод, что разработанный метод обеспечивает наиболее высокий средний и минимальный ОСШ, а также поддерживает устойчивую связь на всех участках траектории движения АНПА, включая сложные манёвры. Использование ПИД–регулятора не способно обеспечить сопоставимое качество, а движение по центру галсов является наиболее простым, но может приводить к полной потере связи с АНПА. Важно отметить, что в предложенном методе для прогнозирования положения судна используется динамическая модель, позволяющая формировать сигналы, учитывая инерционность судна, но повышающая сложность вычислений. В случаях, когда бортовые вычислительные ресурсы ограничены или используется БЭК малого водоизмещения, допустимо применение кинематической модели, поскольку шаг дискретизации управления существенно превышает длительность переходных процессов при маневре.

Заключение

В работе предложен и реализован метод формирования программных сигналов управления для системы позиционирования судна при работе с АНПА. Показано, что учёт ОСШ для определения оптимальной скорости и курса движения судна при работе с АНПА позволяет существенно повысить качество связи по сравнению с известными подходами. Также стоит отметить, что данный метод может быть без особых изменений адаптирован для расчета иных программных сигналов управления, например, положения судна, тяги и угла поворота руля. В дальнейшем планируется экспериментальная проверка в реальных экспедиционных работах или на основе данных с уже проведенных экспедиций, а также модификация метода для работы с группой АНПА.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонд № 23-71-10038-П, https://rscf.ru/project/23-71-10038-П/

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов В.Е. Пропускная способность гидроакустического канала связи // Russian Technological Journal. 2023. Т. 11, № 1. С. 31–40.
2. Evologics 4265 USBL Underwater Positioning System. URL: https://www.irov.it/en/products/acoustic-modems-and-usbl-underwater-positioning-systems/evologics-acoustic-modems-and-usbl-underwater-positioning-systems/evologics-4265-usbl-underwater-positiong-system/ (дата обращения: 01.06.2026).
3. Бабаев Р.А., Боровик А.И., Ваулин Ю.В., Елисеенко Г.Д., Михайлов Д.Н., Найденко Н.А. Применение АНПА ММТ-3500 для научных исследований в Атлантическом секторе Антарктики // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3. С. 41.
4. Боровик А.И., Рыбакова Е.И., Галкин С.В., Михайлов Д.Н., Коноплин А.Ю. Опыт использования автономного необитаемого подводного аппарата «ММТ-3000» для исследований бентосных сообществ Антарктики // Океанология. 2022. Т. 62. № 5. С. 1–14.
5. Chyba M., Cazzaro D., Invernizzi L., Andonian M. Trajectory Design for Autonomous Underwater Vehicles for Basin Exploration // 9th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. 2010. P. 139–151.
6. Jalving B., Gade K., Hagen O.K., Vestgard K. A toolbox of aiding techniques for the HUGIN AUV integrated inertial navigation system // Oceans 2003. San Diego, CA, USA, 2003. Vol. 2. P. 1146–1153.
7. Pascoal A. et al. Robotic ocean vehicles for marine science applications: the European ASIMOV project // OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Providence, RI, USA, 2000. Vol. 1. P. 409–415.
8. Rawlings J.B., Mayne D.Q., Diehl M. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. 2nd ed. Madison, WI, USA : Nob Hill Publishing, 2017.
9. Grüne L., Pannek J. Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms. 2nd ed. London, UK : Springer, 2017.
10. Brekhovskikh L.M., Lysanov Y.P. Fundamentals of ocean acoustics. New York, NY : Springer, 2003.
11. Urick R.J. Principles of Underwater Sound. 3rd ed. New York, NY : McGraw Hill, 1983.
12. Евтютов А.П., Колесников А.Е. Справочник по гидроакустике. Л. : Судостроение, 1982. 344 с.
13. Murty K.G., Yu F.T. Linear complementarity, linear and nonlinear programming. Berlin : Heldermann, 1988.
14. Васильев А.В. Управляемость судов. Л. : Судостроение, 1989. 328 с.
15. Nomoto K., Taguchi T., Honda K., Hirano S. On the steering qualities of ship // Journal of Zosen Kiokai. 1956. Vol. 1956. No. 99. P. 75–82.
16. MATLAB Optimization Toolbox™ User's Guide. URL: https://www.mathworks.com/help/optim/ (дата обращения: 01.06.2026).
17. Дыда А.А., Пляшешник К.Н., Пушкарев И.И. Построение модели динамики безэкипажного судна по курсу на основе экспериментальных данных // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала СО Макарова. 2020. Т. 12. №. 4. С. 716–725.
18. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля. Л. : Судостроение, 1973. 512 с.

Сведения об авторах

КОНОПЛИН Александр Юрьевич, д.т.н., ведущий научный сотрудник
Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН;
Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Тел. (раб.): +7(423)2432416
E-mail: konoplin@marine.febras.ru
ORCID: 0000-0001-7554-1002

ЮРМАНОВ Александр Павлович, научный сотрудник
Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН;
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Научные интересы: автоматическое управление подводными манипуляторами, информационно-управляющие системы, супервизорное управление, интеллектуальные системы
Тел. (раб.): 89146786060
E-mail: yurmanov_a@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6849-3700

КОПЫЛОВ Денис Владимирович, научный сотрудник
Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН;
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, математические модели динамических систем
Тел. (раб.): 89996147161
E-mail: kopylov.dvl@yandex.ru
ORCID: 0009-0008-5725-8260

DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_07

METHOD FOR GENERATING PROGRAM CONTROL SIGNALS FOR THE POSITIONING OF A VESSEL SUPPORTING AUV OPERATIONS

A.Yu. Konoplin, A.P. Yurmanov, D.V. Kopylov

This paper addresses the problem of ensuring stable hydroacoustic communication between an autonomous underwater vehicle (AUV) and support vessel or unmanned surface vessel (USV) supporting its operation during the AUV's underwater missions in open sea conditions using an ultra-short baseline hydroacoustic communication and navigation system. Existing approaches to positioning the vessel relative to an AUV moving along an arbitrary route often lead to degradation or loss of communication due to increasing distance to the vehicle and growing vessel self-noise. To solve this problem, a method for generating program control signals for vessel positioning based on model predictive control is proposed. This method computes the vessel's speed and yaw into account the actual and predicted AUV trajectories, the vessel's dynamic characteristics, and the physical parameters of the hydroacoustic communication channel. In order to maximize the signal-to-noise ratio (SNR), which accounts for signal propagation loss, vessel self-noise level, and sea ambient noise, an optimization objective function is formulated. The vessel's state vector is predicted using its dynamic model incorporating the Nomoto yaw equation. The optimization problem is solved at each computation step by means of quadratic programming in the MATLAB environment. Numerical simulations were performed for an AUV trajectory consisting of successive tacks. Comparison with two alternative approaches demonstrated that the developed method ensures a consistently high SNR level, absence of communication loss, and minimal necessary vessel movements. The research findings confirmed the effectiveness of the proposed method for maintaining a reliable hydroacoustic communication channel with an AUV operating over extended sea areas.

Keywords: hydroacoustic communication channel, signal-to-noise ratio, predictive control modeling, carrier vessel, autonomous underwater vehicle, trajectory optimization, ultra-short baseline hydroacoustic communication and navigation system.

References

1. Denisov V.E. Propusknaya sposobnost′ gidroakusticheskogo kanala svyazi // Russian Technological Journal. 2023. Vol. 11. № 1. P. 31–40.

2. Evologics 4265 USBL Underwater Positioning System. URL: https://www.irov.it/en/products/acoustic-modems-and-usbl-underwater-positioning-systems/evologics-acoustic-modems-and-usbl-underwater-positioning-systems/evologics-4265-usbl-underwater-positiong-system/ (date of access: 01.06.2026).

3. Babaev R.A., Borovik A.I., Vaulin Yu.V., Eliseenko G.D., Mikhajlov D.N., Najdenko N.A. Primenenie ANPA MMT-3500 dlya nauchnykh issledovanij v Atlanticheskom sektore Antarktiki // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2022. № 3. P. 41.

4. Borovik A.I., Rybakova E.I., Galkin S.V., Mikhajlov D.N., Konoplin A.Yu. Opyt ispol′zovaniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata «MMT-3000» dlya issledovanij bentosnykh soobshchestv Antarktiki // Okeanologiya. 2022. Vol. 62. № 5. P. 1–14.

5. Chyba M., Cazzaro D., Invernizzi L., Andonian M. Trajectory Design for Autonomous Underwater Vehicles for Basin Exploration // 9th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. 2010. P. 139–151.

6. Jalving B., Gade K., Hagen O.K., Vestgard K. A toolbox of aiding techniques for the HUGIN AUV integrated inertial navigation system // Oceans 2003. San Diego, CA, USA, 2003. Vol. 2. P. 1146–1153.

7. Pascoal A. et al. Robotic ocean vehicles for marine science applications: the European ASIMOV project // OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Providence, RI, USA, 2000. Vol. 1. P. 409–415.

8. Rawlings J.B., Mayne D.Q., Diehl M. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. 2nd ed. Madison, WI, USA : Nob Hill Publishing, 2017.

9. Grüne L., Pannek J. Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms. 2nd ed. London, UK : Springer, 2017.

10. Brekhovskikh L.M., Lysanov Y.P. Fundamentals of ocean acoustics. New York, NY : Springer, 2003.

11. Urick R.J. Principles of Underwater Sound. 3rd ed. New York, NY : McGraw Hill, 1983.

12. Evtyutov A.P., Kolesnikov A.E. Spravochnik po gidroakustike. L. : Sudostroenie, 1982. 344 c.

13. Murty K.G., Yu F.T. Linear complementarity, linear and nonlinear programming. Berlin : Heldermann, 1988.

14. Vasil′ev A.V. Upravlyaemost′ sudov. L. : Sudostroenie, 1989. 328 p.

15. Nomoto K., Taguchi T., Honda K., Hirano S. On the steering qualities of ship // Journal of Zosen Kiokai. 1956. Vol. 1956. No. 99. P. 75–82.

16. MATLAB Optimization Toolbox™ User's Guide. URL: https://www.mathworks.com/help/optim/ (date of access: 01.06.2026).

17. Dyda A.A., Plyasheshnik K.N., Pushkarev I.I. Postroenie modeli dinamiki bezekipazhnogo sudna po kursu na osnove eksperimental'nyh dannyh // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala SO Makarova. 2020. Vol. 12. No. 4. P. 716-725.

18. Vojtkunskij Ya.I. Spravochnik po teorii korablya. L. : Sudostroenie, 1973. 512 p.

Information about the authors

KONOPLIN Aleksandr Yurievich, Doctor of Technical Sciences, leading researcher
Job: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;
Research interests: automatic control of underwater robots and manipulators, adaptive control, information and control systems
Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a
Phone: +7(423)2432416
E-mail: konoplin@marine.febras.ru
ORCID: 0000-0001-7554-1002

YURMANOV Aleksandr Pavlovich, researcher
Job: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;
Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a
Research interests: automatic control of underwater manipulators, information and control systems, supervisory control, intelligent systems
Phone: 89146786060
E-mail: yurmanov_a@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6849-3700

KOPYLOV Denis Vladimirovich, researcher
Job: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;
Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a
Research interests: automatic control of underwater robots and manipulators, mathematical models of dynamic systems
Phone: 89996147161
E-mail: kopylov.dvl@yandex.ru
ORCID: 0009-0008-5725-8260

Recommended citation:

Konoplin A.Yu., Yurmanov A.P., Kopylov D.V. METHOD FOR GENERATING PROGRAM CONTROL SIGNALS FOR THE POSITIONING OF A VESSEL SUPPORTING AUV OPERATIONS. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2026. No. 3 (57). C. 59–67. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_07. EDN: IPFLVU.

УДК 551.465:550.347
EDN: JKQLWT
DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_08

УТОЧНЕНИЕ ПОКАЗАНИЙ ЭХОЛОТА ПО ДАННЫМ ТЕРМОМЕТРИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГЛУБИНЫ МОРЯ

А.Н. Самченко, А.В. Кошелева, А.А. Пивоваров, И.О. Ярощук

В работе показано влияние гидрологических процессов на результаты батиметрических измерений, выполненных с помощью стандартных эхолотов. Предлагается проводить корректировку полученных глубин с помощью измерений температуры моря. Известно, что температура оказывает большое влияние на скорость звука в воде. В некоторых эхолотах заложена возможность устанавливать среднюю температуру воды либо они могут быть оснащены датчиками температуры. Однако температура на поверхности моря может сильно отличаться от средней температуры водного слоя. На протяжении многих лет авторы проводят гидрологические и акустические исследования в шельфовой зоне юго-западной части залива Петра Великого Японского моря. Гидрология в заливе характеризуется высокой изменчивостью в летний и осенний сезон, на фоне низкочастотных колебаний наблюдаются высокочастотные интенсивные внутренние волны. Профиль температуры в заливе на глубинах моря более 40 м имеет обычно один ярко выраженный термоклин у поверхности, формирующийся в весенний период при нагревании верхнего слоя, а в конце лета можно наблюдать до трех выраженных термоклинов. В октябре наблюдается высокоградиентный термоклин, в котором за 10 м глубины температура может меняться до 18 °С. Таким образом, ошибка определения глубины может достигать 3,5% или 2,5 м для глубины моря 70 м.

Ключевые слова: эхолот, акустические сигналы, батиметрия, термометрия, внутренние волны, термоклин, залив Петра Великого, Японское море.

Введение

В последнее время широко используются и развиваются акустические методы дистанционного изучения дна океана, биологического разнообразия и в гидрологических исследованиях [1–3]. Разрабатываются новые технические решения в области акустических исследований, например многолучевые гидролокационные системы [4]. Появляются новые решения в обработке сигналов [5, 6]. В исследованиях применяются различные виды эхолотов, которые имеют различные частотные настройки, позволяющие на высоких частотах увеличивать детализацию, а на низких частотах увеличивать глубину и помехоустойчивость. В каждом приборе заложена возможность менять частотные характеристики оператором в зависимости от поставленных задач. Также важным фактором является размер и геометрия датчика сонара, который позволяет контролировать угол излучения акустического сигнала, что влияет на точность полученных данных. Излучаемый сигнал имеет форму конуса, направленного от сонара, где характерная ширина конуса для частоты 50 кГц составляет примерно 60°, а для частоты 200 кГц около 15°. Однако за счет изменения датчика сонара на некоторых эхолотах для частоты 200 кГц ширина конуса может составлять не более 5°, что позволяет увеличивать точность измерений. На некоторых эхолотах есть возможность использовать сразу несколько режимов одновременно, когда имеется два и более сонара.

В эхолотировании используются частотно-модулированные сигналы CHIRP в широкой полосе частот от низких (50–80 кГц) до высокочастотных (более 400 кГц). За счет использования мультичастотного сигнала получают более точные данные глубин и увеличивается качество отображения формы подводных структур, улучшается детализация измерений. Технология CHIRP-сигналов применяется как в случае с однолучевым излучением, так и в многолучевом формате нижнего и бокового сканирования. Нижнее сканирование представляет собой исследование узкой полосы под килем судна узким лучом в направлении

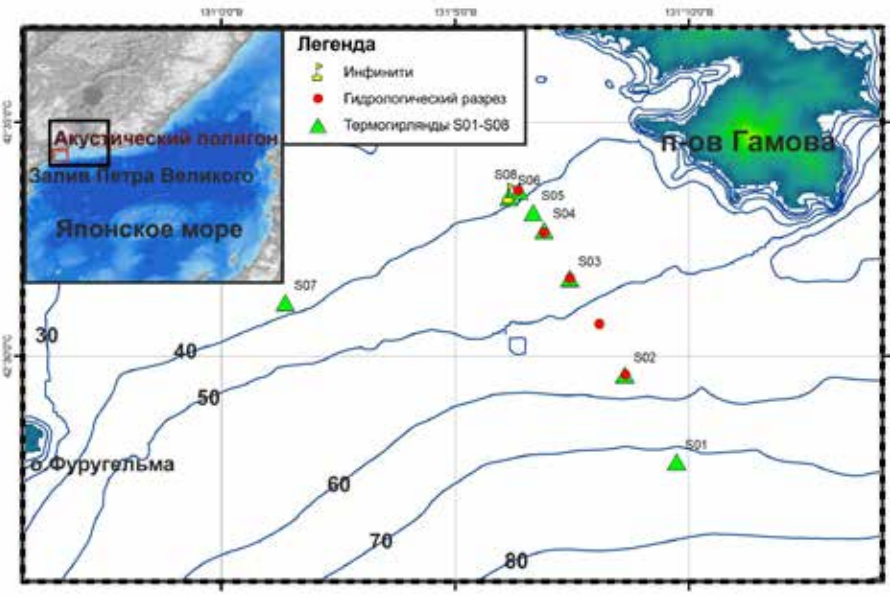


Рис. 1. Карта гидрологических работ в заливе Петра Великого

судна, порядка 1°, но широким углом в поперечном направлении (примерно 50°). Используются обычно высокочастотные сигналы (более 400 кГц), что позволяет получать высокую детализацию, но работает только на небольших глубинах. В боковом сканировании используется два луча, направленных в стороны от направления судна, которые прорисовывают поверхность полосы дна шириной до 200 м.

Помимо инструментальных погрешностей определения глубины моря эхолотами, таких как погрешность на ширину конуса на используемый частотный диапазон, также необходимо учитывать динамические погрешности из-за волнения моря и движения судна. В современных эхолотах заложены механизмы и алгоритмы снижения инструментальных погрешностей, а динамические погрешности можно уменьшить за счет подобранного времени измерения (погодных условий) и скорости движения судна. Кроме того, остаются природные факторы, влияющие на распространение акустического сигнала и искажающие результаты акустического мониторинга, такие как наличие в толще воды интенсивного термоклина [7, 8].

Температура в эхолотах обычно вводится вручную либо используются данные, принимаемые с датчика температуры, установленного в корпусе сонара. Есть вариант, когда температура воды за бортом устанавливается в ручном режиме, но при изменении ее на более чем 1,1°С по отношению к полученному от датчика температуры; система эхолота сигнализирует об этом. Данные о температуре важны, поскольку основными характеристиками, влияющими на распространение звука в морской воде, являются температура и соленость, в меньшей степени давление. Необходимо иметь в виду, что при изменении на 1°С скорость звука меняется примерно на 4 м/с.

Цель работы заключается в том, чтобы получить точные данные по глубине места с помощью эхолотов в реальном времени для точной постановки гидрологического и гидроакустического оборудования на полигоне. В заливе Петра Великого расположен гидроакустический полигон ТОИ ДВО РАН на п-ове Гамова МЭС «Мыс Шульца» [9], где проводятся гидроакустические и сопутствующие гидрологические и геолого-геофизические исследования на шельфе моря. В заливе на дно устанавливается пространственно-распределенный измерительный комплекс с необходимой точностью постановки по глубине не более 0,5 м [10]. Заявленной точности эхолота по глубине в весенний период достаточно, однако в осенне-летний период, за счет ярко выраженного термоклина или нескольких термоклинов в толще воды, наблюдаются погрешности в определении глубины места, которые необходимо учитывать.

Гидрологический режим в заливе

На протяжении 19 лет на гидроакустическом полигоне проводятся гидрологические исследования в заливе Петра Великого [11]. Ежегодно используется распределенный гидрологический комплекс в изучении гидрологического режима, показанный на рис. 1. Работы проводятся в весеннее-летний и осенний период. В комплекс входят заякоренные термогирлянды, датчики давления и измерители течений, также проводятся гидрологические разрезы с помощью СТД-зондов, измерение температуры, давления и солености по глубине. В первые годы использовались различные варианты установки гидрологических приборов, когда за счет расстановки были определены основные направления и масштабы возмущений. За последние 15 лет постановки гидрологического оборудования велись примерно по одной схеме, где расставляются до 9 термогирлянд на глубинах от 40 м до 74 м, до 20 дней три раза за год – весной, летом и осенью. Вблизи заякоренных термогирлянд несколько раз за постановку проводится промеры СТД-зондом от поверхности до дна. В точке с глубиной 40 м проводятся измерения

течений на трех горизонтах с помощью трех электромагнитных логгеров 2-D INFINITY-EM измерителей течения.

В гидроакустический полигон входит залив Посьета и часть центральной зоны залива Петра Великого до глубин примерно в 100 м. Полигон находится на стыке двух крупных региональных течений – теплого течения северной ветки Цусимского (Восточно-Корейское течение) и холодного течения Южно-Приморского. В рельефе участок представляет собой пологий склон, заканчивающийся свалом глубин, где за расстояние в 1–2 км глубина меняется от 300 м до 2500 м. От мыса Гамова до о-ва Фуругельма протягивается подводный вал и на северо-востоке участка в рельефе выделяются осадочные волны, которые, возможно, сформированы под воздействием интенсивных внутренних волн (ВВ) [12]. Свал глубин, в свою очередь, генерирует на приливно-отливных движениях сами интенсивные ВВ [10, 13], за счет чего на полигоне в весеннее-летний и осенний сезоны наблюдается интенсивная гидрологическая картина по всей глубине измерений (рис. 2).

При прогреве воды на поверхности моря в весенний период происходит появление слабого градиентного слоя. На глубине 5–10 м температура воды меняется на 10–15 °С. Летом градиентный слой усиливается и опускается на большую глубину, до 10–15 м и более. Мощность градиентного слоя варьируется и может составлять от 5 до 15 м. В конце лета, когда температура воды достигает максимальных значений, в последнее время (с 2022 г.) наблюдаются крайне высокие показатели температуры воды – до 28 °С на поверхности моря, по всей толще может наблюдаться до трех градиентных слоев, которые во время прохождения экстремальных метеорологических явлений могут объединятся в один мощный термоклин, который «гуляет» по всей толще воды. В это время наблюдаются наиболее активные и мощные ВВ. Со временем, после прохождения экстремальных метеорологических явлений, три градиентных слоя по глубине возвращаются. Ранее, с 2010 г. по 2022 г., в осенний период гидрологическая картина была похожа на летний сезон во время прохождения тайфунов, когда наблюдался один мощный термоклин, обычно расположенный на глубине 10–30 м. Однако в 2022 г. термоклин опустился на глубины ниже 30 м и временами достигал глубины до 50 м. В это время температура воды на глубине 40 м достигала 17–18 °С, что ранее никогда не было зафиксировано. На поверхности воды температура воды достигала 22–23 °С. В последнее время (с 2022 г.) также наблюдается увеличение глубины прогретого слоя воды и более теплого, чем в предыдущие года.

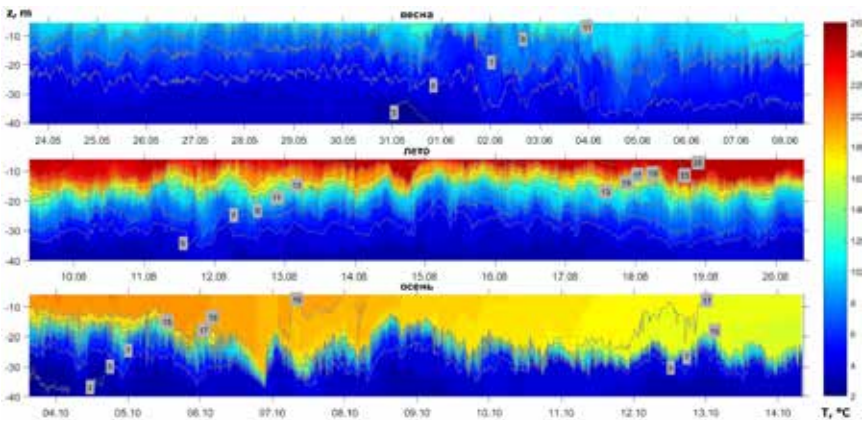


Рис. 2. Профиль температуры за 10 дней измерений в весенний, летний и осенний сезоны в 2026 г. со станции S06 (расположение показ. на рис. 1)

На рис. 3 показаны профили температуры, солености и рассчитанной скорости звука за 3 и 14 октября 2025 г., полученные с помощью СТД-зонда AML-3LGR на точках измерений S02 и S06 (показ. на рис. 1). Скорость звука рассчитывалась по Международному термодинамическому уравнению состояния морской воды TEOS10 (ТУС-10) [14]. Измеренная СТД-зондом соленость прошла динамическую коррекцию, описанную в работе [13]. Точка постановки термогирлянды и измерения СТД-зондом S02 находилась на глубине примерно 55 м, а точка постановки термогирлянды S06 – на глубине около 40 м. В первом случае, когда проводили измерения 3 октября, термоклин располагался на глубинах 15–26 м с перепадом температуры с 20 °С до 3 °С и скорости звука на 60 м/с, с изменением температуры более чем на 1,5 °С или скорости звука почти 5,5 м/с за 1 м глубины. 14 октября верхний прогретый слой увеличился с глубиной таким образом, что термоклин расположился на глубинах 25–40 м с перепадом температур на 14 °С и скорости звука примерно на 50 м/с. Градиент температуры составил менее 1 °С или около 3,5 м/с на 1 м глубины моря. В осенний период в градиентном слое наблюдается изменение скорости звука до 8,5 м/с на 1 м глубины моря. Обращает внимание, что профили рассчитанной скорости звука и температуры имеют максимальную схожесть, что обусловлено большим влиянием температуры на изменение скорости звука в воде и слабым влиянием солености в совокупности с небольшими вариациями солености по глубине, не более 3 psu.

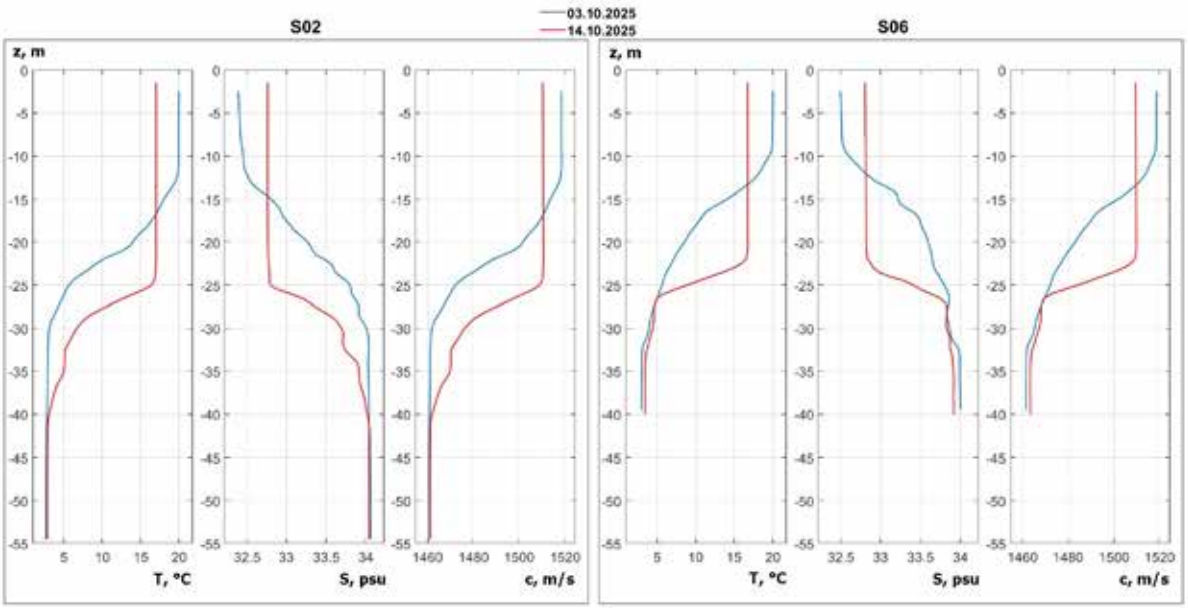


Рис. 3. Профили температуры, солености и скорости звука в точках S02 и S06 измеренные СТД- зондом 3 и 14 октября 2025 г.

На рис. 4 показана динамика изменения профиля температуры с 23 мая по 8 июня, с 9 по 20 августа и с 3 по 14 октября 2025 г. Цветными линиями отображаются профили температуры, полученные при измерении СТД-зондом и серые линии по данным термогирлянды S06. При этом необходимо отметить, что данная динамика в целом характерна для всего периода многолетних наблюдений, с небольшими вариациями. Как уже отмечено, весной происходит плавный прогрев толщи воды с поверхности моря, летом образуется градиентный по температуре слой на глубинах 10–20 м и осенью ярко выраженный термоклин опускается ниже с увеличением мощности верхнего прогретого слоя, одновременно с уменьшением его средней температуры.

Анализ данных и обсуждение

Рассмотрим влияние гидрологической ситуации на разных глубинах и в различные сезоны на определение глубины моря с помощью акустических методов. Примем вариант измерения глубины моря с помощью стандартного эхолота, когда скорость звука рассчитывается на основе датчика температуры, а именно температура воды на глубине осадки судна (не более 0,5 м для катера):

$$H^* = 2t^* c^* , \qquad (1)$$

где H^* – глубина моря на экране стандартного эхолота, t^* – время пробега акустического сигнала от излучателя до дна моря, c^* – скорость волны в воде, рассчитанная для температуры, полученной от датчика температуры эхолота. В расчетах далее использовалась температура воды, измеренная с помощью СТД-зонда на глубине 0,5 м от поверхности моря, при определении параметра c^*.

Погрешность определения глубины от излучателя до дна с учетом измеренных профилей по трем сезонам будет равна:

$$\Delta H_1 = \left| c^* \int_0^H \frac{1}{c_1(z)} dz - H^* \right|,$$

$$\Delta H_2 = \left| c^* \int_0^H \frac{1}{c_2(z)} dz - H^* \right|,$$

$$\Delta H_3 = \left| c^* \int_0^H \frac{1}{c_3(z)} dz - H^* \right|, \qquad (2)$$

где ΔH_1, ΔH_2, ΔH_3 – погрешность расстояния от дна до излучателя в зависимости от сезона, $c_1(z)$ – весенний профиль скорости звука, полученный СТД-зондом 23 мая 2025, $c_2(z)$ – летний профиль скорости звука, измеренный 11 августа 2025, $c_3(z)$ – осенний профиль скорости звука, измеренный 03 октября 2025 (рис. 4). В таблице приведены расчеты возможной погрешности определения глубины места стандартным эхолотом от гидрологической ситуации на глубинах 40 м и 70 м. За сезон погрешность определения глубины места меняется в зависимости от изменения гидрологии и ее можно примерно определить по данным термогирлянд. В таблице также приведена вариация ΔH за время установки термогирлянд по сезонам (σ1 – весна, σ2 – лето, σ3 – осень).

Вычисленные погрешность расстояния от дна до излучателя в зависимости от сезона по данным СТД-зонда и вариация погрешности по данным термогирлянд

	ΔH1, м	ΔH2, м	ΔH3, м	σ1	σ2	σ3
Глубина, 40 м	0,42	1,15	0,95	0,11	0,37	0,54
Глубина, 70 м	0,89	2,38	1,8	0,13	0,4	0,6

Погрешности измерения глубины места стандартным эхолотом под влиянием гидрологической ситуации на шельфе залива в основном превышают необходимые допуски при установке гидрологического оборудования и требуют корректировки.

Далее рассмотрим вклад всех параметров, влияющих на скорость звука в воде, согласно формуле ТУС-10, где в формулу входят температура, соленость и давление воды. При постоянной солености и давлении, на 1 °С изменения температуры скорость звука меняется до 4,4 м/с в воде. Учитывая, что исторически зафиксировано изменение температуры воды на 26 °С по глубине, максимальная разница в скорости звука может составить 114,4 м/с, что может повлечь значительные погрешности в определении глубины места с помощью эхолотирования, что и показывают расчеты, отраженные в таблице. При изменении солености воды на 1 psu скорость звука изменится на 1,3 м/с. Если учитывать, что за весь период наблюдений зафиксировано изменение солености воды не более чем на 4 psu, то разница в скорости звука будет не более 5,2 м/с и максимально будет вносить около 0,3% в погрешность при определении глубины места. Давление влияет на скорость звука менее всего – 0,016 м/с на 1 м глубины. Точные параметры глубины могут быть получены с помощью зондирования СТД-зондом и предлагается использовать упрощенную формулу определения скорости звука в воде, указанную в работе [15].

Заключение

Погрешность измерения глубины в заливе в весенний сезон на 40 м изобате будет не более 0,5 м и до 1 м на 70-метровой изобате. Осенью погрешность увеличивается до 1 м на 40-метровой изобате и до 2 м на 70-метровой изобате. Летом погрешность измерения глубины достигает максимальных значений: до 1,3 м на 40-метровой изобате и 2,5 м на 70-метровой изобате. Однако вариация погрешности определения глубины от весны к осени увеличивается в периоды проведения измерений термогирляндами, что в целом показывает изменчивость и гидрологической ситуации в разные сезоны. Наиболее стабильная гидрологическая обстановка наблюдается весной, а осенью наблюдаются самые значительные изменения.

Таким образом, предлагается провести зондирование СТД-зондом перед установкой гидрологического оборудования или другими ответственными работами, где требуется точное определение глубины места. В случае, когда не требуется высокая точность измерения глубины моря в заливе Петра Великого, предлагается устанавливать вручную на эхолоте средние значения температуры толщи воды в соответствии с сезоном. Весной средняя температура по данным термогирлянд за период наблюдений с 2020 по 2025 г. составила примерно 6 °С на 40-метровой изобате и 5 °С на 70-метровой изобате. Летом средняя температура толщи воды составила 10 °С на 40-метровой изобате и 8 °С на 70-метровой изобате. Осенью средняя температура всей толщи воды примерно 12 °С и 10 °С для глубин 40 и 70 м соответственно.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 124022100074-9 «Изучение природы линейного и нелинейного взаимодействия геосферных полей переходных зон Мирового океана и их последствий».

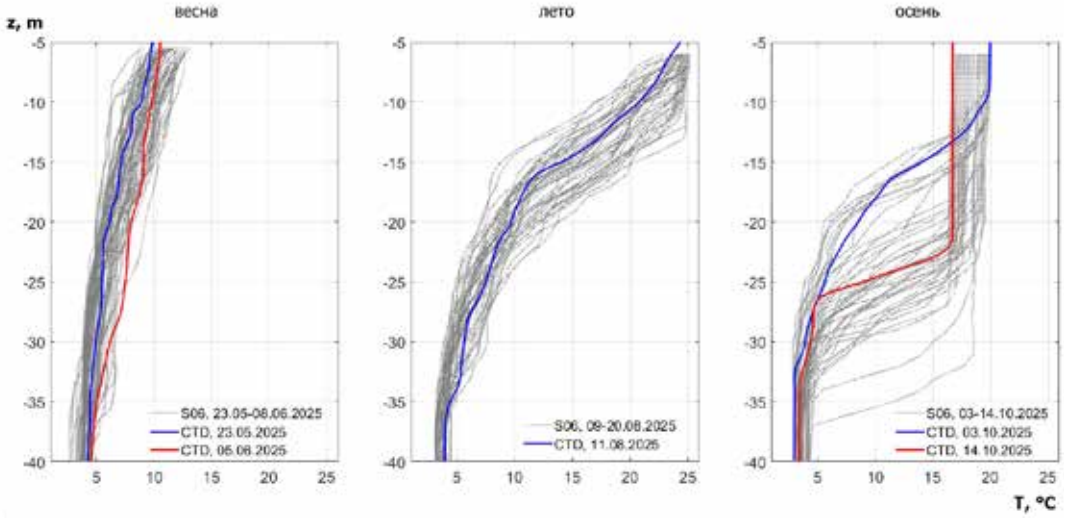


Рис. 4. Профили температуры, измеренные СТД-зондом (синяя и красная линии), и полученные с термогирлянды S06 с периодом 6 часов (серая пунктирная линия). Осень 2025 г.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аббасов И. Б. Современные тенденции мониторинга водной среды прибрежных акваторий // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 1. С. 29–39. DOI: 10.22449/2413-5577-2019-1-29-39
2. Душенин Ю.В., Маркович И.И. Применение многолучевых гидроакустических средств с цифровой пространственно-временной обработкой сигналов для экологического мониторинга водных районов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 12(173). С. 85–98.
3. Brown C.J., Sameoto J.A., Smith S.J. Multiple methods, maps, and management applications: Purpose made seafloor maps in support of ocean management // Journal of Sea Research. 2012. Vol. 72. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.seares.2012.04.009.
4. Uchino K. Advanced Piezoelectric Materials. Part of series: Woodhead Publishing in Materials. Chapter 1. The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective. Woodhead Publishing, 2017. 92 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-102135-4.00001-1.
5. Маркович И.И. Цифровая пространственно-временная обработка сигналов в многолучевом гидролокаторе морского подводного робототехнического комплекса // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1(203). С. 239–248. DOI 10.23683/2311-3103-2019-1-239-248.
6. Маркович И.И., Завтур Е.Е. Алгоритм определения координат целей разностно-дальномерным методом с учетом неточностей установки приемных гидроакустических антенн // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 8(193). С. 162–171. DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-162-171.
7. Gaida T.C., Mohammadloo T.H., Snellen M., Simons, D.G. Mapping the Seabed and Shallow Subsurface with Multi-Frequency Multibeam Echosounders // Remote Sens. 2020. №12. 52. DOI: 10.3390/rs12010052.
8. Hidayat W., Saputra L.R., Hidayat R.R. et al. Comparison of Sound Speed from Measurements and Models in the Waters of Bunaken National Park, North Sulawesi. 19 May 2025: PREPRINT. DOI: 10.21203/rs.3.rs-6653653/v1.
9. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Чебров В.Н., Шевченко Ю.В. Геофизический полигон «мыс Шульца» // Вестник ДВО РАН. 2010. № 5. С. 165–169.
10. Леонтьев А.П., Ярощук И.О., Смирнов С.В., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н. Пространственно-распределенный измерительный комплекс для мониторинга гидрофизических процессов на океаническом шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 128–135. DOI: 10.1134/S0020441216060191
11. Ярощук И.О., Леонтьев А.П., Кошелева А.В., Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Храпченков Ф.Ф., Швырев А.Н., Ярощук Е.И. Экспериментальные исследования внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 1. С. 37–44.
12. Samchenko A., Dolgikh G., Yaroshchuk I., Kosheleva A., Pivovarov A., Novotryasov V. Extreme Hydrometeorological Conditions of Sediment Waves' Formation and Migration in Peter the Great Bay (The Sea of Japan) // Water. 2023. Vol. 15. 393. DOI: 10.3390/w15030393.
13. Yaroshchuk I., Kosheleva A., Lazaryuk A., Dolgikh G., Pivovarov A., Samchenko A., Shvyrev A., Gulin O., Korotchenko R. Estimation of Seawater Hydrophysical Characteristics from Thermistor Strings and CTD Data in the Sea of Japan Shelf Zone // J. Mar. Sci. Eng. 2023. Vol. 11. 1204 p. DOI: 10.3390/jmse11061204.
14. IOC, SCOR and IAPSO The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides. 2010. No. 56. UNESCO (English). P. 171.
15. Kuperman W.A., Lynch J.F. Shallow-water acoustics // Physics Today. 2004. Vol. 10(57). P. 55–61.

Об авторах

САМЧЕНКО Александр Николаевич, к.г.н., старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: геология и геофизика шельфа
Тел.: 8(423) 231-26-17
E-mail: samchenko@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0002-5184-0718

КОШЕЛЕВА Александра Васильевна, научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: океанологические исследования прибрежной зоны
Тел.: 8(423) 231-26-17
E-mail: kosheleva@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0001-6508-6325

ПИВОВАРОВ Александр Анатольевич, научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: акустика океана
Тел.: 8(423) 231-26-17
E-mail: pivovarov@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0003-0037-1568

ЯРОЩУК Игорь Олегович, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: акустика океана
Тел.: 8(423) 231-26-17
E-mail: yaroshchuk@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0002-3212-9752

Для цитирования:

Самченко А.Н., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Ярощук И.О. УТОЧНЕНИЕ ПОКАЗАНИЙ ЭХОЛОТА ПО ДАННЫМ ТЕРМОМЕТРИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГЛУБИНЫ МОРЯ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 68–75. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_08. EDN: JKQLWT.

DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_08

IMPROVING ECHO SOUNDER DEPTH ACCURACY USING THERMOMETRIC DATA

A.N. Samchenko, A.V. Kosheleva, A.A. Pivovarov, I.O. Yaroshchuk

This paper demonstrates the impact of hydrological processes on bathymetric surveys conducted with standard echo sounders. It proposes correcting the obtained depths using sea temperature measurements. Temperature is known to significantly affect the speed of sound in water. Although some echo sounders allow setting an average water temperature or can be equipped with temperature sensors, the sea surface temperature can significantly vary from the average temperature of the water column. For nearly two decades, the authors have been conducting hydrological and acoustic research in the shelf zone of the southwestern part of Peter the Great Bay (the Sea of Japan). The hydrology in the bay is characterized by high variability during the summer and autumn seasons, with high-frequency, intense internal waves observed against a background of low-frequency oscillations. The temperature profile in the bay at sea depths exceeding 40 meters typically features a single, well-defined surface thermocline that forms in spring as the upper layer warms, whereas up to three distinct thermoclines can be observed in late summer. In October, a high-gradient thermocline occurs, where the temperature can change by up to 18 °C within a 10-meter depth interval. Consequently, the depth determination error can reach 3.5%, or 2.5 meters for a sea depth of 70 meters.

Keywords. echo sounder, acoustic signals, bathymetry, thermometry, internal waves, thermocline, Peter the Great Bay, the Sea of Japan.

References

1. Abbasov I.B. Modern trends in monitoring the aquatic environment of coastal water areas // Environmental safety of the coastal and offshore zones of the sea. 2019. No. 1. P. 29–39. DOI: 10.22449/2413-5577-2019-1-29-39
2. Dushenin Yu.V., Markovich I.I. Application of multipath sonar instruments with digital spatial and temporal signal processing for environmental monitoring of water areas // Izvestiya SFU. Technical sciences. 2015. No. 12(173). P. 85–98.
3. Brown C.J., Sameoto J.A., Smith S.J. Multiple methods, maps, and management applications: Purpose made seafloor maps in support of ocean management // Journal of Sea Research. 2012. Vol. 72. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.seares.2012.04.009.
4. Uchino K. Advanced Piezoelectric Materials. Part of series: Woodhead Publishing in Materials. Chapter 1 - The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective. Woodhead Publishing, 2017. 92 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-102135-4.00001-1.
5. Markovich I.I. Digital spatial and temporal signal processing in multipath sonar of a marine underwater robotic complex // Izvestiya SFU. Technical sciences. 2019. No. 1(203). P. 239–248. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-239-248.
6. Markovich I.I., Zavtur E.E. An algorithm for determining the coordinates of targets using the difference-range method, taking into account inaccuracies in the installation of receiving sonar antennas // Izvestiya SFU. Technical sciences. 2017. No. 8(193). P. 162–171. DOI: 10.23683/2311-3103-2017-8-162-171.
7. Gaida T.C., Mohammadloo T.H., Snellen M., Simons, D.G. Mapping the Seabed and Shallow Subsurface with Multi-Frequency Multibeam Echosounders // Remote Sens. 2020. №12. 52. DOI: 10.3390/rs12010052.
8. Hidayat W., Saputra L.R., Hidayat R.R. et al. Comparison of Sound Speed from Measurements and Models in the Waters of Bunaken National Park, North Sulawesi. 19 May 2025: PREPRINT. DOI: 10.21203/rs.3.rs-6653653/v1.
9. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Chebrov V.N., Shevchenko Yu.V. The Cape Schultz geophysical polygon // Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2010. No. 5. P. 165–169.
10. Leontyev A.P., Yaroshchuk I.O., Smirnov S.V., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Shvyrev A.N. A spatially distributed measuring complex for monitoring hydrophysical processes on the ocean shelf // Instruments and Experimental Techniques. 2017. Vol. 60. No. 1. P. 130–136. DOI: 10.1134/S0020441216060191
11. Yaroshchuk I.O., Leontiev A.P., Kosheleva A.V., Samchenko A.N., Pivovarov A.A., Khrapchenkov F.F., Shvyrev A.N., Yaroshchuk E.I. Experimental studies of internal waves in the coastal zone of the Sea of Japan // Underwater research and Robotics. 2013. No. 1. P. 37–44.
12. Samchenko A., Dolgikh G., Yaroshchuk I., Kosheleva A., Pivovarov A., Novotryasov V. Extreme Hydrometeorological Conditions of Sediment Waves' Formation and Migration in Peter the Great Bay (The Sea of Japan) // Water. 2023. Vol. 15. 393 P. DOI: 10.3390/w15030393.
13. Yaroshchuk I., Kosheleva A., Lazaryuk A., Dolgikh G., Pivovarov A., Samchenko A., Shvyrev A., Gulin O., Korotchenko R. Estimation of Seawater Hydrophysical Characteristics from Thermistor Strings and CTD Data in the Sea of Japan Shelf Zone // J. Mar. Sci. Eng. 2023. Vol. 11. 1204 p. DOI: 10.3390/jmse11061204.
14. IOC, SCOR and IAPSO The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides. 2010. No. 56. UNESCO (English). P. 171.
15. Kuperman W.A., Lynch J.F. Shallow-water acoustics // Physics Today. 2004. Vol. 10(57). P. 55–61.

About the authors

SAMCHENKO Alexander N., Ph.D., Senior Researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences
Address: 43 Baltiyskaya Str., Vladivostok, Russia, 690041
Research interests: geoacoustic modeling, low-frequency hydroacoustics, seismoacoustics, shelf and coastal geomorphology
E-mail: samchenko.an@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0002-5184-0718

KOSHELEVA Alexandra V., Researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences
Address: 43 Baltiyskaya Str., Vladivostok, Russia, 690041
Research interests: hydroacoustics, oceanology, data processing
E-mail: kosheleva@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0001-6508-6325

PIVOVAROV Alexander A., Researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences
Address: 43 Baltiyskaya Str., Vladivostok, Russia, 690041
Research interests: hydroacoustics, hardware, oceanology
E-mail: pivovarov@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0003-0037-1568

YAROSHCHUK Igor O., Dr. Sc. (Phys. & Math.), Head of Laboratory
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences
Address: 43 Baltiyskaya Str., Vladivostok, Russia, 690041
Research interests: statistical hydroacoustics, statistical modeling, seismoacoustics, oceanology
E-mail: yaroshchuk@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0002-3212-9752

Recommended citation:

Samchenko A.N., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Yaroshchuk I.O. IMPROVING ECHO SOUNDER DEPTH ACCURACY USING THERMOMETRIC DATA. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2026. № 3 (57). С. 68–75. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_08. EDN: JKQLWT.

УДК 620.179.14
EDN: LQISAY
DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_09

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕНСОРА ДЛЯ ПОИСКА МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ

В.С. Безкоровайный, А.Н. Киреев, И.В. Мирошниченко, А.В. Добрыднев

В статье представлены результаты исследований феррозондовых сенсоров, которые активно применяются в подводных системах навигации, поиска магнитных аномалий, магнитной съёмки донной поверхности, а также в задачах обнаружения затонувших объектов и разведки подводных месторождений полезных ископаемых. Актуальность работы обусловлена требованиями к быстродействию, энергоэффективности и точности оборудования, эксплуатируемого в сложных гидрологических условиях.

При выполнении исследования в натурных условиях применены результаты математического моделирования по формированию выходного сигнала феррозондового сенсора при однополярном импульсном возбуждении. Установлена взаимосвязь между временем образования максимума выходного сигнала и величиной возбуждающего сигнала на образцах феррозондовых сенсоров с сердечниками из аморфного сплава АМАГ-170, исследования включали в себя регистрацию выходных сигналов сенсоров цифровым осциллографом при варьировании амплитуды однополярного импульсного сигнала возбуждения в пределах 4–14 В при фиксированной длительности импульса 1 мкс.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности оптимизации режимов работы феррозондовых сенсоров. Зная прогнозируемое время достижения максимума выходного сигнала для определенной амплитуды возбуждения, можно синхронизировать момент опроса сенсора с пиком полезного сигнала. Это позволит обеспечить высокое быстродействие феррозондовых сенсоров за счет применения однополярного импульсного сигнала возбуждения, исключения из обработки неинформативной части сигнала (обратный выброс, шум), снижения нагрузки на вычислительные мощности систем обработки сигнала, тем самым снизить критически важное энергопотребление автономных подводных аппаратов.

Ключевые слова: феррозонд, сенсор, подводные исследования, поиск магнитных аномалий, однополярное импульсное возбуждение, амплитуда сигнала, время образования максимума, магнитный металлодетектор

Введение

Магнитное поле как явление окружающей среды обладает рядом свойств, широко применяемых во многих областях науки и техники. Измерения магнитных полей выполняются различными типами сенсоров (герконы, датчики Холла, индукционные и магниторезистивные сенсоры, SQUID и др.). На фоне такого разнообразия выделяются сенсоры, основанные на магнитомодуляционном эффекте (эффекте магнитного насыщения ферромагнетиков). Такие сенсоры отличаются высокой надежностью, температурной стабильностью, широким динамическим диапазоном, портативностью и простотой изготовления [1–4]. Кроме того, они способны измерять не только скалярную величину, но и направление (вектор) магнитного поля.

Феррозондовые сенсоры (ФС) находят применение в самых разнообразных областях:

– в космонавтике: при изучении магнитных полей планет Солнечной системы и далекого космоса (миссии Voyager 1/2, Galileo, Rosetta, BepiColombo), в исследованиях Марса (Mars Global Surveyor, Tianwen-1, InSight), а также для изучения магнитосферы Земли (аппараты «Интербол», «Метеор-М», «Электро-Л», Cluster, THEMIS) [5–9].

– в промышленности: для неразрушающего контроля, магнитной дефектоскопии, реализации метода магнитной памяти металла. ФС используются в промышленной автоматизации и робототехнике в качестве бесконтактных сенсоров положения, датчиков физических величин, а также для сортировки сплавов и измерения намагниченности материалов [10–12].

– в медицине: для проведения магнитокардиографии, магнитоэнцефалографии и трекинга при капсульной эндоскопии [13, 14].

Особое место ФС занимают в подводных исследованиях. Исторически одними из первых они начали применяться в военных целях для поиска морских мин и других неразорвавшихся боеприпасов, а также для обнаружения подводных лодок. В дальнейшем ФС нашли широкое применение для выявления слабых магнитных аномалий при поиске затонувших объектов, проведения магнитной съемки донной поверхности [15–18], разведки подводных месторождений полезных ископаемых, контроля геомагнитного поля, а также для навигации и ориентации автономных подводных аппаратов (АПА) по магнитным аномалиям.

В настоящее время на основе ФС, выступающих в качестве первичных преобразователей, успешно эксплуатируются такие устройства, как MAGIC МФ-03-Р, MFMG-1, ТРИТОН, Marine Magnetics SeaSpy-1 [19–21] и др. В условиях подводной археологии, поиска затонувших объектов или инженерных изысканий ФС позволяют фиксировать аномалии магнитного поля с высокой точностью, что критически важно при работе в сложной гидрологической среде.

Именно ФС, совместно с гидролокаторами и подводными камерами, способствовали успеху экспедиции под руководством Роберта Балларда при поиске «Титаника» в 1985 году. В 2003 году с помощью магнитометрии был обнаружен флагман короля Генриха VIII корабль «Mary Rose», затонувший в 1545 году. В 2013 году с помощью системы Marine Magnetics SeaSpy-1 было проведено масштабное исследование затопленной части античной Фанагории, а в 2020 году в Балтийском море магнитное картографирование позволило обнаружить останки немецкого миноносца Т-31 и советского тральщика ТЩ-45, затонувших в Финском заливе в июне 1944 года [17, 18, 22, 23].

Качественное выполнение подводных магнитных измерений, позволяющих обнаруживать такие удивительные находки, требует не только высокой чувствительности сенсоров, но и их высокого быстродействия. При интеграции ФС в высокоскоростные автоматизированные системы, автономные подводные аппараты возникает необходимость в синхронной работе нескольких измерительных устройств, что предъявляет высокие требования к временным характеристикам первичных преобразователей.

В силу особых требований к автономности и минимизации энергопотребления подводных систем оптимальным решением при возбуждении ФС является использование однополярного импульсного сигнала, который характеризуется малым расходом энергии и высоким быстродействием.

Цель и задачи. Целью данной работы является установление зависимости времени образования максимума выходного сигнала ФС от величины возбуждающего сигнала при однополярном импульсном способе возбуждения. Для достижения поставленной цели проведен анализ математической модели времени образования максимума выходного сигнала ФС, учитывающий явление магнитного насыщения ферромагнитного сердечника, с последующим натурным исследованием временных характеристик выходных сигналов при различной амплитуде возбуждения.

Феррозондовый сенсор — это высокочувствительный датчик магнитного поля, работающий на основе намагничивания сердечников из ферромагнитных материалов.

На сердечники феррозонда намотаны измерительная и возбуждающая обмотки, которые размещаются в специализированном каркасе (рис. 1).

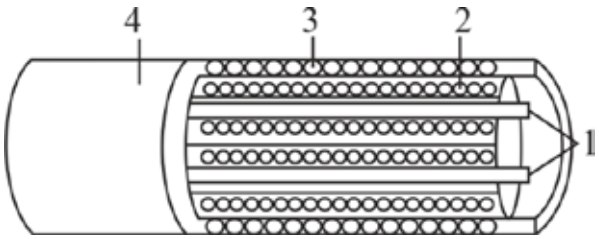


Рис. 1. Конструкция ФС: 1 – ферромагнитные сердечники; 2 – обмотка возбуждения (ОВ); 3 – измерительная обмотка (ИО); 4 – каркас сенсора

Традиционным и наиболее широко применяемым является возбуждение ФС переменным синусоидальным сигналом [24]. Существенным недостатком такого метода является то, что обмотки ФС находятся под постоянным воздействием тока, что приводит к нагреву обмоток и значительному энергопотреблению. При однополярном импульсном возбуждении сигнал подается с определенным интервалом, что позволяет значительно снизить энергопотребление, уменьшить нагрев обмоток ФС, а также повысить их чувствительность [25–27].

Математическая модель образования выходного сигнала ФС

В обмотку возбуждения ФС подается импульс напряжения длительностью $t_и$ и амплитудой U_1, сигнал возбуждения описывается следующей системой уравнений:

$$u_1(t)=\begin{cases}U_1 & при\ 0\le t\le t_и\\ 0 & при\ t\ge t_и,\end{cases} \quad (1)$$

где $u_1(t)$ – входной сигнал ФС; U_1 – амплитуда возбуждения; t – время.

Выходной сигнал ФС в таком случае определяется следующим выражением [10]:

$$u_2(t)=\begin{cases}\dfrac{U_2(H_2)(t-t_1)}{t_m-t_1} & при\ t_1\le t\le t_m\\ -\dfrac{U_2(H_m)(t-t_m)}{t_и-t_m}+U_2(H_2) & при\ t_m\le t\le t_и\\ U_2(H_4) & при\ t\ge t_и,\end{cases} \quad (2)$$

где u_2(t) – выходной сигнал ФС в зависимости от времени;

U_2 – амплитуда выходного сигнала;

H_2, H_4 – напряженность магнитного поля в соответствующие моменты времени;

H_m – максимальная напряженность магнитного поля;

t_1 – время начала формирования выходного сигнала;

t_m – время, при котором выходной сигнал достигает максимальной величины.

Одним из методов повышения эффективности ФС в высокоскоростных магнитоизмерительных системах является минимизация общего времени отклика измерительного преобразователя. Традиционный метод обработки выходного сигнала [10], предполагающий непрерывный анализ всей формы выходного сигнала, предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам и часто не обеспечивает требуемого временного разрешения. В качестве альтернативы используется метод, основанный на дискретном считывании полезного сигнала в строго определенный или заранее прогнозируемый момент времени, который соответствует достижению выходным сигналом своего максимального значения [25, 26].

Временная динамика достижения максимума выходного сигнала ФС с достаточной точностью может быть аппроксимирована кусочно-ломаной функцией. Ключевыми точками излома функции являются моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 (рис. 2) [27].

Время установления в сердечнике ФС заданного значения напряженности магнитного поля определяется следующими выражениями:

$$t_1=2\mu_m\tau_0 ln\frac{H_0}{H_0-H_1}, \quad (3)$$

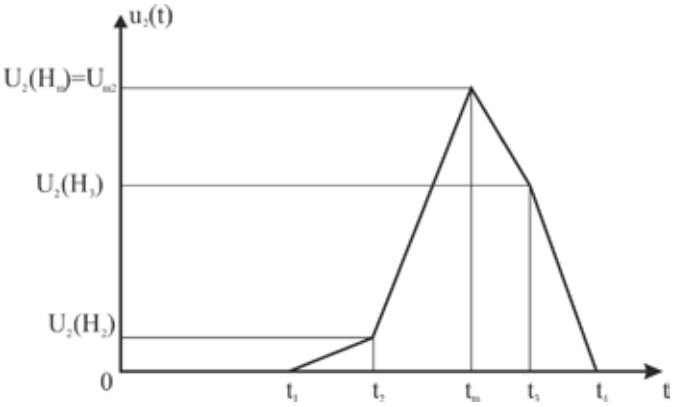


Рис. 2. Аппроксимация времени образования максимума выходного сигнала ФС

$$t_2=\frac{1}{2}\tau_0\frac{3\mu_m+\mu_s}{H_0-H_1}\left[2\Delta H-\frac{\mu_m-\mu_s}{g(3\mu_m+\mu_s)}\sin 2g\Delta H\right]+t_1 \quad (4)$$

$$t_3=\tau_0\frac{\mu_m+\mu_s}{H_0-H_1-2\Delta H}\times$$
$$\times\left[\frac{\pi}{g}-2\Delta H+\frac{h}{g}(sin3g\Delta H+sin g\Delta H)\right]+t_2, \quad (5)$$

$$t_4=\frac{\mu_m+3\mu_s}{H_0-H_1-\dfrac{\pi}{g}}\left[2\Delta H-\frac{\mu_m-\mu_s}{g(3\mu_m+\mu_s)}sin2\Delta H)\right]+t_3 \quad (6)$$

$$t_m=\frac{\mu_m+\mu_s}{H_0-H_m}\times$$
$$\times\left\{H_m-H_1-2\Delta H+\frac{h}{g}\left[sin\left(H_m-H_1-3\Delta H\right)+\sin\Delta H\right]\right\} \quad (7)$$

Здесь μ_m – максимальная магнитная проницаемость материала сердечника;

τ_0 – постоянная времени;

H_1 – напряженность измеряемого магнитного поля;

μ_S – магнитная проницаемость насыщения материала сердечника;

H_0 – поле возбуждения феррозонда;

ΔH – диапазон измеряемой напряженности поля.

Материалы натурных исследований

Исследования проводились на ФС, сердечники которых были изготовлены из аморфного сплава АМАГ-170 размерами 12×1,5×0,025 мм. Диаметр провода обмоток 0,1 мм. Время подачи однополярного импульса составляло 1 мкс. Исследуемые ФС различались количеством витков обмоток.

Для выделения полезной составляющей выходного сигнала использовалась активно-ёмкостная нагрузка [28]. Измерения проводились последовательно при увеличении амплитуды сигнала возбуждения от 4 до 14 В. Дальнейшее повышение напряжения возбуждения приводит к перегреву данных ФС и не исследовалось.

Результаты исследований

На рис. 3 представлены осциллограммы выходных сигналов ФС №1, зафиксированные при последовательном увеличении амплитуды возбуждения.

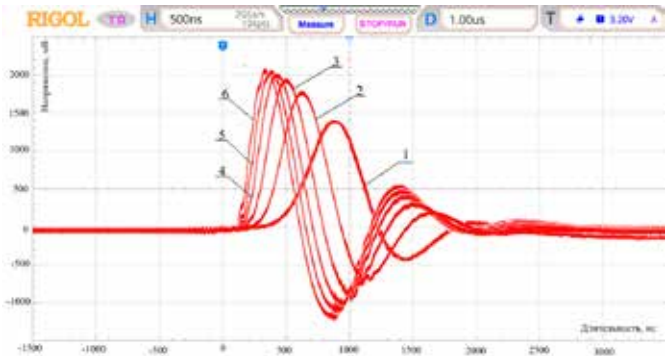


Рис. 3. Выходные сигналы ФС №1 при различной амплитуде возбуждения:
1 – 4 В, 2 –6 В, 3 – 8 В, 4 – 10 В, 5 – 12 В, 6 – 14 В

Полученные данные образования t_m в зависимости от U_1 сведены в таблицу.

Зависимость t_m от U_1 ФС № 1

Амплитуда возбуждения, В	4	6	8	10	12	14
Время образования максимума выходного сигнала, нс	880	620	510	430	360	320

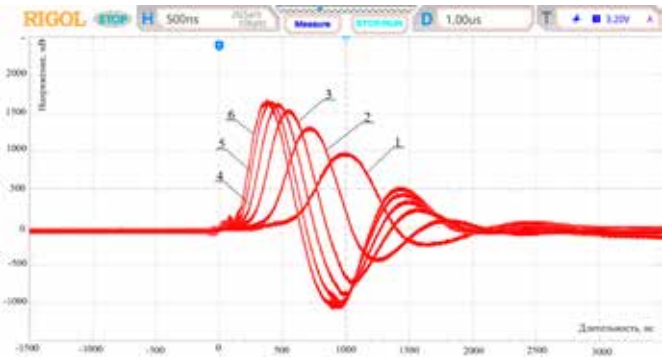


Рис. 4. Выходные сигналы ФС №2 при различной амплитуде возбуждения:
1 – 4 В, 2 –6 В, 3 – 8 В, 4 – 10 В, 5 – 12 В, 6 – 14 В

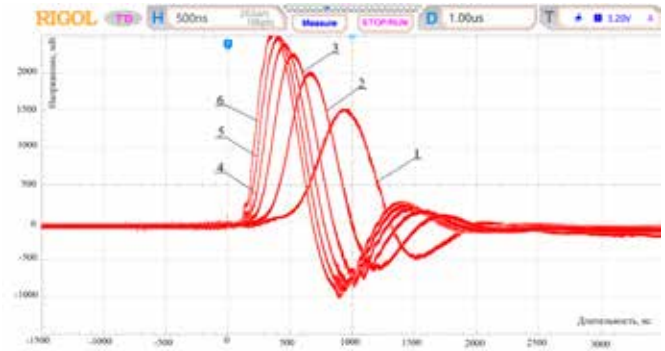


Рис. 5. Выходные сигналы ФС №3 при различной амплитуде возбуждения: 1 – 4 В, 2 –6 В, 3 – 8 В, 4 – 10 В, 5 – 12 В, 6 – 14 В

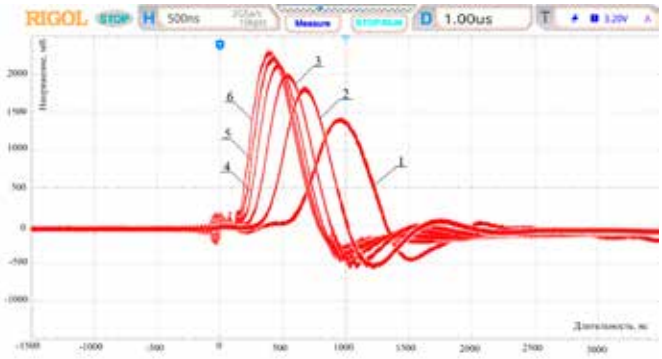


Рис. 6. Выходные сигналы ФС №3 при различной амплитуде возбуждения: 1 – 4 В, 2 –6 В, 3 – 8 В, 4 – 10 В, 5 – 12 В, 6 – 14 В

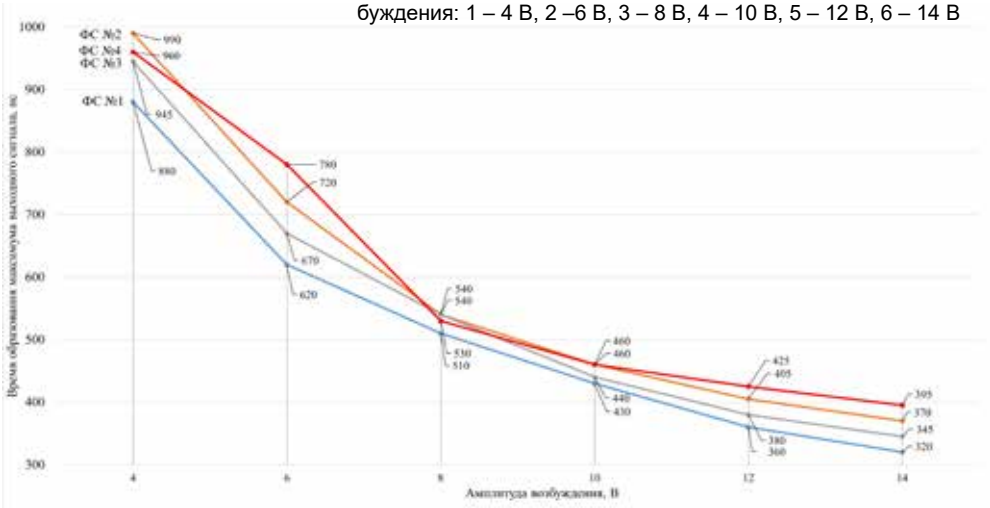


Рис. 7. График зависимости времени образования t_m ФС от амплитуды сигнала возбуждения U_1

Анализ осциллограмм (рис. 3) и данных таблицы, демонстрирует четкую зависимость: при росте напряжения возбуждения от 4 В до 14 В фиксируется уменьшение времени t_m с 880 до 320 нс.

Для подтверждения полученных результатов были проведены дополнительные исследования на других ФС (рис. 4–6).

Для наглядности результатов все значения времени образования максимума t_m выходных сигналов ФС в зависимости от величин входных сигналов возбуждения приведены на графике (рис. 7).

Заключение

В результате исследования установлена нелинейная обратная зависимость времени достижения максимума выходного сигнала ФС от амплитуды однополярного импульса возбуждения.

Подтверждена достоверность представленной математической модели для данных ФС при однополярном импульсном возбуждении.

Установлено, что прогнозирование момента достижения максимума выходного сигнала при известной амплитуде возбуждения позволяет синхронизировать момент опроса сенсора с пиком полезного сигнала, тем самым представляется возможность снизить нагрузку на вычислительные системы.

Практическая реализация полученных результатов может быть использована для:

– оптимизации режимов возбуждения феррозондовых магнитометров в системах поиска подводных объектов;

– разработки алгоритмов адаптивной синхронизации вычислительных систем при работе с ФС;

– повышения автономности магниторазведочных систем за счёт снижения энергопотребления при возбуждении ФС.

Гранты и программы

При финансовой поддержке программы на выполнение научно-исследовательских работ в рамках государственного задания Минобрнауки России (НИОКТР №12511400273-6), на оказание государственных услуг по проекту FREE-2024-0002.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. 2-е изд., перераб. Москва: Наука, 1974. 768 с.
2. Долматова О.А. Датчик Холла, феррозонд и магниторезистивный сенсор: сравнительный анализ и области применения / О. А. Долматова, Т. П. Закиров // Студенческая весна - 2025: сборник научных статей 79-й региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 2025. С. 95–100. EDN GSVBMR.
3. Ripka P. Review of fluxgate sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 1992. Vol. 33, no. 3. P. 129–141. DOI: 10.1016/0924-4247(92)80159-Z.
4. Ripka P. Advances in fluxgate sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 2003. Vol. 106–107. P. 8–14. DOI: 10.1016/S0924-4247(03)00148-4.
5. The Cluster Mission: ESA's Spacefleet to the Magnetosphere / ESA Special Publications. 2000. Vol. 450. P. 1–20.
6. Zhang T.L. The fluxgate magnetometer for the Venus Express Mission / T. L. Zhang, G. Berghofer, W. Magnes [et al.] // ESA SP-1295. Noordwijk: ESA, 2008.
7. Babcock E.P. CubeSat Attitude Determination via Kalman Filtering of Magnetometer and Solar Cell Data / E. P. Babcock, T. Bretl // 25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Utah, 2011. URL: https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2011/all2011/56/.
8. Heyner D. The BepiColombo Planetary Magnetometer MPO-MAG: What Can We Learn from the Hermean Magnetic Field? / D. Heyner, H. U. Auster, K. H. Glassmeier [et al.] // Space Science Reviews. 2021. Vol. 217, no. 4. Art. 52. DOI: 10.1007/s11214-021-00822-x.
9. Magnetic field experiment for Voyagers 1 and 2 / K.W. Behannon, M. H. Acuña, L. F. Burlaga [et al.] // Space Science Reviews. 1977. Vol. 21, no. 2. P. 235–257.
10. Браверман В.Я. Анализ динамических характеристик феррозондового датчика стыка свариваемых деталей / В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2009. Вып. 25, № 2.
11. Мухаметшин А.М. Контроль состояния и режимов горнотехнологических установок и процессов шахтного производства на основе применения геоинформационной МММ-системы / А. М. Мухаметшин, А. Н. Игнатенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013.
12. Иваненко А.Н. Определение пространственного положения подводных трубопроводов с использованием полноградиентной магнитометрической системы / А. Н. Иваненко, В. В. Архипов, В. А. Сапунов // Вести газовой науки: научно-технический сборник. 2018. № 4(36). С. 94–104. EDN YYTDSX.
13. Масленников Р.О. Стенд для магнитокардиографии на основе феррозондовых датчиков / Р. О. Масленников, А. В. Сучков, И. А. Юрасов // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84, № 11. С. 1519–1523.
14. Новый уровень магнитокардиографии: использование феррозондов в качестве чувствительного элемента / Белорусский национальный технический университет. URL: https://rep.bntu.by/handle/data/162657.
15. Coy L. et al. Underwater UXO detection using magnetometry on hovering AUVs // Journal of Field Robotics. 2023. Vol. 40, Issue 4. P. 1045–1067. DOI: 10.1002/rob.22159.
16. Martins A., Almeida J. M., Almeida C., Silva E. P., Dias A., Dias N., Aaltonen J., Heininen A., Koskinen K. T., Rossi C., Domínguez S., Vörös C., Henley S., McLoughlin M., van Moerkerk H., Tweedie J., Bodó B., Zajzon N. UX-1 system design – A robotic system for underwater mining exploration // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS): conference proceedings. Madrid, Spain, 2018. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593999.
17. Гусаров, А. В. Магнитная съемка в акватории Фанагории / А. В. Гусаров // Археология и геофизика: новые методы и технологии: материалы междунар. конф. Москва, 2014. С. 45–48.
18. Артефакты со дна: самые удивительные находки Центра подводных исследований РГО / Русское географическое общество. URL: https://www.vokrugsveta.ru/history/artefakty-so-dna-samye-udivitelnye-nakhodki-centra-podvodnykh-issledovaniy-rgo-id6562181.

19. Морской буксируемый феррозондовый магнитометр-градиентометр МФМГ-1: техническое описание и инструкция по эксплуатации. М.: ООО «Спектр-Геофизика», 2009. 15 с.

20. Магнитометрический комплекс многоканальный «ТРИТОН». URL: https://granat-e.ru/triton_mag-multichannel.html.

21. Санков О.В., Легкий В.Н. Исследование феррозондовых датчиков магнитных объектов для систем ближней локации // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2009. № 2 (75). С. 90–101. EDN: KPNNXP.

22. Uchupi E. Resting in pieces / E. Uchupi, R. D. Ballard, W. N. Lange // Oceanus. 1988. Vol. 31, no. 4. P. 53–60.

23. Wessex Archaeology. Wrecks on the Seabed: Assessment, Evaluation and Recording. Geophysical Survey of Designated Historic Wrecks including Mary Rose, A1 Submarine, Hazardous and Invincible: [отчёт] / Wessex Archaeology; commissioned by English Heritage; supported by Aggregate Levy Sustainability Fund (ALSF). Salisbury: Wessex Archaeology, 2003. Survey dates: 11–26 June 2003.

24. Афанасьев Ю.В. Феррозонды. Л.: Энергия, 1969. 168 с.

25. Безкоровайный В.С., Ливцов Ю.В., Яковенко В.В., Шатова Н.А. Разработка математической модели образования выходного сигнала феррозонда при однополярном импульсном возбуждении // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 70. С. 190–197.

26. Безкоровайный В.С., Тарасенко О.В., Яковенко В.В., Ивженко А.А. Функция преобразования феррозонда с однополярным импульсным возбуждением // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. 2018. № 4 (10). С. 159–166.

27. Безкоровайный В.С., Яковенко В.В., Швец С.Н. Способы аппроксимации кривой намагничивания сердечников феррозондов при однополярном импульсном возбуждении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 25–33. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-25-33. EDN: TGUUXZ.

28. Половинка О.Д., Безкоровайный В.С. Влияние активно-ёмкостной нагрузки на функцию преобразования феррозонда // Физические основы приборостроения. 2025. Т. 14, № 1 (55). С. 50–56.

Сведения об авторах:

БЕЗКОРОВАЙНЫЙ Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, руководитель, ведущий научный сотрудник

Молодежная научно-исследовательская лаборатория «Прогресс»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Адрес: 291034, г. Луганск, кв-л Молодёжный, д. 20А

Область научных интересов: исследование, разработка и применение электромагнитных датчиков для систем мониторинга и диагностики узлов роботизированных машин и механизмов

Тел.: +7(959)529-13-11

E-mail: bezkorvs@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8337-7318

SPIN-код: 9833-5114

Author ID: 1220764

КИРЕЕВ Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Адрес: 291034, г. Луганск, кв-л Молодёжный, д.20А

Область научных интересов: неразрушающий контроль, ультразвуковая диагностика роботизация машин и механизмов

E-mail: lifter_23@mail.ru

Тел.: +7(959)136-70-02

ORCID: 000-0002-7548-3348

SPIN-код: 3172-8780

Author ID: 945387

МИРОШНИЧЕНКО Иван Васильевич, младший научный сотрудник

Молодежная научно-исследовательская лаборатория «Прогресс»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Адрес: 291034, г. Луганск, кв-л Молодёжный, д.20А

Область научных интересов: исследование, разработка и применение электромагнитных датчиков для систем мониторинга и диагностики узлов роботизированных машин и механизмов

E-mail: sensor-3000@mail.ru

Тел.: +7(959)105-88-65

SPIN-код: 5724-9314

Author ID: 1328613

ДОБРЫДНЕВ Алексей Витальевич, младший научный сотрудник

Молодежная научно-исследовательская лаборатория «Прогресс»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Адрес: 291034, г. Луганск, кв-л Молодёжный, д.20А

Область научных интересов: исследование, разработка и применение электромагнитных датчиков для систем мониторинга и диагностики узлов роботизированных машин и механизмов

E-mail: mushroomrace@yandex.ru

Тел.: +7(959)113 -07-08

SPIN-код: 4805-3967

AuthorID: 1264623

Для цитирования:

Безкоровайный В.С., Киреев А.Н., Мирошниченко И.В., Добрыднев А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕНСОРА ДЛЯ ПОИСКА МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 76–83. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_09. EDN: LQISAY.

DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_09

INVESTIGATION OF A FLUXGATE SENSOR FOR DETECTION OF MAGNETIC ANOMALIES

V.S. Bezkorovainyi, A.N. Kireev, I.V. Miroshnichenko, A.V. Dobrydnev

This paper presents the results of research on fluxgate sensors, which are widely used in underwater navigation systems, magnetic anomaly detection, seabed magnetic surveying, as well as in tasks related to the detection of sunken objects and exploration of underwater mineral deposits. The relevance of this work is driven by the requirements for high speed, energy efficiency, and accuracy of equipment operating under complex hydrological conditions.

Within the framework of this study, a mathematical model describing the formation of the output signal of a fluxgate sensor under unipolar pulsed excitation was examined under field conditions. The relationship between the time to reach the maximum output signal and the magnitude of the excitation signal was established using fluxgate sensor samples with cores made of the amorphous alloy AMAG-170. The experimental procedure included recording sensor output signals with a digital oscilloscope while varying the amplitude of the unipolar excitation pulse within the range of 4–14 V at a fixed pulse duration of 1 μs.

The practical significance of the obtained results lies in the potential for optimizing the operating modes of fluxgate sensors. By knowing the predicted time to reach the maximum output signal for a given excitation amplitude, it becomes possible to synchronize the sensor polling instant with the peak of the useful signal. This approach enables high-speed operation of fluxgate sensors through the use of unipolar pulsed excitation, exclusion of non-informative signal components (reverse overshoot, noise) from processing, reduction of computational load on signal processing systems, and, consequently, a decrease in the critically important power consumption of autonomous underwater vehicles.

Keywords: fluxgate sensor, sensor, underwater research, magnetic anomaly detection, unipolar pulsed excitation, signal amplitude, time to peak formation, magnetic metal detector

References

1. Rosenblat, M. A. Magnetic elements of automation and computing technology / M. A. Rosenblat. 2nd ed., revised. Moscow: Nauka, 1974. 768 p.
2. Dolmatova O.A. Hall sensor, fluxgate, and magnetoresistive sensor: comparative analysis and application areas / O.A. Dolmatova, T.P. Zakirov // Student Spring - 2025: Collection of scientific papers of the 79th Regional Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, St. Petersburg, May 13 15, 2025. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M. A. Bonch-Bruevich, 2025. P. 95 100. EDN GSVBMR.
3. Ripka P. Review of fluxgate sensors / P. Ripka // Sensors and Actuators A: Physical. 1992. Vol. 33, No. 3. P. 129-141. DOI: 10.1016/0924-4247(92)80159-Z.
4. Ripka P. Advances in fluxgate sensors / P. Ripka // Sensors and Actuators A: Physical. 2003. Vol. 106–107. P. 8–14. DOI: 10.1016/S0924-4247(03)00148-4.
5. The Cluster Mission: ESA's Spacefleet to the Magnetosphere // ESA Special Publications. 2000. Vol. 450. P. 1–20.
6. Zhang T.L. The fluxgate magnetometer for the Venus Express Mission / T.L. Zhang, G. Berghofer, W. Magnes [et al.] // ESA SP-1295. Noordwyk: ESA, 2008.
7. Babcock E.P. CubeSat Attitude Determination via Kalman Filtering of Magnetometer and Solar Cell Data / E. P. Babcock, T. Bretl // 25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Utah, 2011. URL: https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2011/all2011/56/.
8. Heyner D. The BepiColombo Planetary Magnetometer MPO-MAG: What Can We Learn from the Hermean Magnetic Field? / D. Heyner, H. U. Auster, K. H. Glassmeier [et al.] // Space Science Reviews. 2021. Vol. 217. No. 4. Art. 52. DOI: 10.1007/s11214-021-00822-x.
9. Magnetic field experiment for Voyagers 1 and 2 / K. W. Behannon, M.H. Acuña, L.F. Burlaga [et al.] // Space Science Reviews. 1977. Vol. 21. No. 2. P. 235–257.
10. Braverman V.Ya. Analysis of dynamic characteristics of a fluxgate sensor for the joint of welded parts / V.Ya. Braverman, V.S. Belozertsev // Vestnik of Siberian State Aerospace University. 2009. Iss. 25. No. 2.
11. Mukhametshin A.M. Monitoring the state and modes of mining technology installations and processes of mining production based on the application of a geoinformation MMM-system / A.M. Mukhametshin, A. N. Ignatenko // Mining Information and Analytical Bulletin. 2013.
12. Ivanenko A.N. Determination of the spatial position of underwater pipelines using a full-gradient magnetometric system / A.N. Ivanenko, V.V. Arkhipov, V.A. Sapunov // Scientific and Technical Collection. Vesti of Gas Science. 2018. No. 4(36). P. 94–104. EDN YYTDSX.
13. Maslennikov R.O. Test bench for magnetocardiography based on fluxgate sensors / R.O. Maslennikov, A.V. Suchkov, I.A. Yurasov // Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya. 2020. Vol. 84. No. 11. P. 1519–1523.
14. A new level of magnetocardiography: the use of fluxgates as a sensing element / Belarusian National Technical University. URL: https://rep.bntu.by/handle/data/162657.

15. Coy L. Underwater UXO detection using magnetometry on hovering AUVs / L. Coy [et al.] // Journal of Field Robotics. 2023. Vol. 40, Iss. 4. P. 1045–1067. DOI: 10.1002/rob.22159.

16. Martins A. UX-1 system design – A robotic system for underwater mining exploration / A. Martins, J.M. Almeida, C. Almeida [et al.] // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS): conference proceedings. Madrid, Spain, 2018. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593999.

17. Gusarov A.V. Magnetic survey in the Fanagoria water area / A.V. Gusarov // Archaeology and Geophysics: New Methods and Technologies: proceedings of the international conference. Moscow, 2014. P. 45–48.

18. Artifacts from the bottom: the most amazing finds of the Center for Underwater Research of the Russian Geographical Society / Russian Geographical Society. URL: https://www.vokrugsveta.ru/history/artefakty-so-dna-samye-udivitelnye-nakhodki-centra-podvodnykh-issledovaniy-rgo-id6562181.

19. Marine towed fluxgate magnetometer-gradiometer MFMG-1: technical description and operation manual. Moscow: Spektr-Geophyzika LLC, 2009. 15 p.

20. "TRITON" multichannel magnetometric complex [Electronic resource]. https://granat-e.ru/triton_mag-multichannel.html.

21. Sankov O.V. Investigation of fluxgate sensors of magnetic objects for near-field location systems / O. V. Sankov, V. N. Legkiy // Vestnik of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering. 2009. No. 2 (75). P. 90–101. EDN: KPNNXP.

22. Uchupi E. Resting in pieces / E. Uchupi, R. D. Ballard, W. N. Lange // Oceanus. 1988. Vol. 31. No. 4. P. 53–60.

23. Wessex Archaeology. Wrecks on the Seabed: Assessment, Evaluation and Recording. Geophysical Survey of Designated Historic Wrecks including Mary Rose, A1 Submarine, Hazardous and Invincible: [report] / Wessex Archaeology; commissioned by English Heritage; supported by Aggregate Levy Sustainability Fund (ALSF). Salisbury: Wessex Archaeology, 2003. Survey dates: 11–26 June 2003.

24. Afanasyev Yu. V. Fluxgates / Yu. V. Afanasyev. Leningrad: Energiya, 1969. 168 p.

25. Bezkorovainyi V.S. Development of a mathematical model for the output signal formation of a fluxgate under unipolar pulse excitation / V. S. Bezkorovainyi, Yu. V. Livtsov, V. V. Yakovenko, N. A. Shatova // Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University. 2019. No. 70. P. 190–197.

26. Bezkorovainyi V.S. Transfer function of a fluxgate with unipolar pulse excitation / V.S. Bezkorovainyi, O.V. Tarasenko, V.V. Yakovenko, A.A. Ivzhenko // Vestnik of Luhansk National University named after V. Dahl. 2018. No. 4 (10). P. 159–166.

27. Bezkorovainyi V.S. Methods for approximating the magnetization curve of fluxgate cores under unipolar pulse excitation / V.S. Bezkorovainyi, V.V. Yakovenko, S.N. Shvets // Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences. 2021. No. 5. P. 25–33. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-25-33. EDN: TGUUXZ.

28. Polovinka O.D. Effect of active-capacitive load on the transfer function of a fluxgate / O.D. Polovinka, V.S. Bezkorovainyi // Physical Fundamentals of Instrument Engineering. 2025. Vol. 14. No. 1 (55). P. 50–56.

Information about authors

BEZKOROVAINYI Vladimir Sergeevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D. equivalent), Associate Professor, Head, Leading Researcher
Youth Scientific Research Laboratory "Progress"
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lugansk State University named after Vladimir Dal"
Address: 291034, Lugansk, Molodezhny Quarter, Bldg. 20A
Research interests: Research, development, and application of electromagnetic sensors for monitoring and diagnostic systems of robotic machines and mechanisms
Tel. +7 (959) 529-13-11
E-mail: bezkorvs@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8337-7318
SPIN-code: 9833-5114
Author ID: 1220764

KIREEV Andrey Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences (Dr. Sci./D.Sc. equivalent), Chief Researcher, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lugansk State University named after Vladimir Dal"
Address: 291034, Lugansk, Molodezhny Quarter, Bldg. 20A
Research interests: Non-destructive testing, ultrasonic diagnostics, and robotics of machines and mechanisms
E-mail: lifter_23@mail.ru
Phone: +7 (959) 136-70-02
ORCID: 0000-0002-7548-3348
SPIN-code: 3172-8780
Author ID: 945387

MIROSHNICHENKO Ivan Vasilievich, Junior Researcher
Youth Scientific Research Laboratory "Progress"
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lugansk State University named after Vladimir Dal"
Address: 291034, Lugansk, Molodezhny Quarter, Bldg. 20A
Research interests: Research, development, and application of electromagnetic sensors for monitoring and diagnostic systems of robotic machines and mechanisms
E-mail: sensor-3000@mail.ru
Phone: +7 (959) 105-88-65
SPIN-code: 5724-9314
Author ID: 1328613

DOBRYDNEV Alexey Vitalievich, Junior Researcher
Youth Scientific Research Laboratory "Progress"
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lugansk State University named after Vladimir Dal"
Address: 291034, Lugansk, Molodezhny Quarter, Bldg. 20A
Research interests: Research, development, and application of electromagnetic sensors for monitoring and diagnostic systems of robotic machines and mechanisms
E-mail: mushroomrace@yandex.ru
Phone: +7 (959) 113-07-08
SPIN-code: 4805-3967
Author ID: 1264623

Recommended citation:

Bezkorovainyi V.S., Kireev A.N., Miroshnichenko I.V., Dobrydnev A.V. INVESTIGATION OF A FLUXGATE SENSOR FOR DETECTION OF MAGNETIC ANOMALIES. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2026. No. 3 (57). C. 76–83. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_09. EDN: LQISAY.

УДК: 534.4, 534-143, 57.084.1
EDN: OAWTIK
DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_10

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОГО ПРИЕМНИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДНЫХ ШУМОВ ЛЕГКОВОДОЛАЗА–АКВАЛАНГИСТА

С.В. Горовой, А.А. Тагильцев, В.Г. Сиренко

Представлены результаты экспериментального исследования в полосе частот 10–4000 Гц спектральных плотностей, функций когерентности и одномерных плотностей распределения вероятностей мгновенных значений звукового давления и горизонтальной компоненты градиента звукового давления гидроакустических шумов находящегося неподвижно у дна легководолаза, экипированного аквалангом Aeris (США). Шумы зарегистрированы в прибрежной акватории на расстоянии 2 м от источника. Во время эксперимента наблюдались техногенные помехи, обусловленные движением судов, а также импульсные помехи, создаваемые морскими ракообразными. Показано, что основная часть энергии шумов, создаваемых дыханием легководолаза, сосредоточена в диапазоне 15–1000 Гц. Наибольшие значения функции когерентности сигналов, воспринимаемых приемником звукового давления и приемником градиента звукового давления во время выдохов, наблюдались в областях 25–100 Гц и 350–600 Гц, во время вдохов – в областях 80–250 Гц и 350–800 Гц. В качестве моделей плотностей распределений мгновенных значений зарегистрированных шумов предлагается использовать суммы гауссовских распределений. Приводятся рекомендации по возможным практическим применениям результатов исследований.

Ключевые слова: гидроакустические шумы мелкого моря, векторно–скалярные приемники, шумы легководолазов.

Введение

В подводных работах, выполняемых легководолазами в мелководных, с глубинами менее 30 м прибрежных морских акваториях, широко используются дыхательные аппараты открытого цикла (акваланги), а также, на глубинах до 20 м – более компактные дыхательные аппараты замкнутого цикла (ребризеры). Во время нахождения под водой чувствительность легководолазов к изменениям самочувствия притупляется. Известно, что недостаточный контроль самочувствия, функционального и психоэмоционального состояния влияет на качество выполняемых ими работ под водой, а также может стать причиной заболеваний водолаза, травм или даже гибели [1], поэтому дистанционный, в реальном времени, мониторинг физического состояния находящихся под водой легководолазов является очень важным при обучении, тренировках, а также в целях профилактики профессиональных заболеваний.

Гидроакустические (ГА) шумы, обусловленные дыханием, движением и деятельностью легководолазов под водой могут использоваться как для осуществления дистанционного контроля и объективной оценки состояния их здоровья [2, 3], так и для наблюдения за перемещениями и определения местоположения под водой [4, 5]. В работах [2–6] описаны результаты исследования спектральных характеристик звукового давления шумов легководолазов с дыхательными аппаратами различных типов. В [2, 3, 7] приведены результаты исследования спектральных характеристик звукового давления шумов легководолаза с ребризером FROGS [8], в котором применены специальные технические решения для уменьшения его шумоизлучения. Шумы легководолазов с дыхательными аппаратами различных типов отличаются как интенсивностью, так и областями частот, в которых сосредоточена наибольшая часть излучаемой ими звуковой энергии [2, 3, 5, 6, 8]. Характеристики шумов, создаваемых даже одним и тем же дыхатель-

ным аппаратом при использовании в идентичных условиях разными легководолазами, могут существенно отличаться, что требует индивидуального подхода к их наблюдению и статистических оценок.

Представляемые авторами результаты эксперимента, выполнены с целью исследования спектральных и статистических характеристик подводных шумов, зарегистрированных векторно-скалярным приемником (ВСП) вблизи неподвижного легководолаза, экипированного аквалангом. ВСП включает ненаправленный приемник звукового давления (ПД) и векторный приемник (ВП) инерционного типа собственной разработки [9], который, как показано далее, в большей части диапазона частот 10–1000 Гц работал как приемник компонент градиента звукового давления. Поступавшие от ВСП сигналы после усиления и фильтрации в общей полосе частот 10–4000 Гц подвергались дискретизации с помощью многоканального 16–разрядного АЦП и записывались в память компьютера. Частота дискретизации составляла 10 кГц.

Описание эксперимента

Эксперимент по регистрации шумов легководолаза выполнялся летом в одной из акваторий залива Петра Великого Японского моря. Условия эксперимента: состояние моря 2 балла, придонное течение со скоростью порядка 0,02 м/с, глубина места в районе работ 6 м, дно – песок, редкие водоросли. Во время эксперимента, кроме ГА динамических шумов моря, наблюдались техногенные помехи, обусловленные движением судов, импульсные помехи, создаваемые донными биологическими объектами (раки, мелкие крабы и др.). Результирующие уровни техногенных помех и динамических шумов моря во время эксперимента примерно соответствовали кривым Венца при состоянии моря 4 балла. ВСП был установлен на расстоянии 0,3 м от дна и соединен кабелем с аппаратурой регистрации сигналов. ВСП был ориентирован так, чтобы направление максимальной чувствительности датчика одной из его горизонтальных компонент было параллельно береговой линии, второй компоненты – перпендикулярно.

В выполнении эксперимента участвовал профессиональный легководолаз с более чем 20–летним опытом подводного плавания и водолазных работ под водой (сварочных, монтажных, аварийно–спасательных и др.) как с дыхательными аппаратами различных типов, так и на задержке дыхания. Легководолаз использовал следующее снаряжение: «мокрый» гидрокостюм, ласты, акваланг Aeris с регулятором давления Aeris ION AT600 и компенсатор плавучести (жилет) Aeris. Непосредственно перед проведением эксперимента легководолаз выполнил подготовительные упражнения: погружения – проходы под водой – всплытия для проверки снаряжения и своего самочувствия. Во время выполнения эксперимента легководолаз погрузился в воду, приблизился к ВСП и, скомпенсировав плавучесть, находился стоя на дне на расстоянии 2 м от него так, чтобы находиться в направлении максимума чувствительности ВП, ориентированного параллельно береговой линии. Затем он последовательно на 2 минуты (для регистрации шумов акватории) выполнил задержку дыхания, далее в течение 10 минут (с 20:33 до 20:43 местного времени) старался дышать в удобном для себя режиме, потом вновь на 2 минуты выполнил задержку дыхания. После выхода на берег он сообщил о симптомах недомогания, появившихся под водой: затрудненное и неравномерное дыхание, мышечная слабость. Симптомы были отнесены к последствиям перенесенной незадолго до эксперимента вирусной инфекции. После подъема из воды дыхание легководолаза нормализовалось, но общее недомогание продолжалось. При последующем обращении в медицинское учреждение, обследовании и долечивании его состояние здоровья и пригодность к выполнению погружений восстановились.

Методика и результаты эксперимента

ГА шумы, зарегистрированные в канале ПД ($y_1(t)$, и ВП $y_2(t)$, максимум характеристики направленности чувствительности которого был ориентирован на легководолаза, подвергались спектральной и статистической обработке. На рис. 1 показаны осциллограмма и спектрограмма шума $y_2(t)$, поступавшего во время эксперимента с выхода вышеуказанного ВП, масштабы уровней условные. На рис. 2 и 3 показаны фрагменты осциллограммы и спектрограммы рис. 1. Осциллограммы имеют вид суммы непрерывного случайного процесса (шумовой дорожки) и нестационарной последовательности импульсных помех, создаваемых щелчками ракообразных. Амплитуды некоторых из импульсных помех на порядок и более превышают среднее квадратическое значение шумовой дорожки. Разрешающая способность по частоте на всех спектрограммах составляет 2,5 Гц. Независимо от наличия или отсутствия шумов дыхания легководолаза на спектрограммах наблюдаются артефакты: максимум вблизи 2100 Гц, соответствующий резонансной частоте чувствительного элемента ВП, минимум (темная полоса) и максимум на частотах

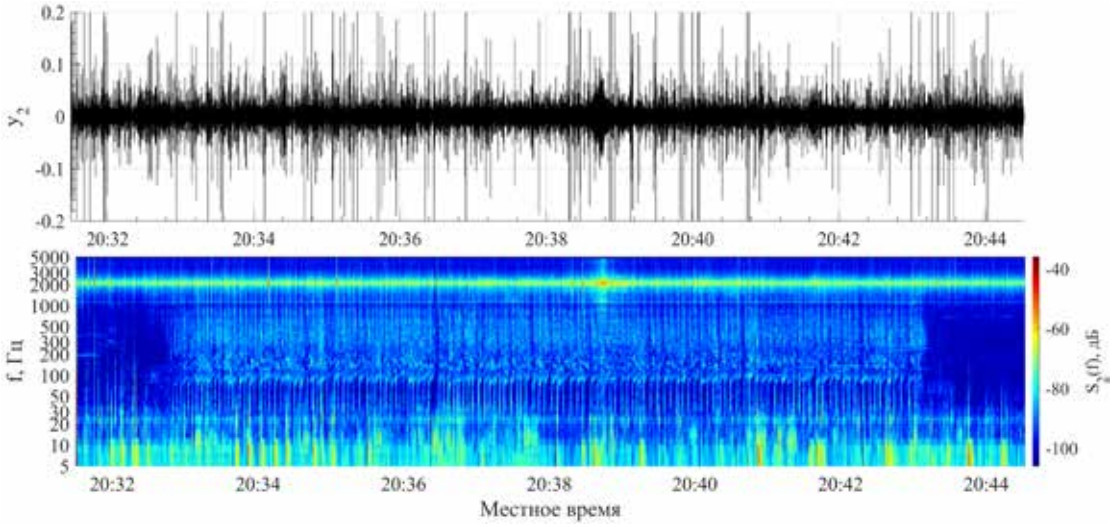


Рис. 1. Осциллограмма и спектрограмма шумов в канале ВП во время эксперимента

1060 Гц и 1130 Гц (антирезонанс и резонанс), и максимум вблизи 20 Гц, обусловленные резонансными свойствами конструктивных элементов системы крепления ВСП. Нерегулярные составляющие на частотах менее 20 Гц вызваны небольшими движениями легководолаза. Осциллограммы и спектрограммы шумов, поступавших с выхода ПД имеют подобный вид, но на них незаметны указанные артефакты.

На спектрограмме рис. 1, на интервале 20:33–20:43 явно видны составляющие, обусловленные дыхательными циклами легководолаза. Видно, что энергия шумов дыхания легководолаза с данным экземпляром акваланга, зарегистрированных на расстоянии 2 м от него, сосредоточена в области 15–1000 Гц.

На рис. 3 рамками красного и синего цвета выделены интервалы длительностью 1 с во время выдохов и вдохов легководолаза. Сигналы на данных интервалах использованы далее для оценивания усредненных спектральных характеристик и плотностей распределения вероятностей (ПРВ) мгновенных значений шумов дыхания легководолаза.

На рис. 4 красными и синими линиями показаны частотные зависимости модулей усредненных спектральных уровней шумов с ПД (график $P_{11}(f)$) и ВП (график $P_{22}(f)$) во время выдохов и вдохов, оцененные в полосах шириной 10 Гц на интервалах 1 с, выделенных рамками соответствующих цветов на рис. 3, масштабы уровней условные. Линиями черного цвета показаны усредненные по трем интервалам длительностью 1 с спектральные уровни в полосах шириной 10 Гц шумов с ПД и ВП, когда легководолаз выполнял задержку дыхания после 20:43 местного времени. Поскольку легководолаз не двигался, они соот-

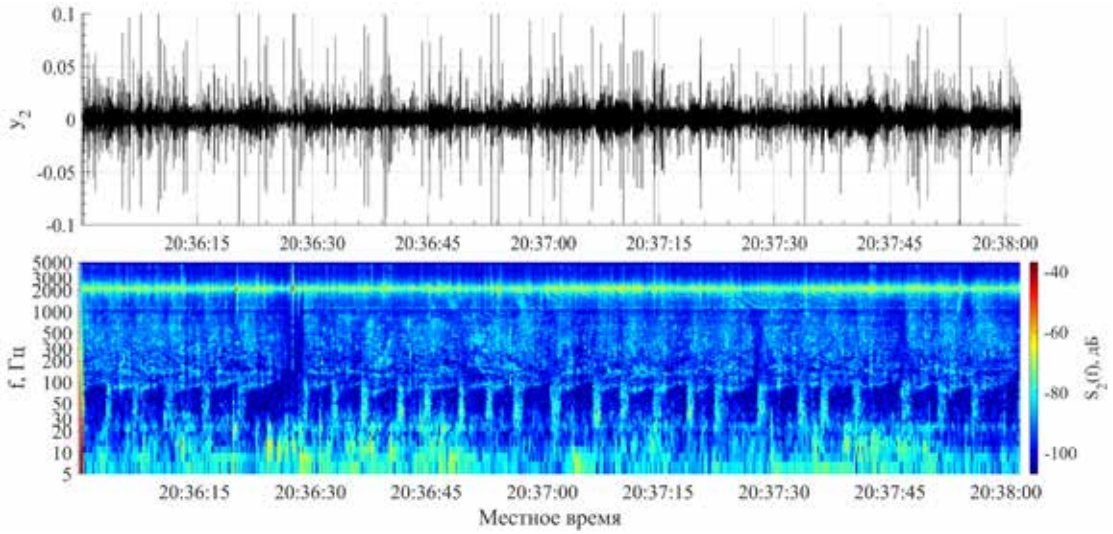


Рис. 2. Фрагменты длительностью 120 секунд из осциллограммы и спектрограммы рис. 1

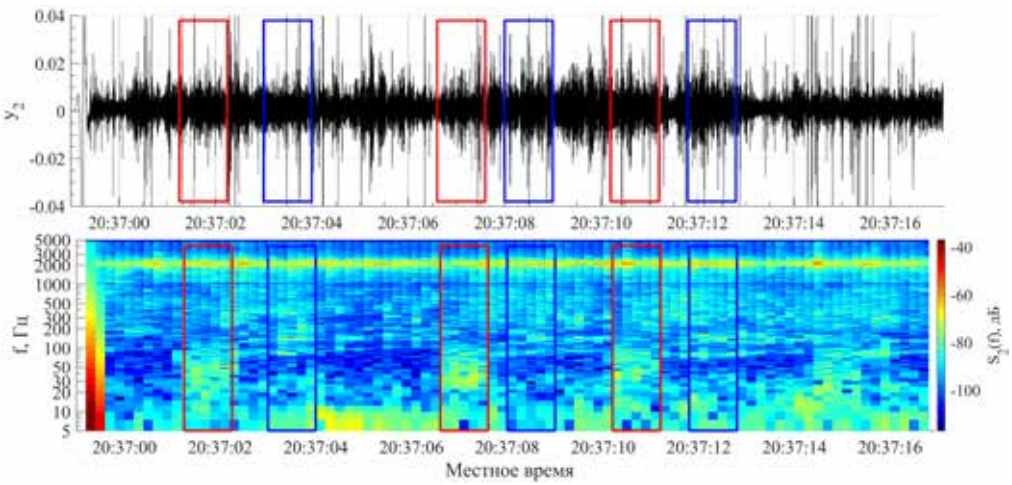


Рис. 3. Фрагменты длительностью 16 с из осциллограммы и спектрограммы рис. 2. Красными и синими рамками выделены односекундные интервалы во время выдохов и вдохов соответственно

ветствуют спектральным уровням шумов акватории. Приведенные на рис. 4 зависимости предназначены для использования в качестве оценок спектральных плотностей шумов легководолаза и акватории. Видно, что во время выдохов бóльшая часть энергии шума легководолаза была сосредоточена в полосе частот 15–600 Гц, в которой наблюдается один плавный экстремум в области 40–50 Гц. Во время вдохов бóльшая часть энергии шума легководолаза была сосредоточена в полосе 60–600 Гц, здесь наблюдаются два плавных экстремума: в области 80–90 Гц и в области 140–150 Гц.

На частотах 250–600 Гц как для шумов с ПД, так и для шумов с ВП спектральные уровни во время выдохов и вдохов практически совпадают, хотя превышение спектральных уровней шумов с ВП над шумами акватории на 2–3 дБ больше, чем для шумов с ПД. Указанное совпадение спектральных уровней свидетельствует о том, что шум легководолаза в данной области обусловлен в основном потоком всплывающих пузырей выдыхаемого воздуха. На частотах 600–1000 Гц спектральные уровни шумов с ПД во время выдохов и во время вдохов почти совпадают с уровнями шумов акватории, которые наблюдались во время эксперимента, тогда как для шумов с ВП они на 5–10 дБ превышают уровни шумов акватории. Это подтверждает преимущество применения ВП по сравнению с ПД в области частот 250–1000 Гц, где проявляется пространственная избирательность ВП.

На частотах ниже 20 Гц наблюдается обратная ситуация: в данном эксперименте применение ПД имеет преимущество перед ВП. Так, на частотах 10–

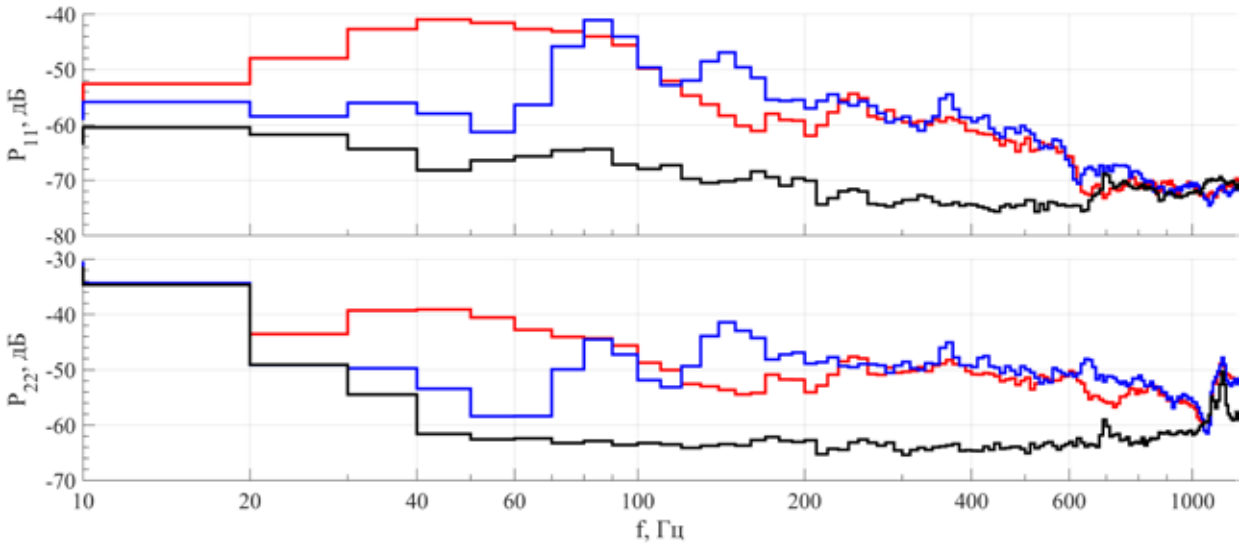


Рис. 4. Частотные зависимости модулей усредненных спектральных уровней шумов в каналах ПД (график P11) и ВП (график P22). Красными, синими и черными линиями показаны модули соответственно выдохов, вдохов и шумов акватории в полосах шириной 10 Гц

20 Гц спектральные уровни шумов с ВП и при выдохе и при вдохе становятся сравнимыми с уровнями шумов моря, тогда как спектральные уровни шумов с ПД превышают уровень шумов акватории на 8 и 6 дБ соответственно.

Весьма важным является вопрос о том, какой характеристике звукового поля (колебательная скорость, градиент давления, интенсивность и т.д.) в реальных условиях соответствуют электрические сигналы на выходе применяемого ВП в различных областях частот [9–11]. Известно, что если сигнал на выходе идеального ВП пропорционален градиенту звукового давления, то его амплитудно–частотная характеристика (АЧХ) чувствительности по звуковому давлению с повышением частоты имеет рост 20 дБ/декада, тогда как у идеального ненаправленного ПД она не зависит от частоты. Поэтому отношение модулей спектральных плотностей шумов с выходов имеющих общий фазовый центр ВП и ПД (или разность их логарифмов), при повышении частоты будет характеризоваться указанным наклоном 20 дБ/декада [9, 10].

На рис. 5 сплошными линиями красного, синего и черного цвета показаны разности P_{22}–P_{11} графиков, приведенных на рис. 4, для интервалов выдохов, вдохов, выделенных на рис. 3, и шумов акватории соответственно. Видно, что на частотах 150–400 Гц все линии практически совпадают, на частотах 60–1500 Гц, отклонения от наклона 20 дБ/декада не превышают 5–10 дБ, наибольшие по абсолютной величине отклонения наблюдаются для шумового фона. При увеличении времени накопления отклонения от указанного наклона уменьшаются. Это позволяет сделать вывод о том, что в диапазоне частот 60–1500 Гц данный ВП, с учетом использованной в эксперименте системы его крепления, следует рассматривать как приемник градиента звукового давления (ПГД) и использовать для описания его характеристик соотношения, приведенные в [10, 11].

Основные преимущества ВСП по сравнению с ПД при малых отношениях сигнал/помеха реализуются путем использования известных в статистической радиотехнике алгоритмов обработки сигналов, в которых объединяется информация, поступающая с ПД и ВП так, чтобы подлежащие приему или обнаружению сигналы складывались когерентно, а помехи – некогерентно [10–13]. Для решения вопроса о целесообразности сложения (в т.ч. взвешенного частотно–зависимого) когерентных составляющих шумов легководолазов, воспринимаемых ПД и ВП, необходимо иметь информацию о модулях и аргументах взаимных спектров, а также о функциях когерентности [12, 13] как для полезных сигналов (в данном случае шумов дыхания), так и для помех – шумов акватории.

На рис. 6, сверху вниз, показаны частотные зависимости модулей ($P_{12}(f)$) и аргументов ($arg_{12}(f)$) взаимных спектральных уровней, а также функции когерентности ($C_{12}(f)$) шумов на выходах ПД и ВП, усредненные по трем выделенным временным интервалам (на рис. 3), в полосах частот шириной 10 Гц. Красные, синие и черные линии соответствуют выдохам, вдохам и шумам акватории.

Видно, что положения на оси частот максимумов модулей взаимных спектров $P_{12}(f)$ соответствуют положениям максимумов модулей спектральных уровней $P_{11}(f)$ и $P_{22}(f)$, приведенных на рис. 4. На частотах 30–600 Гц их уровни на 20 дБ и более превышают уровни взаимного спектра шума акватории, а их аргументы ($arg_{12}(f)$) отличаются друг от друга в пределах 10°. Наибольшие значения функции когерентности шумов, воспринимаемых ПД и приемником градиента звукового давления (ВП) во время выдохов, наблюдались в областях 25–100 Гц и 350–600 Гц, а во время вдохов – в областях 80–250 Гц и 350–800 Гц.

Представленные оценки позволяют рассчитывать на увеличение дальностей наблюдения и мониторинга шумов легководолаза при использовании одиночного ВСП за счет объединения информации, поступающей от ПД и ВП (формирование, с учетом отличия от нуля аргумента взаимного спектра, кардиоидных характеристик направленности в частотных

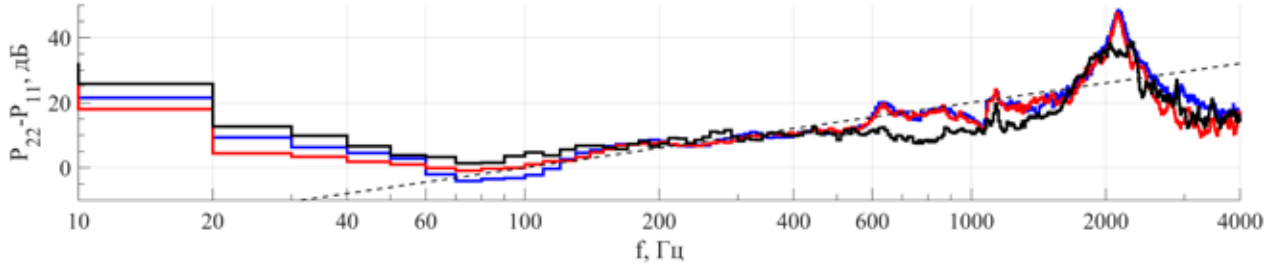


Рис. 5. Частотная характеристика разности P22–P11. Сплошные линии черного, красного и синего цвета – разности модулей усредненных спектральных уровней шумов моря, шумов выдохов и вдохов, на выходах ВП и ПД во время эксперимента. Пунктирная линия соответствует наклону 20 дБ/декада

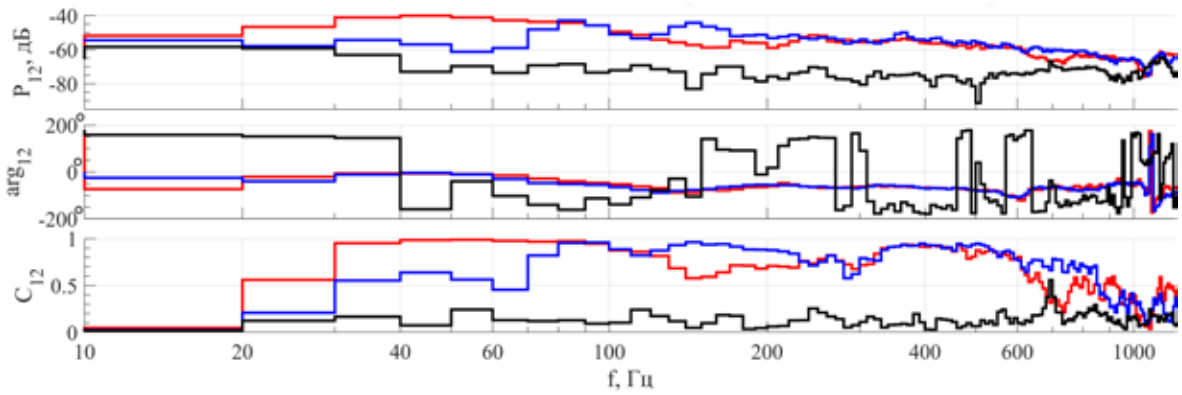


Рис. 6. Модули и аргументы взаимных спектральных уровней, функции когерентности (сверху вниз) шумов в каналах ПД и ВП. Красные, синие и черные линии соответствуют интервалам во время выдохов, вдохов и шумов моря

полосах, где наблюдается высокая когерентность, и др.) по сравнению с одиночным ПД.

Для определения физического состояния легководолаза во время нахождения под водой весьма важным является вопрос об оценивании в режиме реального времени характеристик его дыхания [2, 3, 13], и в первую очередь – частоты повторения и «интенсивности» дыхательных циклов (вдох–выдох). Как видно из спектрограмм, рис. 1–3, дыхательный ритм легководолаза наиболее заметен в полосе частот 40–90 Гц. На рис. 7, *а, б* показаны осциллограммы сигналов от ПД и ВП на выходах цифровых фильтров в этой полосе. Отдельные дыхательные циклы (выдох–вдох) определенно видны, заметны нерегулярность их следования и изменения уровней, обусловленные физическим состоянием легководолаза.

Для оценивания динамики характеристик дыхательного ритма легководолаза воспользуемся спектральным анализом огибающей его шумов [2, 3]. Выделение огибающих широкополосных процессов, таких как шумы легководолазов, может быть осуществлено различными способами, в том числе с помощью преобразования Гильберта [12]. В данном случае для выделения огибающей более предпочтительным является использование энергетического приемника, выполняющего последовательно операции полосовой фильтрации, квадратичного детектирования и скользящего интегрирования [2, 5]. Сколь-

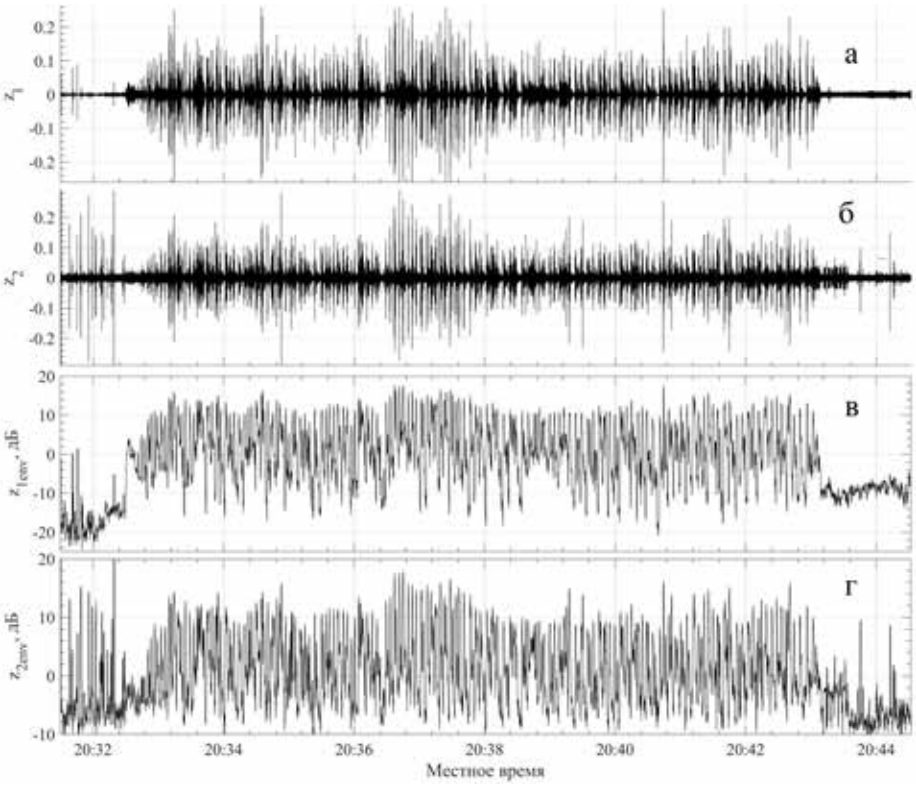


Рис. 7. Осциллограммы шумов (а, б) от ПД и ВП в полосе частот 40–90 Гц и их огибающих (в, г) при времени накопления 0.5 с

зящее интегрирование (суммирование при цифровой реализации) за время T с постоянными весами эквивалентно применению фильтра скользящего среднего, амплитудно–частотная характеристика которого описывается соотношением $H(f) = \sin(2\pi fT/2)/(2\pi fT/2)$. Если время интегрирования составляет 0.5 с, то первый нуль H(f) будет наблюдаться при f = 2 Гц, что достаточно в данном случае, так как частота дыхания легководолаза обычно не выходит за пределы 0,1–1 Гц (6–60 дыхательных циклов в минуту).

На рис. 7, *в, г* показаны осциллограммы огибающих шумов от ПД и ВП, полученные с помощью энергетических приемников в полосе частот 40–90 Гц при времени накопления 0,5 с. Видно, что превышение шумов легководолазов над шумами акватории (отношение сигнал/помеха) как для ПД, так и для ВП составляет более 20 дБ.

На рис. 8 показаны спектрограммы вышеуказанных огибающих. Для их построения использовалось не быстрое преобразование Фурье (БПФ), а способ, который применялся до появления алгоритмов БПФ для вычисления спектра мощности (этот способ используется также в устройствах обнаружения тональных сигналов с неизвестными амплитудами и начальными фазами на фоне помех): для получения оценки спектра мощности на частоте f исследуемый фрагмент сигнала длительности Tin умножается на функции $\sin(2\pi ft)$ и $\cos(2\pi ft)$, результаты умножения интегрируются на интервале длительностью Tin, затем возводятся в квадрат, суммируются и извлекается квадратный корень из суммы квадратов. В данном случае частота f изменялась от 0,06 до 2 Гц с шагом 0,005 Гц, длительности интервалов Tin были выбраны равными 20 с, чтобы охватить не менее трех дыхательных циклов, сдвиг по времени анализируемых интервалов составлял 1 с. Соответствующие частоте дыхания спектральные составляющие показаны стрелками. В данном случае частота дыхания легководолаза не оставалась постоянной, что характеризует опытных пловцов, а нерегулярно изменялась в основном от 0,2 до 0,3 Гц (интервалы между вдохами или выдохами составляли 3,3–5 с). Это свидетельствует о нарушении ритма дыхания, вызванного отклонениями в физическом состоянии легководолаза во время эксперимента, что подтвердилось после его выхода из воды.

Для построения алгоритмов, обеспечивающих увеличение дальности мониторинга легководолазов с помощью методов статистической радиотехники, необходимы модели плотностей распределения вероятностей (ПРВ) мгновенных значений принимаемых ПД и ВП шумов. Очень важным является оценивание возможности применения, в качестве таких моделей, гауссовского распределения вероятностей. На рис. 9 показаны усредненные по трем выделенным рамками на рис. 3 фрагментам шумов от ПД и ВП (во время выдохов и вдохов, а также шумов акватории) нормированные (когда математическое ожидание и дисперсия равны 0 и 1 соответственно) гистограммные оценки ПРВ мгновенных значений этих шумов от ПД (вверху) и ПГД (внизу) в полосе частот 40–90 Гц. Здесь (а) и (б) – гистограммы во время выдохов, (в) и (г) – гистограммы во время вдохов, (д) и (е) – гистограммы шумового фона. Красными пунктирными линиями показаны нормированные гауссовские кривые. Видно, что во всех случаях наблюдаются отличия от гауссовского распределения. Детальный анализ шумов легководолаза показал, что наблюдаемые отличия

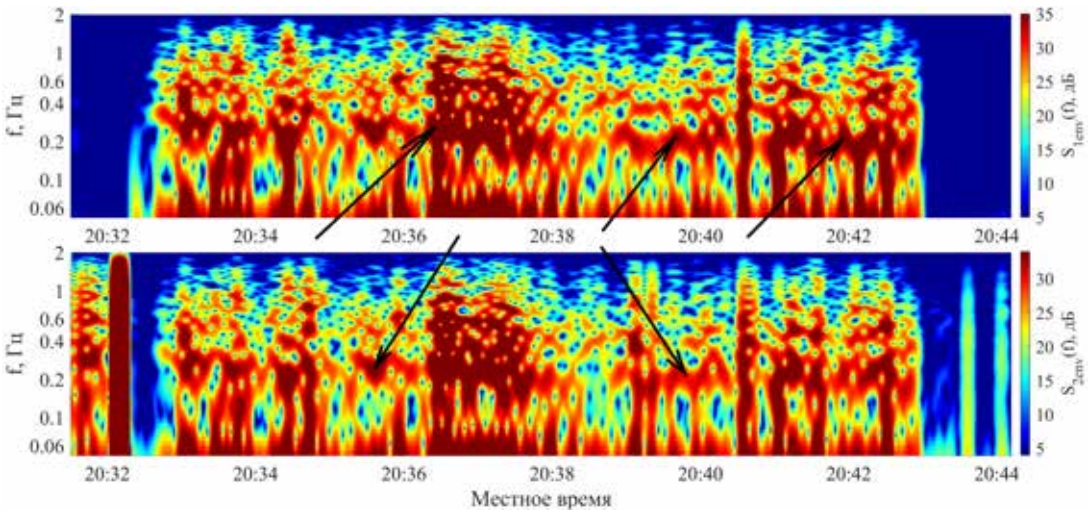


Рис. 8. Спектрограммы огибающих шумов ПД (вверху) и ВП (внизу). Соответствующие частоте дыхания спектральные составляющие показаны стрелками

ПРВ мгновенных значений от гауссовского закона во время выдохов и вдохов обусловлены сложной структурой шумов легководолаза. Отличия от гауссовского закона ПРВ мгновенных значений шумового фона акватории обусловлены импульсными помехами, создаваемыми морскими обитателями [16].

В качестве моделей плотностей распределения, пригодных (в том числе для формирования отношений правдоподобия) для выдохов, вдохов и шумов акватории удобно использовать суммы гауссовских распределений [15–17], имеющих вид:

$$w(y) = A\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1}e^{-\frac{y^2}{2\sigma_1^2}} + B\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2}e^{-\frac{y^2}{2\sigma_2^2}},$$

где σ_1 и σ_2 – средние квадратические отклонения, A и B – весовые коэффициенты. Процедура определения всех этих величин по экспериментальным данным описана в [15, 16].

На рис. 9, *а, б* сплошными линиями синего цвета показаны графики функции $w(y)$ для случаев, когда $\sigma_1 = 1$, $\sigma_2 = 0{,}5$, $A = 0{,}8$, $B = 0{,}2$ и $\sigma_1 = 1$, $\sigma_2 = 0{,}6$, $A = 0{,}225$, $B = 0{,}775$ соответственно. Данные функции пригодны для использования в качестве моделей ПРВ мгновенных значений сигналов с ПД и ВП в полосе частот 40–90 Гц во время выдохов легководолаза. Аналогично формируются модели и для других распределений, показанных на рис. 9. Вопрос о построении более точных моделей, обеспечивающих заданные значения уровней значимости, применительно к практическим задачам является спорным вследствие заметной на рис. 1–3 и 7 вариабельности шумов дыхания легководолаза.

Заключение

Регистрация ГА шумов легководолаза одиночным векторно-скалярным приемником позволяет получить в реальном времени дополнительный объем новой информации о спектральных и статистических характеристиках, что открывает возможность увеличения дальности наблюдения создаваемых аквалангистом шумов и мониторинга его физического состояния.

Во время пребывания под водой при выполнении описанного в работе эксперимента у профессионального легководолаза произошли изменения в физическом состоянии, что было обнаружено в процессе анализа шумов и ритма дыхания и стало основанием для дополнительного лечения последствий ранее перенесенного респираторного заболевания.

Основная часть энергии шумов легководолаза с дыхательным аппаратом Aeris, регистрируемых на расстоянии 2 м от него, сосредоточена в области частот 20–1000 Гц, при этом наблюдаются максимумы излучения: во время выдохов – в области 30–80 Гц, во время вдохов – в областях 60–80 Гц и 140–150 Гц.

Представленные оценки взаимных спектров и функций когерентности позволяют рассчитывать на увеличение дальностей наблюдения и мониторинга шумов легководолаза при использовании одиночного ВСП за счет объединения информации, поступающей от ПД и ВП, в сравнении с одиночным ПД.

Одномерные плотности распределения мгновенных значений шумов легководолаза не описываются гауссовским законом распределения как при выдо-

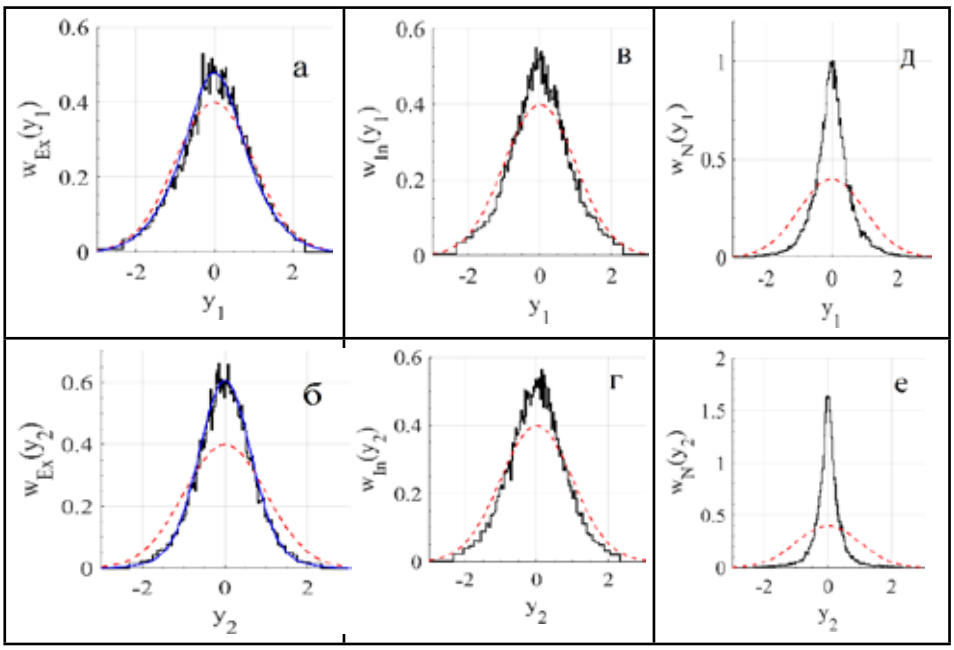


Рис. 9. Усредненные нормированные гистограммные оценки ПРВ мгновенных значений шумов от ПД (вверху) и ПГД (внизу): а) и б) – во время выдохов; в) и г) – во время вдохов; д) и е) – гистограммы шумового фона. Красные пунктирные линии – нормированные гауссовские кривые

хе, так и при вдохе. В качестве моделей одномерных плотностей распределений как во время выдохов, так и вдохов а также шумового фона акватории можно использовать взвешенные суммы двух гауссовских распределений с разными дисперсиями.

При условии известности закона спадания интенсивности создаваемого легководолазом звукового поля при удалении от него, знание приведенных в данной работе величин (оценок спектральных плотностей шумов акватории, шумов легководолаза во время выдохов и вдохов, отношения сигнал/помеха и функций когерентности) позволяет определить максимальные дистанции, на которых может осуществляться его наблюдение и мониторинг.

Методика эксперимента, примененные ВСП и ПД, а также измерительное оборудование и программные продукты могут быть использованы для регистрации и анализа шумов других типов дыхательных аппаратов, а также выявления индивидуальных особенностей дыхания под водой.

Работа выполнена в рамках НИР ТОИ ДВО РАН «Разработка методологии исследования сложных акустических систем и сред» (регистрационный номер: 124022100075-6).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Buzzacott P. Mortality rate during professionally guided scuba diving experiences for uncertified divers, 1992–2019 // Diving and Hyperbaric Medicine. 2021. June. 30. 51(2). P. 147–151.

2. Коренбаум В.И., Горовой С.В., Тагильцев А.А., и др. Возможность пассивного акустического мониторинга легководолазов // Доклады академии наук. 2016. Т. 466, № 5. С. 1–5.

3. Коренбаум В.И., Бородин А.Е., Горовой С.В. и др. Экспериментальное исследование биологических шумов водолазов. Фундаментальная наука – Военно-Морскому Флоту. Том 2. Материалы круглого стола в рамках VII Международного военно-морского салона. 1 июля 2015 г. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. С. 92–98.

4. Korenbaum V.I., GorovoyS.V., Kostiv A.E. и др. An attempt at hydroacoustic localization of an open-circuit scuba diver //The Journal of the Acoustical Society of America. 2019, 146(6), pp. 4507–4513.

5. Gemba K., Nosal E. Source signature characterization for detection of open–circuit SCUBA regulators // Proceeding of Meeting on Acoustics. 2013. Vol. 19.

6. Erbe C., Parson V., Duncan A., и др. Underwater acoustic signature of recreational swimmers, divers, surfers and kayakers // Acoustics Australia. 2016. Vol. 44(2). P. 333–341.

7. Gorovoy S., Korenbaum V., Borodin A. и др. Detecting respiratory noises of diver equipped with rebreather in water // Proceedings of Meetings on Acoustics. 2015 24(1), 070020.

8. Rebreather FROGS 18. URL: https://milproaqualung.com/products/frogs-18?variant=45006669938871. Проверено 24.03.2026.

9. Горовой С.В. Сравнительный анализ характеристик сигналов, зарегистрированных с использованием векторного приемника и гидрофона давления на мелководье // Сборник трудов XXXVI сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2024. С. 77 – 83.

10. Гордиенко В.А. Векторно–фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.

11. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., и др. Акустика мелкого моря в скалярно–векторном описании: теория и эксперимент. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2019. 360 с.

12. Дзюба В.П. Скалярно–векторные методы теоретической акустики. Владивосток: Дальнаука, 2006. 195 с.

13. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.

14. Бреслав И.С. Паттерны дыхания: Физиология, экстремальные состояния, патология. Л.: Наука, 1984. 206 с.

15. Bouvet M., Schwartz S.C. Underwater noises: Statistical modeling, detection, and normalization // The Journal of the Acoustical Society of America. 1988. Vol. 83, no. 3. P. 1023–1033.

16. Bond J.W., Stein D., Zeidler J. Gaussian Mixture Models for Acoustic Interference // Technical Report 1667 AD–A285 950 DTIC, 1994.

17. Горовой С.В. Статистические модели гидроакустического шумового фона мелководных прибрежных акваторий // Сборник трудов XXXVIII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2026. С. 131–137.

Сведения об авторах

ГОРОВОЙ Сергей Владимирович, доцент департамента электроники, инфокоммуникаций и приборостроения
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»
Адрес: 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, гидроакустические измерения, векторно–скалярные приемники
E-mail: GorovoySV@mail.ru. **Тел.**: +7914-721-21-86.
ORCID: 0000-0003-1370-953X

ТАГИЛЬЦЕВ Александр Анатольевич, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией океанотехники
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: гидроакустические антенны и преобразователи, гидроакустические измерения
E-mail: atagiltsev@poi.dvo.ru
Тел.: +7 (423) 231-14-00. **ORCID**: 0000-0001-9207-4418

СИРЕНКО Владимир Григорьевич, магистрант департамента электроники, инфокоммуникаций и приборостроения
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»
Адрес: 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
Область научных интересов: водолазные работы, гидроакустические измерения, исследование морских млекопитающих
E-mail: vlad_sir2019.gmail.com. **Тел.**: +7914-655-88-64

DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_10

USING A VECTOR–SCALAR SENSOR TO STUDY THE CHARACTERISTICS OF UNDERWATER NOISE OF A SCUBA DIVER

S.V. Gorovoy, A.A. Tagiltsev, V.G. Sirenko

The results of an experimental study in the frequency band 10-4000 Hz of spectral densities, coherence functions, and one-dimensional probability distribution densities of instantaneous sound pressure values and the horizontal component of the sound pressure gradient of underwater noise from a scuba diver equipped with Aeris scuba gear (USA) motionless at the bottom are presented. The noises were recorded in the coastal water area at a distance of 2 m from the source. During the experiment, man-made interference caused by the movement of ships, as well as pulse interference caused by marine crustaceans, was observed. It is shown that the main part of the noise energy generated by the breathing of a scuba diver is concentrated in the range of 15-1000 Hz. The highest values of the coherence function of the signals perceived by the sound pressure receiver and the sound pressure gradient receiver during exhalation were observed in the regions of 25-100 Hz and 350-600 Hz, during inspiration – in the regions of 80-250 Hz and 350-800 Hz. It is proposed to use the sums of Gaussian distributions as models of the distribution densities of the instantaneous values of the recorded noises. Recommendations on possible practical applications of the research results are given.

Keywords: hydroacoustic noise of shallow sea, vector–scalar sensor, underwater noise from a scuba diver.

References

1. Buzzacott P. Mortality rate during professionally guided scuba diving experiences for certified divers, 1992-2019 // Diving and Hyperbaric Medicine. 2021.– June. 30. 51(2). P. 147-151.

2. Korenbaum V.I., Gorovoy S.V., Tagiltsev A.A., et al. The possibility of passive acoustic monitoring of light divers // Reports of the Academy of Sciences. 2016. Vol. 466. No. 5. P. 1-5.

3. Korenbaum V.I., Borodin A.E., Gorovoy S.V., and others. Experimental study of biological noise of divers. Fundamental science is devoted to the Navy. Volume 2. Materials of the round table in the framework of the VII International Naval Salon. July 1, 2015, Moscow: TECHNOSPHERE, 2016. P. 92-98.

4. Korenbaum V.I., GorovoyS.V., Kostiv A.E., et al. An attempt at hydroacoustic localization of an open-circuit scuba diver //The Journal of the Acoustical Society of America. 2019, 146(6), P. 4507–4513.

5. Gemba K., Nosal E. Source signature characterization for detection of open–circuit SCUBA regulators // Proceeding of Meeting on Acoustics. 2013. V. 19.

6. Erbe C., Parson V., Duncan A., et al. Underwater acoustic signature of recreational swimmers, divers, surfers and kayakers // Acoustics Australia. 2016. Vol. 44(2). P. 333-341.

7. Gorovoy S., Korenbaum V., Borodin A. et al. Detecting respiratory noises of diver equipped with rebreather in water // Proceedings of Meetings on Acoustics. 2015 24(1), 070020.

8. Rebreather FROGS 18 [Electronic resource] https://milproaqualung.com/products/frogs-18 ?variant=45006669938871. Verified on 03/24/2026.

9. Gorovoy S.V. Comparative analysis of the characteristics of signals recorded using a vector receiver and a pressure hydrophone in shallow water // Proceedings of the XXXVI session of the Russian Acoustic Society. Moscow: GEOS, 2024. P. 77-83.

10. Gordienko V.A. Vector–phase methods in acoustics. Moscow: Fizmatlit, 2007. 480 p.

11. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B., and others. Shallow sea acoustics in a scalar–vector description: theory and experiment. Vladivostok: IPMT FEBRAS, 2019. 360 p.

12. Dzyuba V.P. Scalar vector methods of theoretical acoustics. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2006. 195 p.

13. Bendat J., Pirsol A. Applied analysis of random data. Moscow: Mir, 1989. 540 p.

14. Breslav I.S. Patterns of respiration: Physiology, extreme conditions, pathology. L.: Nauka, 1984. 206 p.

15. Bouvet M., Schwartz S.C. Underwater noises: Statistical modeling, detection, and normalization // The Journal of the Acoustic Society of America. 1988. Vol. 83. No. 3. P. 1023-1033.

16. Bond J.W., Stein D., Zeidler J. Gaussian Mixture Models for Acoustic Interference // Technical Report 1667 AD–A285 950 DTIC, 1994.

17. Gorovoy S.V. Statistical models of the hydroacoustic noise background of shallow coastal waters // Proceedings of the XXXVIII session of the Russian Acoustic Society. Moscow: GEOS.– 2026. 131-137.

Information about the authors

GOROVOY Sergey Vladimirovich, associate Professor of the Department of Electronics, Infocommunications and Instrumentation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Far Eastern Federal University"
Adress: FEFU Campus 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922 Russia
V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences
Adress: 690041, Vladivostok, st. Baltic, 43
Research interests: digital signal processing, sonar measurements, vector–scalar sensors
Phone: +7914-721-21-86
E-mail: GorovoySV@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1370-953X

Tagiltsev Alexander Anatolyevich, Ph.D., associate professor, head of Laboratory for Ocean Research Equipment Development
V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences
Adress: 690041, Vladivostok, st. Baltic, 43
Research interests: hydroacoustic antennas and transducers, acoustic measurements
Phone: +7 (423) 231-18-50
E-mail: atagiltsev@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0001-9207-4418

SIRENKO Vladimir Grigorievich, Master's student in the Department of Electronics, Infocommunications and Instrumentation.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Far Eastern Federal University"
Adress: FEFU Campus10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922 Russia
Research interests: diving, sonar measurements, marine mammal research
Phone: +7914-655-88-64
E-mail: vlad_sir2019@gmail.com

Recommended citation:

Gorovoy S.V., Tagiltsev A.A., Sirenko V.G. USING A VECTOR–SCALAR SENSOR TO STUDY THE CHARACTERISTICS OF UNDERWATER NOISE OF A SCUBA DIVER. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2026. No. 3 (57). C. 84–94. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_10. EDN: OAWTIK.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал «Подводные исследования и робототехника» публикует научно-технические статьи, проблемные, обзорные, дискуссионные материалы по всем направлениям, относящимся к методам и техническим средствам исследования и освоения океана, включая подводные робототехнические комплексы, их системы, технологии и применения, методы и средства мониторинга подводной среды и морского дна, экологию, морские экспедиции, подводные поисковые работы, глубоководные испытания и технические эксперименты. Все материалы в журнал направляются по адресу:

690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а, ИПМТ ДВО РАН,
редакция журнала, тел./факс (423) 2-432-416,
e-mail: imtp-journal@yandex.ru, imtp@marine.febras.ru

При подготовке материалов, направляемых в журнал, необходимо руководствоваться следующими правилами.

ТЕКСТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СТАТЬИ

Рукописи представляются в электронном виде с доставкой электронной почтой или на физическом носителе. К рукописи прилагаются экспертное/экспортное заключение о возможности опубликования в открытой печати и полные контактные данные авторов (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, телефон, адрес электронной почты). В рукописи должны быть следующие сведения: УДК, название статьи, авторы, организация, реферат, ключевые слова (все, кроме УДК, на двух языках). Текст выполняется в редакторе Microsoft Word шрифтом Times New Roman 11 кегля с одинарным межстрочным интервалом. Весь графический, иллюстративный материал (рисунки, фотографии и др.) представляется отдельными файлами с использованием стандартных графических форматов в цветном или черно-белом виде. Все иллюстрации должны сопровождаться соответствующими подписями и обозначениями, поясняющими их суть, детали и привязку к тексту статьи. Для формул могут быть использованы два формата: Microsoft Equation, формулы со сложными символьными выражениями – в редакторе MathType. С учетом особенностей журнального формата следует избегать чрезмерно длинных математических выражений и громоздких схем, графиков, таблиц и других аналогичных иллюстраций. Цитируемая литература приводится в порядке ссылки на нее в тексте и оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.7-2021. Объем рукописи не должен превышать, как правило, 12 стр. текста. В отдельных случаях редакция допускает увеличение объема до 15 стр. Редакция рекомендует сопровождать текст заголовками и подзаголовками, отражающими отдельные положения статьи.

Плата за опубликование статей не взимается.

Подробную информацию по оформлению рукописей смотрите на сайте журнала «Подводные исследования и робототехника»: http://imtp-journal.ru