

4 Hz | 86 Hz | 170 Hz | 340 Hz | 679 Hz | 1.3 kHz | 2.6 kHz | 5.1 kHz | 10.1 kHz | 20 kHz

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101 ISSN 2073-7173 (print)
1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010 ISSN 2588-0233 (on line)
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101
1101110011001010111100101010100101001101001110001011001010011001010111100101011100101101001010
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



ULRICH'S
KNOWLEDGEBASE



№ 4 Том 3 2023
№ 4 Part 3 2023

Morskie intelektual'nye tehnologii



Труды конференции

Перспективы развития роботизированных комплексов (систем) морского базирования



ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 часть 3 2023 Сквозной номер 62

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

На страницах журнала публикуются **новые** научные разработки, результаты исследований, методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления (в названии журнала заявлено «морские», т. е. все статьи, в том числе и с интеллектуальной компонентой, должны так или иначе относиться к кораблестроению или, по крайней мере, к исследованиям по морской тематике, что должно быть отражено в статье, аннотации, названии).

Год основания – 2008. Периодичность издания - 4 номера в год. Форма выпуска: печатный, электронный. Язык текстов: русский, английский. Язык метаданных: русский, английский. Статьям присваивается уникальный идентификатор DOI.

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в международную реферативную базу данных Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase.

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов». Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 год и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте журнала <http://morintex.ru> в открытом доступе. Стоимость публикации 16500 рублей. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в научной электронной библиотеке E-library, в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase. Для аспирантов публикации бесплатно, если аспирант единственный автор.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал распространяется посредством подписки и в редакции, а также на выставках, конференциях и симпозиумах.

Рубрики журнала

(соответствуют специальностям научных работников номенклатуры ВАК 2022)

- 2.5.18 Проектирование и конструкция судов;
- 2.5.17 Теория корабля и строительная механика;
- 2.5.19 Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства;
- 2.5.20 Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные);
- 2.2.11 Информационно-измерительные и управляющие системы;
- 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации;
- 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;
- 2.3.7 Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;
- 1.2.2 Математическое моделирование и численные методы.

Рукописи и документы к статье представляются в редакцию в электронном виде (e-mail: mit-journal@mail.ru)

Учредитель-издатель: Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»).

Свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008, Эл № ФС72-33245 от 19.09.2008 выданы Роскомнадзором.

Член Ассоциации научных редакторов и издателей.
Адрес: 190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3.
Тел./факс +7 (812) 513-04-51, бесплатный звонок по России 8 800 201 3897,
e-mail: mit-journal@mail.ru

Ответственность за содержание информационных и рекламных материалов, а также за использование сведений, не подлежащих публикации в открытой печати, несут авторы и рекламодатели.

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

Мнение редакционного совета и членов редколлегии может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций.

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ». Редакционная деятельность научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» опирается, в частности, на рекомендации Комитета по этике научных публикаций, а также на ценный опыт авторитетных международных журналов и издательств.

<http://morintex.ru/ru/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ».

Тираж 100 экз.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2023



ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 part 3 2023 www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

New scientific developments, research results, methods, procedures and technologies in the area of ship building, information science, computer engineering and control are published in the magazine.

The journal is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of theses for application of science-degrees of Doctor and Candidate of Science shall be published and in the international abstract Web of Science database (Emerging Sources Citation Index ESCI), Ulrich's Knowledgebase.

Frequency of publication - 4 issues per year.

In the journal the articles shall be reviewed by leading specialists in the field of the article.

The journal is intended for a wide range of scientists and specialists, as well as heads of scientific research and design organizations, industry, educational institutions, navy, as well as teachers, postgraduate students and students of higher educational institutions.

The journal is circulated in Russia and abroad by subscription in Interregional Subscription Agency and in editorial office, as well as in exhibitions, conferences and symposiums.

Journal headings:

- Design and Construction of Ships,
- Theory of Ship and Structural Mechanics,
- Technology of Ship Building. Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production,
- Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary),
- System Analysis, Information Management and Processing,
- Information-Measuring and Control Systems,
- Automation and Control of Processes and Productions,
- Computer Modeling and Design Automation,
- Mathematical Modelling, Numerical Procedures.

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index u and into international abstract database Web of Science (Emerging Sources Citation Index (ESCI)).

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (E-mail: mit-journal@mail.ru)

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies".

Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС72-33245 of 19.09.2008 issued by Roskomnadzor.

Member of Association of science editors and publishers.

Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation

Phone/fax +7 (812) 513-04-51

e-mail: mit-journal@mail.ru

The journal is included into the list of periodicals recommended for publishing doctoral research results <http://vak.ed.gov.ru>

Printed in the Printing-House of Research Centre "Marine Intelligent Technologies". Circulation of 100 copies.

Authors and advertisers are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press. Reprinting is allowed only with permission of the editorial office.

Opinion of editorial staff and editorial board may not coincide with those of the authors of publications

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

EDITORIAL BOARD of the Scientific Journal «Marine Intellectual Technologies» bases its work, in particular, on the guidelines of the Committee of Publication Ethics, as well as on the practices of influential international journals and publishers.

<http://morintex.ru/en/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2023



ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург
А.И. Фрумен, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

С.Н. Рюмин, к.т.н, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Члены Редколлегии

В.Г. Бугаев, д.т.н., профессор, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Е. П. Бураковский, д.т.н., профессор, филиал

Военно-морской академии, Калининград

Ю.А. Власов, к.ф.-м.н., преподаватель, Флоридский Международный Университет, Майами, США

М.В. Войлошников, д.т.н., профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток

В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация, Санкт-Петербург

И.И. Костылев, д.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург

В.В. Родионов, к.т.н, Си Проект, Санкт-Петербург

В.Ю. Семенова, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский морской государственный университет, Санкт-Петербург

Н.А Тарануха, д.т.н., профессор, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре

Ю.С. Федосенко, д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород

Редакционный Совет

Председатель

Г.А. Туричин, д.т.н., Ректор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

Члены Совета

Е.М. Апполонов, д.т.н. генеральный директор, "ЦКБ "Лазурит", Нижний Новгород

И.Г. Малыгин, д.т.н., профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург

Г.Н. Муру, к.т.н., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта, Санкт-Петербург

С.А. Огай, д.т.н., Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток

Одд М. Фалтинсен, профессор, Норвежский университет науки и технологии, Норвегия

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

В.Н. Половинкин, д.т.н., профессор, научный руководитель предприятия, Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург

К.В. Рождественский, д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург



ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

N.V. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor

Editorial Staff Deputy Chief Editors

D.A. Skorokhodov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Solomenko Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

A.I. Frumen, PhD (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

S.N. Ryumin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Members of Editorial Staff

V.G. Bugaev, Dr.Sci.(Eng), Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Burakovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, branch of Naval Academy, Kaliningrad, Russia

Yu.A. Vlasov, PhD (Phys & Math), Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA

M.V. Voyloshnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

I.I. Kostylev, professor, Dr.Sci. (Eng), Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation

V.V. Rodionov, PhD (Eng.), Senior Research Scientist, Sea Project, St. Petersburg, Russia

V.Yu. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

N.A. Taranukha, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Yu.S. Fedosenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia.

Editorial Board chairmen

G.A. Turichin, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Council Members

E.M. Appolonov, Dr. Sci. (Eng.), General Director, Lazurit Central Design Bureau JSC, Nizhny Novgorod, Russia

I.G. Malygin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, CEO, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

G.N. Muru, Cand. Sci. (Eng), CEO, 51 CCIS, St. Petersburg, Russia

S.A. Ogai, Doctor of Engineering, Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

Odd M. Faltinsen, Professor, Norwegian University of Science and Technology, Norway

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

V.N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Science principal, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

K.V. Rozhdestvenskij, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
ВЫРАЖАЕТ ИСКРЕННЮЮ БЛАГОДАРНОСТЬ
РЕЦЕНЗЕНТАМ ЭТОГО НОМЕРА:**

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Николай Васильевич Никитин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Елена Борисовна Амбросовская**, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” В.И.Ульянова (Ленина)
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, профессор Дагестанский государственный технический университет
- **Сергей Николаевич Павликов**, кандидат технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Юрий Марсович Искандеров**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской Академии Наук
- **Борис Иванович Руднев**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
- **Виктория Юрьевна Семенова**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Валентинович Чехранов**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
- **Борис Аркадьевич Скороход**, доктор технических наук, профессор, Севастопольский государственный университет
- **Виктор Леонидович Мартынов**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Глеб Гендрихович Рогозинский**, доктор технических наук, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Евгений Петрович Бураковский**, доктор технических наук, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде
- **Вячеслав Вячеславович Кожемякин**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Андрей Вартазарович Дологлонян**, кандидат технических наук, Институт природно-технических систем Российской Федерации
- **Александр Львович Кузнецов**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
- **Алина Игоревна Самосюк**, кандидат технических наук, доцент, Волжский государственный университет водного транспорта

- **Илья Евгеньевич Кажекин**, кандидат технических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет
- **Сергей Алексеевич Огай**, доктор технических наук, доцент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Евгений Петрович Бураковский**, доктор технических наук, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде
- **Юрий Николаевич Уртминцев**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Олег Николаевич Петров**, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Андреевич Иванченко** доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Сергей Николаевич Хрунков**, доктор технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
- **Александр Викторович Кириченко**, доктор технических наук, профессор, ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
- **Сергей Николаевич Рюмин**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL
EXPRESSES SINCERE GRATITUDE
TO THE REVIEWERS OF THIS ISSUE:**

- **Dmitriy A. Skorohodov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Alexander A. Rodionov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Aleksandr I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Nikolai V. Nikitin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Elena B. Ambrosovskaya**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI)
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), professor, Dagestan State Technical University
- **Sergej N. Pavlikov**, Ph.D. (Eng), professor, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University
- **Yury M. Iskanderov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
- **Boris I. Rudnev**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Far Eastern State Technical Fisheries University
- **Viktoriya Yu. Semenova**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Sergei V. Chekhranov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Far Eastern State Technical Fisheries University
- **Boris A. Skorohod**, Dr. Sci. (Eng), professor, Sevastopol State University
- **Victor L. Martynov**, Dr.Sci.(Eng), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Gennadiy P. Kicha**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
- **Gleb G. Rogozinski**, Dr. Sci. (Eng.), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Evgeny P. Burakovskiy**, Dr. Sci. (Eng), Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad)
- **Vyacheslav V. Kozhemyakin**, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, State marine technical university of St. Petersburg
- **Andrey V. Dologlonyan**, Ph.D. (Eng), Institute of nature and technical systems
- **Aleksandr L. Kuznetsov**, Dr. Sci. (Eng), Professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Alina I. Samosyuk**, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Volga state university of water transport
- **Ilya E. Kazhekin**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Kaliningrad State Technical University
- **Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Evgeny P. Burakovskiy**, Dr. Sci. (Eng), Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad)
- **Yuri N. Urtmintsev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Volga State University of Water Transport

- **Alexander A. Tarantsev**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexandr A. Ivanchenko**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Sergey N. Khrunkov**, Dr.Sci. (Eng), Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
- **Aleksandr V. Kirichenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Sergey N. Ryumin**, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, St. Petersburg State Marine Technical University



Труды конференции
Перспективы развития
роботизированных комплексов
(систем) морского базирования

СОДЕРЖАНИЕ	стр.
Памяти А.И. Гайковича.....	12
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Городников О.А., Охоткина В.Э., Мельник А.П. Определение параметров совместного использования подводного аппарата и судовых насосов для нанесения сорбента.....	15
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ	
Зуев А.В., Филаретов В.Ф., Жирабок А.Н., Проценко А.А. Метод синтеза адаптивных систем для устранения последствий изменения параметров и дефектов в движителях подводных роботов.....	22
Немиро И.Е., Губанков А.С. Сравнительное исследование методов оценки вектора состояния движущихся объектов.....	32
Юхимец Д.А., Губанков А.С., Филаретов В.Ф. Разработка адаптивной навигационной системы для автономного подводного аппарата на основе данных, получаемых от гидроакустической станции.....	42
Юхимец Д.А. Разработка метода управления большими группами АНПА на основе визуальной информации.....	53
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
Бельченко Ф.М., Ермолов И.Л., Нагайцев Г.Н., Остриков П.П. Об особенностях передачи видеоизображений в подводной робототехнике.....	62
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	
Ермолов И.Л., Князьков М.М., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Моделирование перемещения мобильного робототехнического комплекса для проведения регламентных операций по диагностике внешних поверхностей объектов морского базирования.....	68
Артемьев А.В., Яковенко Е.А., Оськин Д.А. Разработка алгоритма и программы для моделирования расхождения автономных судов.....	76
Сиваков Н.С., Усанов В.А. Моделирование воздействия морского течения на мобильный робототехнический комплекс вблизи опорной поверхности.....	86
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ	
Зарубин Н.А., Шамаев А.С. Исследование модели взаимодействия ветровых волн с морским течением.....	93
Пятакович В.А., Пурденко А.П., Рычкова В.Ф. Критерии аппроксимации выборок нейромоделями в интеллектуальных системах классификации морских целей.....	99
Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Показатели эффективности для оптимизации процесса построения нейромоделей систем классификации морских целей.....	105
Родионов А.Ю., Кирьянов А.В., Кулик С.Ю., Михайленко О.С. Применение новых бинарных кодов для передачи данных в гидроакустических системах связи.....	112

CONTENTS	page
To memory of Aleksandr Gaikovich	12
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Oleg. A. Gorodnikov, Viktoria E. Okhotkina, Anna P. Melnik Determination of parameters for the combined use of a underwater vehicle and ship pumps for application of sorbent.....	15
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS	
Alexander V. Zuev, Vladimir. F. Filaretov, Alexey N. Zhirabok, Alexander A. Protsenko Synthesis method of adaptive systems to eliminate the consequences of changes in parameters and faults in the thrusters of underwater robots	22
Irina E. Nemiro, Anton S. Gubankov, Studies of state vector estimation methods for dynamic objects.....	32
Dmitry A. Yukhimets, Anton S. Gubankov, Vladimir F. Filaretov A navigation method for autonomous underwater vehicles based on data received from a hydroacoustic station.....	42
Dmitry A. Yukhimets Development of formation control of AUV group on the base of visual information...	53
SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING	
Filipp M. Belchenko, Ivan L. Ermolov, Georgij N. Nagajcev, Pavel P. Ostrikov Specifics of underwater images transmission in marine robotics.....	62
COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION	
Ivan L. Ermolov, Maxim M. Knyazkov, Evgeniy A. Semenov, Artem N. Sukhanov. Simulation of the movement of a mobile robotic complex for routine operations to diagnose the external surfaces of sea-based facilities.....	68
Andrei V. Artemiev, Elena A. Yakovenko, Dmitry A. Oskin Development algorithm and program for modeling the divergence of autonomous ships.....	76
Nikita S. Sivakov, Vladislav A. Usanov Modeling the effect of sea currents on a mobile robotic complex near a bearing surface.....	86
MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES	
Nikolay A. Zarubin, Alexey S. Shamaev Investigation of the model of interaction of wind waves with the sea current.....	93
Valeriy A. Pyatakovich, Alexander P. Purdenko, Victoria F. Rychkova Criteria for approximating samples by neural models in intelligent systems for classifying marine targets.....	99
Valeriy A. Pyatakovich, Anna M. Vasilenko, Victoria F. Rychkova Performance indicators for optimizing the process of constructing neural models of naval target classification systems.....	105
Alexander Yu. Rodionov, Alexei V. Kiryanov, Sergei Yu. Kulik, Oleg S. Mikhailenko Application of new binary codes for data transmission in hydroacoustic communication systems.....	112

ГАЙКОВИЧ
Александр Иосифович
01.06.1949 – 11.11.2023



На 75-м году ушёл из жизни Александр Иосифович Гайкович – профессор кафедры Проектирования судов Санкт-Петербургского Государственного Морского Технического Университета, доктор технических наук, профессор, действительный член Академии Военных Наук, Лауреат премии Ленинградского комсомола, Почетный работник высшего профессионального образования, генеральный директор Научно-исследовательского центра «Морские интеллектуальные технологии», заместитель главного редактора научного журнала «Морские интеллектуальные технологии».

Более 50-ти лет своей жизни, Александр Иосифович, закончив с отличием в 1972 году Морской Технический Университет (ЛКИ) и пройдя аспирантуру, бесменно посвятил педагогической деятельности на кафедре проектирования судов, прошагав все ступени роста, защитив сначала кандидатскую (1977 г.), а затем и докторскую (в 1991 г) диссертации, подготовил и читал дисциплины «Методы оптимизации при проектировании судов», «Проектирование судов»,

«Проектирование боевых кораблей», «Теория проектирования сложных систем», «Основы систем автоматизированного проектирования судов», «Теория принятия решений», «Научно-техническое прогнозирование», «История судостроения». С 1997 года по 2018 Александр Иосифович по совместительству был профессором в Военно-морском инженерном институте (ВВМИУ им. Ф.Э. Дзержинского).

Имя Александра Иосифовича, как авторитетного Ученого в области судостроения и кораблестроения, широко известно в профессиональных кругах России. Долгие годы Александр Иосифович являлся Ученым секретарем специализированного совета Морского Технического Университета по защите докторских диссертаций, членом специализированных ученых советов Военно-морского политехнического института, НИИ Кораблестроения и вооружения.

Он – автор более 160 научных работ, посвященных разработке и развитию теории проектирования судов, сложных технических систем, прогнозирования основных характеристик кораблей судов. Среди множества написанных им учебных пособий и монографий ведущее место занимают «Основы теории проектирования сложных технических систем» (2001 г.), и «Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов» 2014 г. в 2-х томах, над которой без соавторов он работал 14 лет. «Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов», без сомнения, является самым фундаментальным научным трудом в области проектирования кораблей и судов.

На кафедре Проектирования судов Морского Технического Университета и в военных институтах им подготовлены 11 кандидатов и 1 доктор технических наук.

Александр Иосифович Гайкович внес значительный вклад в создание системы автоматизирования исследовательского проектирования кораблей САИПР «ЧЕРТЕЖ-4», которая позволила обосновать облик перспективных надводных кораблей.

По инициативе и при активном личном участии Александра Иосифовича Гайковича были проведены 12 международных научных конференций «Морские интеллектуальные технологии» - МОРИНТЕХ-1995 – МОРИНТЕХ -2012.

Александр Иосифович Гайкович с 2008 г. был одним из основателей научного журнала «Морские интеллектуальные технологии», который по праву стал главным журналом для корабельных инженеров страны по широкому спектру научных специальностей и занял высокие позиции в национальных и международных рейтингах.

В 2016 году Александр Иосифович Гайкович был награжден знаком «Почетный работник высшего профессионального образования». От Морского собрания Санкт-Петербурга ему вручен орден «За трудовую доблесть» II-й степени, а также медаль «За заслуги» (2018 г.) – от Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-Морская академия», серебряная медаль А.Н. Крылова (2012 г.), золотая медаль Петра Великого (2006 г.), памятные медали НТО им. акад. А.Н. Крылова: «150 лет академику А.Н. Крылову» (2013), и «150 лет НТО судостроителей им. А.Н. Крылова».

Глубокая эрудиция, принципиальность, любовь к своему делу, лидерские качества, внимание к коллегам и студентам, дружелюбие и весёлый нрав – всё это снискало Александру Иосифовичу большое уважение и любовь со стороны людей, которые его окружали.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья

УДК 62-822

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.061>

Определение параметров совместного использования подводного аппарата и судовых насосов для нанесения сорбента

Городников О.А.¹ gorodnikov.o@vvsu.ru, Охоткина В.Э.¹ okhotkina.ve@mail.ru,

Мельник А.П.¹ nuta_mart@mail.ru

¹Владивостокский государственный университет

Аннотация. Работа направлена на определение параметров совместного использования подводного аппарата и судовых насосов. Серьезной экологической проблемой в современном мире считается возможность разливов нефти, в том числе аварийных. Поэтому, вопросы, связанные с ликвидацией разливов нефти в первую очередь ориентирована на локализацию пятен для предотвращения дальнейшего увеличения площади загрязнения. На всех стадиях нефтепользования, начиная от разведки и добычи нефти и заканчивая утилизацией её отходов, существует риск разлива, что в свою очередь негативно скажется на состоянии окружающей среды. С развитием области нефтепользования, увеличивается и объем аварийных разливов. Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов ведут к труднообратимым последствиям и на их устранение выделяются большие ресурсы. Использование подводного аппарата судовой энергетической установки для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, позволяет осуществлять распыление сорбирующего вещества в битом и сплошном льду, что в данный момент является невозможным и не имеет аналогов. Данный аппарат является элементом судовой энергетической установки, которая может быть использована на судах, в независимости от их назначения и размеров. Данная установка была спроектирована с целью уменьшения времени локализации и ликвидации разливов и утечек нефти и нефтепродуктов, как при возможности работать в стандартных условиях, так и для работы в битом и сплошном льду. Для определения параметров совместимости, при работе с реестром судов в компании, были получены необходимые данные и произведены расчеты, с целью определения возможностей судовой энергетической установки для обеспечения необходимых условий. Разработка заключается во внедрении нового технического аппарата на суда для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

Ключевые слова: разливы нефти, судовая энергетическая установка, аппарат, судно, сорбент, пожарный насос.

Для цитирования: Городников О.А., Охоткина В.Э., Мельник А.П. Определение параметров совместного использования подводного аппарата и судовых насосов для нанесения сорбента, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 15—21. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.061

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.061>

Determination of parameters for the combined use of a underwater vehicle and ship pumps for application of sorbent

Oleg. A. Gorodnikov¹ gorodnikov.o@vvsu.ru, Viktoria E. Okhotkina¹ okhotkina.ve@mail.ru,

Anna P. Melnik¹ nuta_mart@mail.ru

Vladivostok State University

Abstract. The work is aimed at determining the parameters for the joint use of an underwater vehicle and ship pumps. The possibility of oil spills, including emergency ones, is considered a serious environmental problem in the modern world. Therefore, issues related to oil spill response are primarily focused on localizing spills to prevent a further increase in the area of contamination. At all stages of oil use, from exploration and production of oil to disposal of its waste, there is a risk of spillage, which in turn will negatively affect the environment. With the development of oil use, the volume of accidental spills also increases. Accidental spills of oil and petroleum products lead to difficult-to-reversible consequences and large resources are allocated to eliminate them. The use of underwater apparatus of ship power plant for elimination of emergency spills of oil and petroleum products, allows spraying of sorbing agent in broken and solid ice, which is impossible at the moment and has no analogues. This unit is an element of the ship power plant, which can be used on ships, regardless of their purpose and size. This unit was designed to reduce the time of localization and elimination of spills and leaks of oil and petroleum products, both when working in standard conditions, and for work in the beaten and solid ice. To determine the parameters of compatibility, while working with the register of ships in the company, the necessary data were obtained and calculations were made in order to determine the

capabilities of the ship power plant to provide the necessary conditions. The development consists in the introduction of a new technical device on vessels for the liquidation of emergency spills of oil and petroleum products.

Keywords: oil spills, ship power plant, apparatus, vessel, sorbent, fire pump.

For citation: Oleg. A. Gorodnikov, Viktoriya E. Okhotkina, Anna P. Melnik. Determination of parameters for the combined use of a underwater vehicle and ship pumps for application of sorbent, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 15—21. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.061

Введение

Основными причинами аварийных разливов нефти считаются столкновения танкеров, их посадка на мель, взрывы и пожары, а также крушение судов из-за их технического состояния и метеорологических условий. Поэтому для более эффективного решения для ликвидации разливов нефти необходимо, по нашему мнению, иметь снабжение (установки) на судах, способствующие быстрому реагированию на разлив. В данной работе предложен вариант такой установки – подводный судовый аппарат. Работа подводного судового аппарата осуществляется следующим образом: к распылителю от пожарного насоса, совместно с паром для поддержания необходимой температуры подаваемой воды, находящегося на борту судна по гибкому трубопроводу, подключенному к соединительному устройству, под давлением подается вода. Далее по соединенному с ним трубопроводу вода поступает к управляющей аппаратуре.

Управляющая арматура направляет воду к правому, левому или обоим сопловым аппаратам сразу. В результате подачи струи воды на аппарат будет действовать реактивная тяга и распылитель начнет перемещаться. При подаче одновременно к правому и левому сопловым аппаратам распылитель получает поступательное движение и удаляется от места спуска под лед на необходимое расстояние, вытягивая шланг на заданную длину.

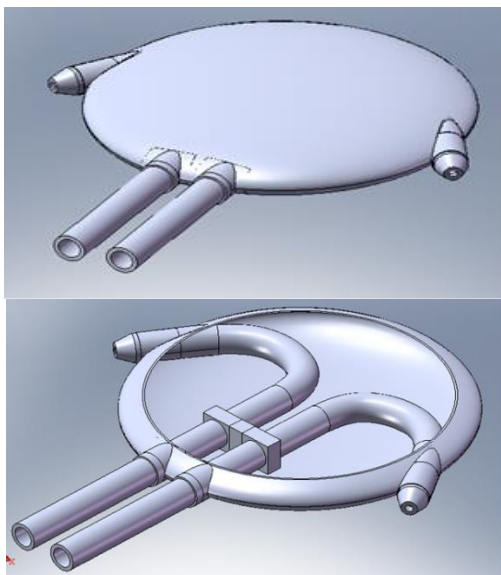


Рис. 1. Модель подводного аппарата для распыления сорбента

Движения данного аппарата будет обеспечиваться судовой энергетической установкой - подача воды с борта судна из пожарных насосов, а также подача пара, который будет выполнять функцию введения сорбента в струю воды и одновременно производить разогрев воды с целью исключения возможности ее замерзания в шлангах.

Для этого, при работе с реестром судов в компании, были получены необходимые данные и произведены расчеты, с целью определения возможностей судовой энергетической установки для обеспечения необходимых условий.

Параметры пожарных систем различных типов судов

В качестве рассматриваемых судов были приняты:

- «Профессор Меграбов» (построен 31.03.1978, владелец – Дальневосточная морская академия имени адмирала Г.И. Невельского);
- «Олюторский залив» (построен 12.1984, владелец – ООО Пета Кэмикл Кампэни);
- «Комсомолец Приморья» (построен 05.1983, владелец – ДВМП FESCO);
- «Ангара» (построен 22.06.1985, владелец – ДВМП FESCO);
- «Енисей» (построен 06.01.1985, владелец – ДВМП FESCO);
- «FESCO MARINA»;
- «ST FORWARD»;
- «ST LEADER».

На каждом, из рассматриваемых судов, установлены пожарные насосы, определенной подачи и в необходимом количестве (минимум по два штуки – основной и резервный).

При работе по определению характеристик пожарной системы каждого из судов были обработаны и выведены (таблица 1), технические параметры подачи насосов, тип насоса и его производительность в кубических метрах в час.

Таблица 1

Характеристики пожарных насосов

Название судна	Название насосов	Производительность, м ³ /ч
Профессор Меграбов	Пожарный насос (тип KRZ IV-80/250)	90
Олюторский залив	Пожарный насос (тип KRZ IV-80/250)	90
Комсомолец Приморья	Пожарный насос (тип KRZ IV-80/250)	90
Ангара	Пожарный насос	200
Енисей	Пожарный насос	200
FESCO MARINA	Пожарный насос	90/190
ST FORWARD	Пожарный насос №1	70
ST LEADER	Пожарный насос №1	70
ФЕСКО НОВИК	Пожарный насос	125 150 -200
KAROLINA WIND	Пожарный насос	50 75

Необходимая подача для движения подводного аппарата 30 кубических метров в час, по результатам расчетов и экспериментальных данных.

Для определения подачи главного стационарного насоса, который должен устанавливаться на судне для обеспечения подачи воды, в случае возникновения аварийной ситуации применяется формула из «Правил классификаций и постройки морских судов», Противопожарная защита, часть 4 НД № 2-020101-174 утвержденный 2023 г.

Подача главного стационарного насоса рассчитывается по формуле (1):

$$Q = (0,145\sqrt{L(B + D)} + 2,17)^2 \quad (1)$$

где L – длина судна, м; B – ширина судна, м; D – высота борта до палубы переборок на миделе, м.

Для определения подачи насоса по формуле необходимо использовать следующие данные.

Судно «Профессор Меграбов»:

- длина судна 142,00 метра;
- ширина судна 22,20 метра;
- высота борта до палубы переборок на миделе 13,60 метра.

$$Q = (0,145\sqrt{142(22,2 + 13,6)} + 2,17)^2 = 156,46 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Судно «Олюторский залив»:

- длина судна 142,00 метра;
- ширина судна 22,20 метра;
- высота борта до палубы переборок на миделе 13,60 метра.

$$Q = (0,145\sqrt{142(22,2 + 13,6)} + 2,17)^2 = 156,46 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Судно «Комсомолец Приморья»:

- длина судна 142,00 метра;
- ширина судна 22,20 метра;
- высота борта до палубы переборок на миделе 13,60 метра.

$$Q = (0,145\sqrt{142(22,2 + 13,6)} + 2,17)^2 = 156,46 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Судно «Ангара»:

- длина судна 178,00 метра;
- ширина судна 28,40 метра;

- высота борта до палубы переборок на миделе 15,60 метра.

$$Q = (0,145\sqrt{178(28,4 + 16,6)} + 2,17)^2 = 229,44 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Судно «Енисей»:

- длина судна 178,40 метра;
- ширина судна 28,40 метра;
- высота борта до палубы переборок на миделе 15,60 метра.

$$Q = (0,145\sqrt{178,4(28,4 + 15,6)} + 2,17)^2 = 225,5 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Судно «Олюторский залив»:

- длина судна 142,00 метра;
- ширина судна 22,20 метра;
- высота борта до палубы переборок на миделе 13,60 метра.

$$Q = (0,145\sqrt{142(22,2 + 13,6)} + 2,17)^2 = 156,46 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Судно «FESCO MARINA»:

- длина судна 142,00 метра;
- ширина судна 22,20 метра;
- высота борта до палубы переборок на миделе 13,60 метра.

$$Q = (0,145\sqrt{142(22,2 + 13,6)} + 2,17)^2 = 156,46 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Судно «ST FORWARD»:

- длина судна 105,00 метра;
- ширина судна 18,00 метра;
- высота борта до палубы переборок на миделе 7,60 метра.

$$Q = (0,145\sqrt{105(18 + 7,6)} + 2,17)^2 = 93,85 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Судно «ФЕСКО НОВИК»:

- длина судна 126,8 метра;
- ширина судна 19,4 метра;
- высота борта до палубы переборок на миделе 9,45 метра.

$$Q = (0,145\sqrt{126,8(19,4 + 9,45)} + 2,17)^2 = 119,7 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Судно «KAROLINA WIND»:

- длина судна 80,9 метра;
- ширина судна 14 метра;

– высота борта до палубы переборок на миделе 6,5 метра.

$$Q = (0,145\sqrt{80,9(14+6,5)} + 2,17)^2 = 65,2 \text{ м}^3/\text{час.}$$

В результате проведенных расчетов был сделан вывод, что в соответствии с требованиями не все суда имеют пожарные насосы способные обеспечить необходимую подачу и производительность в случае возникновения аварийной ситуации и пожара. Но для возможности соответствовать требованиям, предъявляемым к пожарным системам на судне, на каждом из рассмотренных судов установлены несколько пожарных насосов, способных обеспечить необходимую производительность.

По технологическим характеристикам пожарных систем на судах можно прийти к выводу, что условия обеспечения необходимой мощностью пожарных насосов выполняются, так как на каждом судне необходимо установить минимум два насоса (один основной, второй резервный).

Расчет потерь тепла в рабочей жидкости

Жидкость в шланге движется под давлением создаваемым пожарным насосом. Создавая при этом тягу для движения подводного аппарата. Так как часть шланга от насоса до поверхности воды находится в контакте с окружающей средой и возможно остановка движения аппарата, необходимо учитывать возможность образования замерзания воды на внутренние стенки трубопровода.

Для исключения возможности возникновения данного рода процесса, требуется подогрев воды или продувка шланга паром из судовых котлов. Поэтому произведен расчет для определения количество пара, необходимого для подогрева воды в шланге. Шланг разбит для удобства на участки по 10 сантиметров (общая длина 150 метров).

Расчет необходимого количества тепла для подогрева воды в шланге по формуле (2):

$$\Delta Q = k \Delta t \Delta F \quad (2)$$

где Δt - разность температур $\Delta t = t_{в1} - t_{ж2}$; $t_{в1}$ - температура воздуха; $t_{ж2}$ - температура жидкости в шланге; ΔF - площадь поверхности теплообмена всех участков по формуле (3).

$$\Delta F = \pi d \Delta l \quad (3)$$

где d - диаметр трубопровода; Δl - суммарная длина всех участков трубопровода; k - коэффициент теплопередачи по формуле (4):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda}} \quad (4)$$

Таким образом, чтобы вычислить значение коэффициента теплоотдачи для стенки, необходимо знать толщину этой стенки δ , коэффициент теплопроводности λ , и значение коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2

Коэффициент теплоотдачи воздуха α_1 определяется по формуле (5):

$$\alpha_1 = Nu_{возд.} \frac{\lambda_{в}}{d} \quad (5)$$

где $\lambda_{в}$ - коэффициент теплопроводности воздуха, 0,022 Вт/м * °С; d - диаметр трубопровода, 0,051 м; $Nu_{возд.}$ - число Нуссельта для воздуха, которое определяется в зависимости от числа Рейнольдса по формуле (6):

$$Nu_{возд.} = 0,245 Re^{0,6} \quad (6)$$

Процесс обтекания при поперечном обтекании труб воздухом имеет ряд особенностей, так как в любой точке набегающего потока разделяется на две части и плавно обтекает переднюю часть периметра трубы. На поверхности трубы образуется пограничный слой, который имеет наименьшую толщину в лобовой точке и далее постепенно нарастает в размерах. В итоге происходит, отрыв потока и образование вихревой зоны, охватывающей кормовую часть трубы. Положение точки отрыва пограничного слоя зависит от значения Re и степени турбулентности набегающего потока. В результате анализа и обобщения, существующих экспериментальных данных для расчета среднего по периметру трубы коэффициента теплоотдачи можно рекомендовать зависимость:

$$Re_{возд.} < 10^3, Nu_{возд.} = 0,49 Re^{0,5}$$

$$Re_{возд.} > 10^3, Nu_{возд.} = 0,245 Re^{0,6}$$

Число Рейнольдса для воздуха определяется по формуле (7):

$$Re = \frac{wd}{v_{возд.}} \quad (7)$$

где w - скорость водяного потока в трубопроводе, 25 м/с, $v_{возд.}$ - кинематический коэффициент вязкости воздуха, $10,8 * 10^{-10}$

$$Re = \frac{25 * 0,051}{10,8 * 10^{-10}} = 1180555556$$

Так как число $Re_{возд.} > 10^3$, соответственно число Нуссельта для воздуха находим по формуле $Nu_{возд.} = 0,245 Re^{0,6}$.

$$Nu_{возд.} = 0,245 * 1180555556^{0,6} = 67985,7577$$

Исходя из полученных данных, рассчитаем коэффициент теплоотдачи воздуха:

$$\alpha_1 = 67985,7577 * \frac{0,022}{0,051} = 29327,1896$$

Далее необходимо рассчитать коэффициент теплоотдачи жидкости по формуле (8):

$$\alpha_1 = Nu_{ж} \frac{\lambda_{ж}}{d} \quad (8)$$

где $\lambda_{ж}$ - коэффициент теплопроводности жидкости, 0,00569 Вт/м * °С; $Nu_{ж.}$ - число Нуссельта для жидкости.

При турбулентном движении перенос теплоты внутри жидкости осуществляется в основном путем перемешивания. При этом процесс перемешивания протекает настолько интенсивно, что по сечению ядра потока температура жидкости практически

постоянна. Резкое изменения температуры наблюдается лишь внутри тонкого слоя у поверхности.

Первым наиболее подробным и правильно поставленным экспериментальным исследованием теплоотдачи при турбулентном режиме является работа Нуссельта.

На основании большого количества результатов и анализа, для расчета средней теплоотдачи установлена зависимость по формуле (9):

$$Nu_{ж} = 0,28 Re^{0,86} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_{с})^{0,25} \quad (9)$$

где Re – число Рейнольдса для жидкости,

$$Re = \frac{\omega d}{\nu_{ж}}$$

ω - Скорость жидкости, 4,1 м/с, d – Диаметр трубопровода, 0,051 м; $\nu_{ж}$ - кинематический коэффициент вязкости воздуха, $1,789 \cdot 10^{-6}$

$$Re = \frac{4,1 \cdot 0,051}{1,789 \cdot 10^{-6}} = 116880,9391$$

Pr_ж – число Прандтля для жидкости при попадании в шланг = 13,5; Pr_с – число Прандтля для жидкости при движении в шланге = 24,3;

$$Nu_{ж} = 0,28 \cdot 116880,9391^{0,8} \cdot$$

$$\cdot (13,5^{0,8}) \cdot \left(\frac{13,5}{24,3}\right)^{0,25} = 8386,454195$$

тогда

$$\alpha_2 = 8386,454195 \cdot \frac{0,00569}{0,051} = 935,6651838$$

где λ - теплопроводность резины, 0,2; δ – толщина стенки шланги, 0,003м;

$$k = \frac{1}{\frac{1}{29327,1896} + \frac{1}{935,6651838} + \frac{0,003}{0,2}} = 62,10078$$

$$\Delta F = 3,14 \cdot 0,051 \cdot 12 = 1,92168$$

После можем произвести расчет количества энергии необходимой для подогрева воды в шланге: $\Delta Q = 62,10078 \cdot 25 \cdot 1,92168 = 2983,45$ Вт

Это результат показывает, какое количество теплоты теряется при прохождении жидкости по всему трубопроводу, то есть количество теплоты для подачи в шланг составит 3 кВт.

По результатам расчетов и анализа полученных результатов построена диаграмма зависимости изменения энтальпии водяного пара в шланге от температуры окружающей среды (рисунок 2).

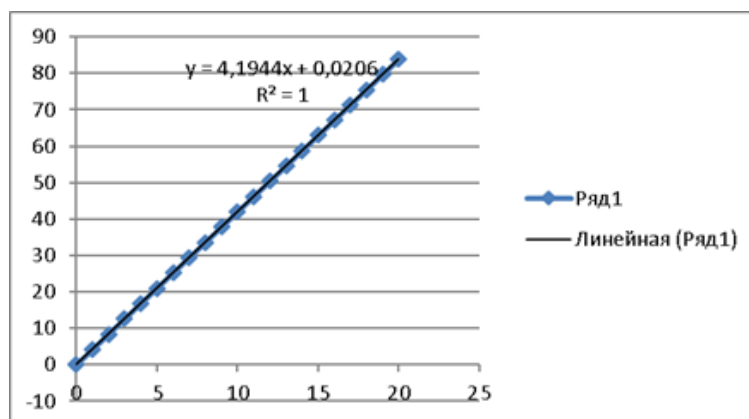


Рис. 2. Диаграмма изменения энтальпии водяного пара в зависимости от условий окружающей среды

В результате расчетов следует вывод, что подогревать воду, подаваемую в шланг не обязательно, но необходима подача водяного пара перед запуском подводного аппарата и после его остановки, так как внутри шланга будет образовываться наледь.

Количество тепла 3кВт необходимое для подачи в шланг из котлов для предотвращения образования наледи внутри шланга при остановке движения подводного аппарата.

При анализе результатов расчетов и параметров судовой энергетической установки, следует вывод, что различные суда могут использовать подводный аппарат для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

Работа судовой энергетической установки и подводного аппарата позволит бороться с разливами в любых погодных условиях, битом и сплошном льду. Исходя из возможностей, каждого судна, можно

сделать вывод, что на борту судна судовая энергетическая установка может использовать не один подводный аппарат, а несколько одновременно.

Поэтому, произведен анализ, возможностей покрытия территории распыления сорбирующего вещества, судовой энергетической установки и подводного аппарата.

Необходимый расход воды для движения подводного аппарата по результатам расчетов и проведенных экспериментов составляет 30 м³/час.

Так как, практически на всех судах установлены насосы в количестве более одной единицы, это дает возможность одновременного подключения нескольких аппаратов, что позволит уменьшить время на обработку нефтяного пятна и сократить время обработки.

Данный метод с использованием подводного аппарата очень актуален для судов, работающих

вблизи нефтяных платформ (суда-снабженцы и аварийно-спасательные суда).

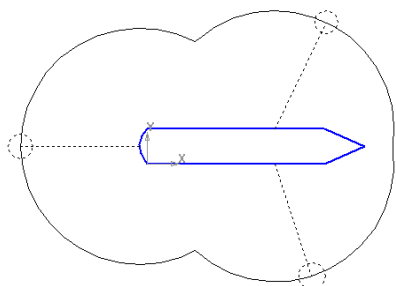


Рис. 3. Схема одновременного подключения трех аппаратов

Исходя из результатов расчетов и возможностей насосов на судне (Профессор Меграбов), при подключении трех аппаратов, площадь покрытия составит 29646,7 м².

Возможные схемы подключения на судно «Ангара» показаны на рисунке 4.

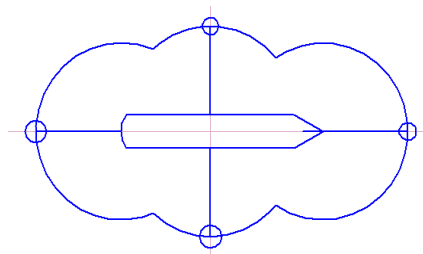


Рис. 4. Схема одновременного подключения четырех аппаратов

Исходя из результатов расчетов и возможностей насосов на судне (Профессор Меграбов), при подключении четырех аппаратов, площадь покрытия составит 40782,7 м².

Данная схема подключения нескольких аппаратов одновременно значительно ускорит скорость подачи сорбента и локализации и ликвидации нефтяного пятна.

Заключение

По результатам расчетов и экспериментов полученные результаты дают четкое понимание рентабельности использования подводного аппарата. Скорость прохождения жидкости в трубопроводе довольно большая, это позволяет минимизировать потерю тепла и избежать возникновения наледи внутри трубопровода, для подогрева достаточно 3 кВт.

При этом так же по результатам требований количества пожарных насосов на судах и расчетов видно, что одновременно можно подключать несколько подводных аппаратов, что позволит увеличить количества активного вещества и ускорить процесс ликвидации нефтяного пятна.

Подводный аппарат легко и быстро подключается к любой судовой противопожарной системе, что устраняет затраты на аренду специального судна и затраты на монтаж и установку. Уменьшаются затраты на сорбент, так как имеется возможность близко подводить подводный аппарат к нефтяному пятну, что значительно уменьшает излишний расход сорбента.

Литература

1. Артемов А.В. Современные технологии очистки нефтяных загрязнений / А.В. Артемов // Нефть. Газ. Промышленность. -М.: Недра, 2008. - №2. - С. 340 с.
2. Патент на полезную модель № 144489 U1 Российская Федерация, МПК E02B 15/04, E02B 15/10. Устройство для подводного введения сорбента : № 2013147318/13 : заявл. 09.01.2014 : опубл. 20.08.2014 / О. А. Городников, С. Ю. Монинец, С. В. Петрашев.
3. Владимиров А.М. Охрана окружающей среды: / А.М. Владимиров. –Л: Гидрометеиздат, 2007, 224 с.
4. Емельянов Н.Ф. Расчёт ходкости и гребного винта морского транспорта судна / Н.Ф. Емельянов, С.А. Огай. Владивосток, 1984, 65 с.
5. Городников О. А. Способ распыления сорбентов при ликвидации аварийных разливов нефти с помощью подводного аппарата / О. А. Городников, С. В. Петрашев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2016. – № 3. – С. 15-17.
6. Городников О. А. Способ распыления сорбентов при ликвидации аварийных разливов нефти с помощью подводного аппарата / О. А. Городников, С. В. Петрашев // Актуальные вопросы науки. – 2016. – № 27. – С. 92-98.
7. Городников О. А. Способ распыления сорбентов при ликвидации аварийных разливов нефти с помощью подводного аппарата / О. А. Городников // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего : сборник материалов III Международной научно-практической конференции: в 2-х томах, Кемерово, 10–11 августа 2016 года. – Кемерово: Общество с ограниченной ответственностью "Западно-Сибирский научный центр", 2016. – С. 115-117.
8. Городников О. А. Разработка подводного аппарата для нанесения сорбентов при ликвидации разливов нефти в замерзающих акваториях / О. А. Городников // Научно-методический электронный журнал Концепт. – 2016. – № Т11. – С. 2706-2710.
9. Городников О. А. Разработка подводного аппарата для нанесения сорбентов в замерзающих акваториях при ликвидации аварийных разливов нефти / О. А. Городников, С. В. Петрашев, П. С. Иушин // Приоритетные направления развития науки и технологий : Тезисы докладов XVIII Международной научно-технической конференции, Тула, 20 ноября 2015 года / Под общей редакцией В.М. Панарина. – Тула: Издательство "Инновационные технологии", 2015. – С. 96-100

References

1. Artemov A.B. Sovremennye tekhnologii ochistki neftnyanykh zagryaznenii [Modern technologies of oil pollution treatment] / A.B. Artemov // Nef't. Gaz. Promyshlennost'. -M.: Nedra, 2008. - №2. - 340 s.
2. Patent na poleznuyu model' № 144489 U1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK E02B 15/04, E02B 15/10. Ustroistvo dlya podvodnogo vvedeniya sorbenta [Underwater sorbent injection device] : № 2013147318/13 : zayavl. 09.01.2014 : opubl. 20.08.2014 / O. A. Gorodnikov, S. YU. Moninets, S. V. Petrashev.
3. Vladimirov A.M. Okhrana okruzhayushchei sredy [Environmental protection] : / A.M. Vladimirov. –L: Gidrometeoizdat, 2007, 224 s.
4. Emel'yanov N.F. Raschet khodkosti i grebnogo vinta morskogo transporta sudna [Calculation of the propulsion and propeller of the ship's marine transport] / N.F. Emel'yanov, S.A. Ogai. Vladivostok, 1984, 65 s.
5. Gorodnikov O. A. Sposob raspyleniya sorbentov pri likvidatsii avariinykh razlivov nefti s pomoshch'yu podvodnogo apparata [Method of spraying sorbents during oil spill response using a submersible device] / O. A. Gorodnikov, S. V. Petrashev // Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse. – 2016. – № 3. – S. 15-17.
6. Gorodnikov O. A. Sposob raspyleniya sorbentov pri likvidatsii avariinykh razlivov nefti s pomoshch'yu podvodnogo apparata [Method of spraying sorbents during oil spill response using a submersible device] / O. A. Gorodnikov, S. V. Petrashev // Aktual'nye voprosy nauki. – 2016. – № 27. – S. 92-98.
7. Gorodnikov O. A. Sposob raspyleniya sorbentov pri likvidatsii avariinykh razlivov nefti s pomoshch'yu podvodnogo apparata [Method of spraying sorbents during oil spill response using a submersible device] / O. A. Gorodnikov // Nauchno-tekhnicheskii progress: aktual'nye i perspektivnye napravleniya budushchego : sbornik materialov III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2-kh tomakh, Kemerovo, 10–11 avgusta 2016 goda. – Kemerovo: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Zapadno-Sibirskii nauchnyi tsentr", 2016. – S. 115-117.
8. Gorodnikov O. A. Razrabotka podvodnogo apparata dlya naneseniya sorbentov pri likvidatsii razlivov nefti v zamerzayushchikh akvatoriyakh [Development of an underwater vehicle for application of sorbents for oil spill response in freezing waters] / O. A. Gorodnikov // Nauchno-metodicheskii ehlektronnyi zhurnal Kontsept. – 2016. – № T11. – S. 2706-2710.
9. Gorodnikov O. A. Razrabotka podvodnogo apparata dlya naneseniya sorbentov v zamerzayushchikh akvatoriyakh pri likvidatsii avariinykh razlivov nefti [Development of an underwater vehicle for application of sorbents in freezing water areas during oil spill response] / O. A. Gorodnikov, S. V. Petrashev, P. S. Iushin // Prioritetnye napravleniya razvitiya nauki i tekhnologii : Tezisy dokladov XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Tula, 20 noyabrya 2015 goda / Pod obshchei redaktsiei V.M. Panarina. – Tula: Izdatel'stvo "Innovatsionnye tekhnologii", 2015. – S. 96-100

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Городников Олег Александрович - старший преподаватель кафедры транспортных процессов и технологий, Владивостокский государственный университет, Российская Федерация, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: gorodnikov.o@vvsu.ru

Oleg A. Gorodnikov senior lecturer of department of transport's processes and technologies, Vladivostok State University (VVSU), Gogolya, 41 St. Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: gorodnikov.o@vvsu.ru

Охоткина Виктория Эльвировна – кандидат географических наук, доцент кафедры транспортных процессов и технологий, Владивостокский государственный университет, Российская Федерация, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: okhotkina.ve@mail.ru

Viktoria E. Okhotkina Ph.D. (Geo), Associate Professor of department of transport's processes and technologies, Vladivostok State University (VVSU), Gogolya, 41 St. Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: okhotkina.ve@mail.ru

Мельник Анна Петровна, магистрант кафедры транспортных процессов и технологий, Владивостокский государственный университет, Российская Федерация, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: nuta_mart@mail.ru

Anna P. Melnik, master's student of the department of transport processes and technologies, Vladivostok State University (FSBEI HE "VVGU"), Russian Federation, 690014, Vladivostok, st. Gogolya, 41, e-mail: nuta_mart@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2023.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Научная статья

УДК 681.518

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.062>

Метод синтеза адаптивных систем для устранения последствий изменения параметров и дефектов в двигателях подводных роботов

Зуев А.В.¹, zuev@dvo.ru, Филаретов В.Ф.^{2,3}, filaretov@inbox.ru,

Жирабок А.Н.^{1,4}, zhirabok@mail.ru, Проценко А.А.¹, protsenko_aa@dvfu.ru

¹Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, ²Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, ³Севастопольский государственный университет, ⁴Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. В статье решена задача синтеза адаптивных систем, обеспечивающих обнаружение, идентификацию и устранение негативных последствий изменения параметров и дефектов в двигателях подводных роботов. Для этого предложен новый метод, состоящий из трёх этапов. На первом этапе с помощью банка диагностических наблюдателей осуществляется обнаружение отклонений параметров двигателей от номинальных значений или возникновение ошибок в показаниях их датчиков. На втором – с помощью наблюдателей с переменной структурой идентифицируются величины обнаруженных изменений параметров и ошибок. При этом, за счёт введения дополнительных наблюдателей удаётся идентифицировать не только одиночные, но и парные одновременно возникающие дефекты. На третьем этапе формируются управляющие сигналы для двигателей подводных роботов, учитывающие идентифицированные величины отклонений параметров и ошибок и обеспечивающие сохранение основных динамических свойств двигателей.

Ключевые слова: подводные роботы, двигатели, дефекты, диагностические наблюдатели, адаптивные системы.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, проект FEFM-2021-0014.

Для цитирования: Зуев А.В., Филаретов В.Ф., Жирабок А.Н., Проценко А.А. Метод синтеза адаптивных систем для устранения последствий изменения параметров и дефектов в двигателях подводных роботов, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 22—31. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.062

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.062>

Synthesis method of adaptive systems to eliminate the consequences of changes in parameters and faults in the thrusters of underwater robots

Alexander V. Zuev¹, zuev@dvo.ru, Vladimir F. Filaretov^{2,3}, filaretov@inbox.ru,

Alexey N. Zhirabok^{1,4}, zhirabok@mail.ru, Alexander A. Protsenko¹, protsenko_aa@dvfu.ru

¹M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, ²Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, ³Sevastopol State University, ⁴Far Eastern Federal University

Abstract. The article discusses the synthesis of adaptive systems that provide detection, identification and elimination of negative consequences of changes in parameters and faults in the thrusters of underwater robots. To do this, an approach consisting of three stages is proposed. At the first stage, with the help of a bank of diagnostic observers, deviations of the thruster parameters from the nominal values or the occurrence of errors in the readings of its sensors are detected. At the second stage, with the help of observers with a variable structure, the values of detected parameter changes and errors are identified. At the same time, by introducing additional observers with a variable structure, it is possible to identify not only single, but also paired simultaneously occurring faults. At the third stage, a control signal is generated for the propulsor, which takes into account the identified values of parameter deviations and errors and ensures the preservation of the basic dynamic properties of the thruster.

Keywords: underwater robots, propellers, defects, diagnostic observers, adaptive systems.

Financial Support: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FEFM-2021-0014.

For citation: Alexander V. Zuev, Vladimir F. Filaretov, Alexey N. Zhirabok, Alexander A. Protsenko, Synthesis method of adaptive systems to eliminate the consequences of changes in parameters and faults in the thrusters of underwater robots, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 22—31. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.062

Введение

Важными компонентами подводных роботов (ПР), обеспечивающими их движение по заданным

траекториям, являются двигатели [1, 2]. Непредвиденные изменения каких-либо параметров двигателей или появление ошибок в показаниях их датчиков, которые могут быть обусловлены

возникновением дефектов или воздействием со стороны внешней среды, могут привести к аварийным ситуациям или потере аппарата. Одним из подходов к повышению надёжности ПР является оперативное обнаружение возникающих изменений параметров и ошибок, а также идентификация их величин [3, 4, 5] с последующей компенсацией их негативных последствий с помощью систем адаптивного управления.

В работе [5] предложено решение этой задачи, состоящее из трёх этапов. На первом этапе с помощью банка диагностических наблюдателей (ДН) осуществляется обнаружение отклонения одного из рассматриваемых параметров (электрического сопротивления цепи якоря электродвигателя $R_{я}$ или внешнего момента нагрузки $M_{в}(t)$), от номинального значения или возникновения ошибок в показаниях датчиков угловых скоростей валов двигателей $\omega(t)$. На втором – с помощью наблюдателей с переменной структурой (НПС) идентифицируются величины обнаруженных изменений параметров и ошибок ($\hat{M}_{в}(t)$, $\hat{R}_{я}(t)$ и $\hat{\omega}(t)$). На третьем этапе формируются управляющие сигналы для двигателей ПР, учитывающие идентифицированные величины отклонений параметров и ошибок и обеспечивающие сохранение основных динамических свойств двигателей.

Недостатком метода, описанного в работе [5], является то, что каждый из предлагаемых ДН чувствителен к двум из трёх возможных отклонений параметров и ошибок, из-за чего при одновременно возникших двух или более из них определить какой именно параметр изменился не удаётся. Таким образом целью работы является создание новой системы адаптивного управления, позволяющей обнаруживать, идентифицировать и компенсировать последствия изменений как одного, так и сразу двух параметров двигателей ПР или ошибок в показаниях их датчиков.

Математическая модель двигателя ПР, учитывающая появление дефектов

Эксплуатация ПР показывает, что появление дефектов в их двигателях, вызывающих отклонение их параметров от номинальных значений, а также ошибок в используемых датчиках угловых скоростей, приводит к значительному снижению точности движения ПР по пространственным траекториям, аварийным ситуациям или даже к потере дорогостоящих роботов. При создании нового метода синтеза ДН для выявления в реальном масштабе времени этих дефектов предварительно следует сформировать точные математические модели их двигателей, учитывающие все часто возникающие дефекты.

В ПР обычно используются электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения или с постоянными магнитами, которые оснащаются датчиками угловых скоростей $\omega(t)$ вращения их выходных валов и датчиками тока $I(t)$ их якорных цепей [6, 7]. В этих двигателях возможно появление:

1) дефектов в датчиках угловых скоростей, приводящих к появлению постоянных или переменных ошибок $\hat{\omega}(t)$;

2) избыточного нагрева двигателя или замыкания витков обмоток, приводящих к изменениям

номинальных значений электрических сопротивлений $R_{я}$ на величины $\hat{R}_{я}$;

3) появление на выходных валах двигателей неизвестных внешних моментных воздействий $\hat{M}_{в}(t)$.

С учетом этих дефектов каждый отдельный двигатель можно описать системой дифференциальных уравнений вида [5, 8]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -\frac{k_{в}}{J_{д}}x_1(t) + \frac{k_{м}}{J_{д}}x_2(t) - \\ &\quad - \frac{M_{вд}(x_1(t), t) + \hat{M}_{в}(t)}{J_{д}}, \quad (1) \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{k_{\omega}}{L_{я}}x_1(t) - \frac{R_{я} + \hat{R}_{я}}{L_{я}}x_2(t) + \frac{k_{у}}{L_{я}}u(t), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} M_{вд}(x_1(t), t) &= F_m (s_{\tau} + H_{гд}C_r x_1(t)) |x_1(t)| - \\ &\quad - C_m \frac{S_{д}\rho_{ж}|v_{ж}(t)|v_{ж}(t)}{2(1 + C_{\omega}x_1^2(t))}, \\ s_{\tau} &= p_{\tau} - \text{sign}(x_1(t))\sqrt{p_{\tau}^2 - q_{\tau}}, \quad p_{\tau} = \\ &= H_{гд}x_1(t) - \frac{v_p}{2} + \frac{F_{\tau}x_1(t)}{4\rho_{ж}S_{д}}, \quad (2) \\ q_{\tau} &= H_{гд}x_1(t)(H_{гд}x_1(t) - v_p), \\ H_{гд} &= H_{гш} + \delta_H \text{sign}(x_1(t)), \\ v_p &= \begin{cases} v_{ж}(t), & \text{если } \text{sign}(x_1(t)) = \text{sign}(v_{ж}(t)), \\ 0, & \text{если } \text{sign}(x_1(t)) \neq \text{sign}(v_{ж}(t)), \end{cases} \end{aligned}$$

$x_1 = \omega(t)$ и $x_2 = I_{я}(t)$ – переменные состояния двигателя; $u(t)$ – входное напряжение; $L_{я}$ – индуктивность цепи якоря; k_{ω} – коэффициент противо-э.д.с.; $k_{у}$ – коэффициент усиления усилителя мощности; $k_{м}$ – коэффициент крутящего момента; $k_{в}$ – коэффициент вязкого трения; $v_{ж}(t)$ – скорость перемещения окружающей жидкости вдоль оси винта относительно ПР; $H_{гд}$ и $H_{гш}$ – гидродинамический и геометрический шаги винта; δ_H – гидродинамическая поправка на шаг винта; F_m – обобщенный коэффициент момента; C_r , C_m – коэффициенты подъемной силы и момента винта при $\omega(t) = 0$; C_{ω} – коэффициент, характеризующий уменьшение подъемной силы и момента винта при $\omega(t) \neq 0$; C_r – коэффициент профилейных потерь винта; $\rho_{ж}$ – плотность окружающей жидкости; $S_{д}$ – площадь диска винта; $J_{д}$ – момент инерции вращающихся частей двигателя с учетом присоединенного момента инерции жидкости; s_{τ} – абсолютное скольжение винта; $M_{вд}(t)$ – момент на валу двигателя от взаимодействия винта с вязкой средой; p_{τ} , q_{τ} и v_p – вспомогательные переменные.

При синтезе ДН с использованием логико-динамического подхода [9] систему уравнений (1) удобно переписать в матричном виде

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \phi(x(t), t) + Dd(t), \quad (3) \\ y(t) &= Cx(t) + D_s \hat{\omega}(t), \end{aligned}$$

где $A \in R^{2 \times 2}$ – матрица динамических свойств двигателя; $x(t) \in R^{2 \times 1}$ – вектор состояния; $B \in R^{2 \times 1}$ – матрица-столбец коэффициентов усиления при управляющих воздействиях; $y(t) \in R^{2 \times 1}$ – измеряемые датчиками переменные состояния; $D \in R^{2 \times 2}$ – матрица дефектов, указывающая место возникновения дефектов; $d(t) \in R^{2 \times 1}$ – вектор,

характеризующий дефекты (при отсутствии дефектов все элементы вектора $d(t)$ равны нулю, а при их появлении конкретный элемент становится ненулевым); $C \in R^{2 \times 2}$ – матрица выхода, связывающая вектор переменных состояний с вектором измерений; $\phi(x(t), t) \in R^2$ – векторная функция, учитывающая нелинейности электропривода; $D_s \in R^{2 \times 1}$ – вектор дефектов в датчиках движителя, указывающий датчик, в котором возник дефект.

Записанные в (3) матрицы и векторы имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{k_B}{J_d} & \frac{k_M}{J_d} \\ \frac{k_\omega}{L_{я}} & -\frac{R_{я}}{L_{я}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_y}{L_{я}} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_s = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\phi(x(t), t) = \begin{bmatrix} -\frac{M_{вд}(x_1(t), t)}{J_d} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad x(t) = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I_{я}(t) \end{bmatrix},$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega(t) + \hat{\omega}(t) \\ I_{я}(t) \end{bmatrix}, \quad d(t) = \begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{bmatrix},$$

где $d_1(t) = -\frac{M_{вд}(t)}{J_d}$, $d_2(t) = -\frac{R_{я}}{L_{я}} I_{я}(t)$.

Математическая модель (3) каждого движителя характеризуется системой нелинейных дифференциальных уравнений, учитывающих взаимодействие винта с вязкой средой и типовые дефекты. Эта модель используется для синтеза банка ДН и для выявления различных дефектов. Каждый наблюдатель в банке должен синтезироваться таким образом, чтобы формируемая им невязка реагировала (была чувствительна) на появление различной комбинации ненулевых функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $\hat{\omega}(t)$.

Описание банка ДН и НПС для обнаружения дефектов движителей и определения величины изменений параметров и ошибок в показаниях датчиков

В работе [5] был предложен метод построения банков ДН для оперативного выявления дефектов и отклонений параметров от номинальных значений в движителях ПР. С использованием моделей этих движителей (3) и логико-динамического подхода [9] создан метод построения банка ДН для движителей ПР, позволяющий линейными методами обнаруживать дефекты в существенно нелинейных системах. Однако в отличие от типового логико-динамического подхода предложенная в работе [5] процедура диагностирования позволяет строить ДН с заданной чувствительностью или нечувствительностью к определённым наборам дефектов, что позволяет по невязкам этих ДН точно определить, какой из возможных дефектов произошёл. Однако, недостатком этого метода является то, что при появлении сразу двух дефектов, на выходе всех ДН появится ненулевая невязка, что не позволяет сделать вывод о типах возникших дефектов. Далее представлено математическое описание этих ДН.

ДН-1 первого порядка, определяющий появление ненулевых функций $d_2(t)$ и $\hat{\omega}(t)$, но инвариантный к $d_1(t)$ описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}_*^{(1)}(t) = -\frac{k_\omega}{L_{я}} y_1(t) - \frac{R_{я}}{L_{я}} y_2(t) + \frac{k_y}{L_{я}} u(t) + e_y^{(1)}(t), \quad (4)$$

$$y_*^{(1)}(t) = x_*^{(1)}(t), \quad e_y^{(1)}(t) = y_2(t) - y_*^{(1)}(t).$$

ДН-2 первого порядка, определяющий появление ненулевых функций $d_1(t)$ и $\hat{\omega}(t)$, но нечувствительный к $d_2(t)$, имеет вид:

$$\dot{x}_*^{(2)}(t) = -\frac{k_B}{J_d} y_1(t) + \frac{k_M}{J_d} y_2(t) - \frac{M_{вд}(t)}{J_d} + e_y^{(2)}(t), \quad (5)$$

$$y_*^{(2)}(t) = x_*^{(2)}(t), \quad e_y^{(2)}(t) = y_1(t) - y_*^{(2)}(t).$$

ДН-3 второго порядка, определяющий появление ненулевых функций $d_1(t)$ и $d_2(t)$ и нечувствительный к $\hat{\omega}(t)$, имеет вид:

$$\dot{x}_{*1}^{(3)}(t) = x_{*2}^{(3)}(t) + \left(-\frac{k_B}{J_d} - \frac{R_{я}}{L_{я}}\right) y_2(t) + \frac{k_y}{L_{я}} u(t) + 2e_y^{(3)}(t),$$

$$\dot{x}_{*2}^{(3)}(t) = \left(-\frac{k_M k_\omega}{J_d L_{я}} - \frac{k_B R_{я}}{J_d L_{я}}\right) y_2(t) + \frac{k_B k_y}{J_d L_{я}} u(t) + \frac{M_{вд}(x_*(t), t) k_\omega}{J_d L_{я}} + e_y^{(3)}(t), \quad (6)$$

$$y_*^{(3)}(t) = x_{*1}^{(3)}(t), \quad e_y^{(3)}(t) = y_2(t) - y_*^{(3)}(t).$$

Банк ДН (4)-(6) позволяет определять факт появления ненулевых функций $M_{вд}(t)$, $R_{я}(t)$ (или зависящих от них функций $d_1(t)$, $d_2(t)$) и $\hat{\omega}(t)$, обусловленных возникновением соответствующих дефектов в движителях ПР с помощью матрицы синдромов S:

$$S = \begin{matrix} & d_1(t) & d_2(t) & \hat{\omega}(t) \\ e_y^{(1)} & 0 & 1 & 1 \\ e_y^{(2)} & 1 & 0 & 1 \\ e_y^{(3)} & 1 & 1 & 0 \end{matrix} \quad (7)$$

Столбцы матрицы (7) различны, что даёт возможность однозначно определить место появления конкретного одиночного дефекта в движителях ПР. Это решение принимается с помощью невязок $e_y^{(1)}(t)$, $e_y^{(2)}(t)$ и $e_y^{(3)}(t)$ по правилам:

1) если $e_y^{(1)}(t) = 0$, $e_y^{(2)}(t) = 0$ и $e_y^{(3)}(t) = 0$, то дефектов в движителе нет;

2) если $e_y^{(1)}(t) = 0$, $e_y^{(2)}(t) \neq 0$ и $e_y^{(3)}(t) \neq 0$, то появилась ненулевая функция $d_1(t)$ (появился внешний момент на валу двигателя);

3) если $e_y^{(1)}(t) \neq 0$, $e_y^{(2)}(t) = 0$ и $e_y^{(3)}(t) \neq 0$, то в системе (3) появилась ненулевая функция $d_2(t)$ (произошло отклонение активного сопротивления якорной цепи двигателя от своего номинального значения);

4) если $e_y^{(1)}(t) \neq 0$, $e_y^{(2)}(t) \neq 0$ и $e_y^{(3)}(t) = 0$, то в системе (3) $\hat{\omega}(t) \neq 0$ (появилась ошибка в сигнале, получаемом от датчика угловой скорости);

5) если $e_y^{(1)}(t) \neq 0$, $e_y^{(2)}(t) \neq 0$ и $e_y^{(3)}(t) \neq 0$, то одновременно возникло нескольких дефектов, которые не удастся определить с помощью построенного банка ДН и необходимо прекратить выполняемую ПР миссию.

ДН (4)-(6) позволяют своевременно обнаруживать и выявлять места появления важных одиночных

дефектов в двигателях ПР. Однако они не обеспечивают оценку величин изменений параметров двигателей и ошибок в показаниях датчиков их угловых скоростей, вызванными этими дефектами, т.е. они не предназначены для идентификации величин дефектов, которая необходима для дальнейшей компенсации негативных последствий от их появления.

В последние годы для решения этой задачи традиционно используются НПС, которые позволяют определять величины дефектов за счет введения в наблюдатель дополнительного разрывного слагаемого. Теория построения таких наблюдателей описана во многих работах [10, 11]. Однако известные наблюдатели, как правило, строятся на основе полных моделей объектов диагностирования, что приводит к усложнению их практической реализации при использовании типовых бортовых ЭВМ подводных роботов.

В работе [5] был рассмотрен метод синтеза легкорезализуемых систем идентификации, использующий НПС, построенные на основе моделей объекта диагностирования пониженного порядка. Эти системы чувствительны только к уже выявленным на предыдущем этапе конкретным дефектам и позволяют получить точную оценку величины отклонения одного из параметров двигателей ПР от его номинального значения либо ошибку в показаниях датчика угловой скорости вращения вала этого двигателя.

НПС-1 для оценки величины $\hat{M}_B(t)$ описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \hat{x}_*^{(1)}(t) &= -\frac{k_B}{J_d} y_1(t) + \frac{k_M}{J_d} y_2(t) - \frac{M_{вд}(t)}{J_d} - \\ &\quad - e_y^{(1)}(t) - L^{(1)} z^{(1)}(t), \\ \hat{y}_*^{(1)}(t) &= \hat{x}_*^{(1)}(t), \quad e_y^{(1)}(t) = \hat{y}_*^{(1)}(t) - y_1(t), \quad (8) \\ \hat{M}_B(t) &= -z_{eq}^{(1)}(t) J_d. \end{aligned}$$

НПС-2 для определения величины $\hat{R}_r(t)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_*^{(2)}(t) &= -\frac{k_\omega}{L_r} y_1(t) - \frac{R_r}{L_r} y_2(t) + \frac{k_y}{L_r} u(t) - \\ &\quad - e_y^{(2)}(t) - L^{(2)} z^{(2)}(t), \\ \hat{y}_*^{(2)}(t) &= \hat{x}_*^{(2)}(t), \quad e_y^{(2)}(t) = \hat{y}_*^{(2)}(t) - y_2(t), \quad (9) \\ \hat{R}_r(t) &= -z_{eq}^{(2)}(t) L_r / I_r(t). \end{aligned}$$

НПС-3, позволяющий определить величину ошибки в показаниях датчика угловой скорости вращения вала двигателя $\hat{\omega}(t)$, имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_*^{(3)}(t) &= -\frac{k_\omega}{L_r} y_1(t) - \frac{R_r}{L_r} y_2(t) + \frac{k_y}{L_r} u(t) - \\ &\quad - e_y^{(3)}(t) - L^{(3)} z^{(3)}(t), \quad (10) \\ \hat{y}_*^{(3)}(t) &= \hat{x}_*^{(3)}(t), \quad e_y^{(3)}(t) = \hat{y}_*^{(3)}(t) - y_2(t), \\ \hat{\omega}(t) &= z_{eq}^{(3)}(t). \end{aligned}$$

Таким образом, НПС (8) – (10) позволяют определить величины одиночных дефектов в двигателях ПР. Однако, если два из возможных дефектов возникают одновременно, то их идентификация с помощью рассмотренных НПС становится невозможной. Решение этой новой проблемы будет рассмотрено далее.

Построение дополнительных НПС для одновременной идентификации отклонений параметров приводов и появления ошибок в показаниях датчиков угловых скоростей вращения двигателей ПР

Если выявлен факт одновременного появления более одной ненулевой функции $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$, то для определения, какая именно пара функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ стала неравной нулю возможно воспользоваться оценками угловой скорости вращения двигателя ПР $\omega_1^{ou}(t)$ и $\omega_2^{ou}(t)$. При этом для решения задачи одновременной идентификации величин отклонений параметров приводов от их номинальных значений и величин ошибок в показаниях датчиков угловых скоростей вращения двигателей ПР вначале необходимо определить какие именно функции $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ начинают отличаться от нуля, а затем уже воспользоваться одним из следующих правил.

1) Если из трёх функций $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ функции $\hat{M}_B(t)$ и $\hat{R}_r(t)$ становятся ненулевыми, а $\hat{\omega}(t)$ остаётся равна нулю, величины $\hat{M}_B(t)$ и $\hat{R}_r(t)$ одновременно могут быть определены с помощью ранее полученных НПС-1 (8) и НПС-2 (9), соответственно.

2) Если $\hat{M}_B(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ не равны нулю, а $\hat{R}_r(t) = 0$, то величину $\hat{M}_B(t)$ можно найти с помощью НПС-1 (8), если подать на его вход вместо ошибочного показания датчика угловой скорости вращения двигателя ПР оценку реальной величины этой скорости – $\omega_1^{ou}(t)$, не зависящую от функции $\hat{M}_B(t)$. Эту оценку можно получить с помощью дополнительного НПС-4, синтез которого будет рассмотрен далее. В этом случае величину $\hat{\omega}(t)$ можно будет определить с помощью выражения $\hat{\omega}(t) = y_1(t) - \omega_1^{ou}(t)$. То есть дополнительное ведение НПС-4 позволит одновременно определять сразу две величины $\hat{M}_B(t)$ и $\hat{\omega}(t)$.

3) Если $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ не равны нулю, а $\hat{M}_B(t) = 0$, величину $\hat{R}_r(t)$ можно определить с помощью НПС-2 (9), если на его вход также подать оценку реальной величины угловой скорости вращения двигателя ПР – $\omega_2^{ou}(t)$, не зависящую от функции $\hat{R}_r(t)$. Эту оценку можно получить с помощью дополнительного НПС-5, синтез которого также будет рассмотрен ниже. Величина $\hat{\omega}(t)$ в этом случае определяется выражением $\hat{\omega}(t) = y_1(t) - \omega_2^{ou}(t)$. Это позволяет одновременно получать информацию о величинах $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$.

4) Если все три функции $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ начинают отличаться от нуля, то идентифицировать их величины не удастся, так как в этом случае невозможно построить НПС, формирующий верную оценку $\omega(t)$.

Построение указанных оценок $\omega_1^{ou}(t)$ и $\omega_2^{ou}(t)$ детально будет рассмотрено ниже. При этом на вход ДН-1 (4), вместо сигнала $y_1(t) = \omega(t) + \hat{\omega}(t)$, получаемого от датчика угловой скорости и содержащего возможную ошибку, следует подать сигнал $\omega_1^{ou}(t)$. Это обеспечит независимость невязки указанного ДН от функции $\hat{\omega}(t)$. Аналогично следует заменить сигнал $y_1(t)$ на входе ДН-2 (5) на сигнал $\omega_2^{ou}(t)$. После указанной замены матрица синдромов S (7) приобретёт вид:

$$S = \begin{matrix} & d_1 \text{ и } d_2 & d_1 \text{ и } \hat{\omega} & d_2 \text{ и } \hat{\omega}(t) \\ e_y^{(1)} & 1 & 0 & 1 \\ e_y^{(2)} & 1 & 1 & 0 \\ e_y^{(3)} & 1 & 1 & 1 \end{matrix} \quad (11)$$

Из (11) видно, что эта новая матрица позволяет определить какие две ненулевые функции из трех ненулевых $d_1(t), d_2(t), \hat{\omega}(t)$ появились одновременно. Решение о наличии конкретных парных дефектов принимается с помощью следующих правил:

1) если $e_y^{(1)}(t) \neq 0, e_y^{(2)}(t) \neq 0, a e_y^{(3)}(t) \neq 0$, то одновременно появились ненулевые функции $d_1(t)$ (появился дополнительный внешний момент на валу двигателя) и $d_2(t)$ (произошло отклонение активного сопротивления якорной цепи двигателя от своего номинального значения);

2) если $e_y^{(1)}(t) = 0, e_y^{(2)}(t) \neq 0$ и $e_y^{(3)}(t) \neq 0$, то в системе (3) появились ненулевые функции $d_1(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ (появился внешний момент на валу двигателя и ошибка в сигнале, получаемом от датчика угловой скорости);

3) если $e_y^{(1)}(t) \neq 0, e_y^{(2)}(t) = 0$ и $e_y^{(3)}(t) \neq 0$, то в системе (3) появились ненулевые функции $d_2(t)$ и $\hat{\omega}(t)$.

Для получения величин (оценок) угловой скорости вращения конкретного движителя ПР $\omega_1^{оц}(t)$ и $\omega_2^{оц}(t)$, близких к реальным, предложено [12] использовать специальные дополнительные НПС-4 и НПС-5 (виртуальные датчики), которые позволяют выявить реальные текущие значения $\omega(t)$, при появлении ненулевых функций $\hat{M}_B(t)$ и $\hat{R}_r(t)$, соответственно.

Процедура построения указанных дополнительных НПС аналогична процедуре построения НПС (8) – (10), рассмотренной в [5]. Однако на дополнительные НПС налагаются еще и новые требования [12]:

1) преобразованная модель, на основе которой строятся дополнительные НПС, не должна завесить от показаний датчиков, измеряющих оцениваемую величину (в рассматриваемом случае от показаний датчика угловой скорости), то есть входящие в неё матрицы R_* и J_* должны удовлетворять условиям $R_*D_s = 0$ и $J_*D_s = 0$;

2) матрица Φ_* преобразованной модели должна иметь вид, при котором элемент $x(t)$ вектора состояния объекта диагностирования может быть определен из уравнения

$$x_*(t) = \Phi_*x(t). \quad (12)$$

В связи с этим дополнительные НПС для оценки величины $\omega(t)$ предлагается строить, используя удовлетворяющую указанным требованиям преобразованную модель, полученную из ДН-3 (6). Невязка этого ДН не зависит от $\hat{\omega}(t)$, поэтому появление ошибки в показаниях датчика угловой скорости не будут влиять на работу дополнительных НПС, а матрица Φ_* этого ДН имеет вид

$$\Phi_*^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{21} & -a_{11} \end{bmatrix},$$

что с учётом уравнения (12) позволяет получить оценки $\omega_1^{оц}(t)$ и $\omega_2^{оц}(t)$ в виде

$$\omega_1^{оц}(t) = (\hat{x}_{*2}^{(4)} + a_{11}I(t))/a_{21}. \quad (13)$$

$$\omega_2^{оц}(t) = (\hat{x}_{*2}^{(5)} + a_{11}I(t))/a_{21}$$

При синтезе дополнительных НПС вектор коэффициентов L выбираются так, чтобы формируемая соответствующим НПС оценка не зависела от одной из функций $\hat{M}_B(t)$ или $\hat{R}_r(t)$. Для НПС-4, дающего оценку $\omega_1^{оц}(t)$, не зависящую от $\hat{M}_B(t)$, $L = D_{*1} = [0 \ a_{21}]^T$. Этот наблюдатель описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x}_{*1}^{(4)}(t) &= x_{*2}^{(4)}(t) + \left(-\frac{k_B}{J_d} - \frac{R_r}{L_r}\right)y_2(t) + \\ &+ \frac{k_y}{L_r}u(t) - 2e_y^{(4)}(t), \\ \dot{x}_{*2}^{(4)}(t) &= \left(-\frac{k_M k_\omega}{J_d L_r} - \frac{k_B R_r}{J_d L_r}\right)y_2(t) + \frac{k_B k_y}{J_d L_r}u(t) + \\ &+ \frac{M_{вд}(t)k_\omega}{J_d L_r} - e_y^{(4)}(t) + a_{21}z^{(4)}(t), \\ y_*^{(4)}(t) &= x_{*1}^{(4)}(t), \quad e_y^{(4)}(t) = y_2(t) - y_*^{(4)}(t). \end{aligned} \quad (14)$$

НПС-4 вида (14) при использовании выражения (13) позволяет выявить реальную величину $\omega(t)$, даже при одновременном появлении ненулевых значений $\hat{\omega}(t), \hat{M}_B(t)$. Но при появлении ненулевой функции $\hat{R}_r(t)$ оценка величины $\omega(t)$ должна производиться уже при использовании НПС-5, отличающегося от НПС-4 (14) видом вектора L , который в данном случае будет равен $L = D_{*2} = [1 \ -a_{11}]^T$. НПС-5 описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{*1}^{(5)}(t) &= x_{*2}^{(5)}(t) + \left(-\frac{k_B}{J_d} - \frac{R_r}{L_r}\right)y_2(t) + \frac{k_y}{L_r}u(t) - \\ &- 2e_y^{(5)}(t) + z^{(5)}(t), \\ \dot{x}_{*2}^{(5)}(t) &= \left(-\frac{k_M k_\omega}{J_d L_r} - \frac{k_B R_r}{J_d L_r}\right)y_2(t) + \frac{k_B k_y}{J_d L_r}u(t) + \\ &+ \frac{M_{вд}(t)k_\omega}{J_d L_r} - e_y^{(5)}(t) - a_{11}z^{(5)}(t). \\ y_*^{(5)}(t) &= x_{*1}^{(5)}(t), \quad e_y^{(5)}(t) = y_2(t) - y_*^{(5)}(t). \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, были построены наблюдатели (14) и (15), которые позволяют получить точные оценки $\omega_1^{оц}(t)$ и $\omega_2^{оц}(t)$ величины $\omega(t)$ при одновременном возникновении ненулевых функций $\hat{M}_B(t)$ или $\hat{R}_r(t)$, соответственно, и одновременно определить величины этих функций.

Синтез систем для устранения негативных последствий выявленных дефектов в движителях подводных роботов

Движение ПР по пространственным траекториям осуществляется за счёт тяг, создаваемых его движителями. В настоящее время существуют эффективные системы управления [13], позволяющие формировать желаемые тяги движителей таким образом, чтобы обеспечивать точное перемещение ПР по заданным гладким траекториям. Однако при использовании всех указанных выше систем управления предполагается, что динамические свойства каждого из движителей ПР описываются линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами [13] вида

$$T_d \dot{T}(t) + T(t) = T_{ж}, \quad (16)$$

где $T(t)$ – тяга двигателя, $T_{ж}$ – желаемая тяга двигателя, T_d – постоянный коэффициент.

На самом же деле, как показано в работах [8, 13], динамические свойства реальных движителей ПР описываются системами сложных нелинейных уравнений с переменными параметрами, что препятствует применению известных высококачественных систем управления. Для устранения возникшей проблемы следует свести сложное нелинейное описание движителей к виду (16). Для этого можно использовать известный метод синтеза, предложенный в работе [13] и позволяющий за счет введения специальных нелинейных регуляторов и самонастройки получать такие законы управления этими движителями, которые позволяют описывать их в желаемом виде (16). Однако в работе [13] при синтезе соответствующих регуляторов и систем вообще не учитывалась возможность дополнительного изменения параметров движителей вследствие возникновения дефектов. Поэтому в статье предлагается, воспользовавшись известным методом [13], создавать новые адаптивные системы управления, обеспечивающие движителям желаемые динамические свойства и в случае появления дефектов, которые приводят к появлению ненулевых функций $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_Я(t)$ и $\hat{\omega}(t)$. В этом случае при синтезе адаптивных и нелинейных регуляторов необходимо использовать модель движителя ПР вида (1) и (2), учитывающую ранее обнаруженные и определенные $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_Я(t)$, а также реальные значения $\omega(t)$ с учетом выявленных ошибок $\hat{\omega}(t)$ в показаниях датчика скорости.

Для получения новых адаптивных систем движителей ПР необходимо выполнить следующие действия:

1) ввести исходное дифференциальное уравнение, описывающее зависимость тяги $T(t)$ движителя от сигнала его управления u ;

2) получить закон реализации адаптивного нелинейного регулятора, решая систему из указанного (в п. 1) исходного уравнения и уравнения (16).

Для получения дифференциального уравнения, описывающего зависимость тяги движителя от его сигнала u , как показано в [13], вначале систему (1), (2) можно дополнить выражением [8]

$$T(t) = F_\tau |\omega| s_\tau, \quad (17)$$

где F_τ – обобщенный коэффициент силы тяги, связывающим тягу движителя и скорость вращения его винта.

Затем систему уравнений (1), (2) и (17) следует свести к одному дифференциальному уравнению относительно $\dot{T}(t)$. Для этого, продифференцировав (17) по времени, получим [13]:

$$\dot{T}(t) = F_\tau (\dot{\omega} s_\tau \text{sign } \omega + |\omega| \dot{s}_\tau), \quad (18)$$

Как показано в [13], с учётом того, что

$$\dot{s}_\tau = \dot{\omega} \left(K_s + H_{гд} - \frac{K_s \left((K_s + 2H_{гд})\omega - \frac{v_p}{2} \right) \text{sign } \omega}{\sqrt{(K_s \omega - \frac{v_p}{2})^2 + 2H_{гд} K_s \omega^2}} \right),$$

$$K_s = \frac{F_\tau}{4\rho_{ж} S_d},$$

выражение (18) можно переписать в виде

$$\dot{T}(t) = F_\tau \dot{\omega} \left(s_\tau \text{sign } \omega + |\omega| \left(K_s + H_{гд} - \frac{K_s \left((K_s + 2H_{гд})\omega - \frac{v_p}{2} \right) \text{sign } \omega}{\sqrt{(K_s \omega - \frac{v_p}{2})^2 + 2H_{гд} K_s \omega^2}} \right) \right), \quad (19)$$

где

$$N = s_\tau \text{sign } \omega + |\omega| \left(K_s + H_{гд} - \frac{K_s \left((K_s + 2H_{гд})\omega - \frac{v_p}{2} \right) \text{sign } \omega}{\sqrt{(K_s \omega - \frac{v_p}{2})^2 + 2H_{гд} K_s \omega^2}} \right).$$

Подставив в (17) вместо $\dot{\omega}$ правую часть первого уравнения системы (1), получим

$$\dot{T}(t) = F_\tau \left(-\frac{k_B}{J_d} \omega + \frac{k_M}{J_d} I - \frac{M_{вд} + \hat{M}_B}{J_d} \right) N \quad (20)$$

Поскольку в современных движителях постоянного тока индуктивность якорных обмоток мала, то ими можно пренебречь, упрощая синтез искомого закона управления [13]. В этом случае ток якоря электродвигателя, выраженный из второго уравнения системы (1), будет описываться уравнением

$$I = \frac{k_y u - k_\omega \omega}{R_\я + \hat{R}_\я}. \quad (21)$$

Как и в работе [13], с целью упрощения процедуры синтеза закона адаптивного управления примем, что величина элемента $C_m \frac{S_d \rho_{ж} |v_{ж}(t)| v_{ж}(t)}{2(1+C_\omega x_1^2(t))}$, входящего в выражение для момента $M_{вд}$ (2) на валу движителя, незначительна. В этом случае указанный момент можно описать выражением

$$M_{вд} = F_m (s_\tau + H_{гд} C_r \omega) |\omega|. \quad (22)$$

Переписав уравнение (20) с учётом (21) и (22), систему уравнений (1), (2) и (17) окончательно можно свести к одному дифференциальному уравнению первого порядка, описывающему динамику движителя и учитывающему возможные дефекты

$$\dot{T}(t) = F_\tau \left(\frac{k_M k_y u - (k_B (R_\я + \hat{R}_\я) + k_M k_\omega) \omega}{(R_\я + \hat{R}_\я) J_d} + \frac{-(R_\я + \hat{R}_\я) (F_m (s_\tau + H_{гд} C_r \omega) |\omega| + \hat{M}_B)}{(R_\я + \hat{R}_\я) J_d} \right) N. \quad (23)$$

Для стабилизации динамических свойств движителей ПР при появлении рассмотренных ранее дефектов необходимо ввести такой закон изменения управляющего сигнала u , при подстановке которого в уравнение (23) будет обеспечено равенство его правой части и функции $\dot{T}(t)$, выраженной из уравнения (16). Для этого, как показано в работе [13], необходимо решить систему уравнений (16), (23) относительно u . Это решение имеет вид:

$$u = \left(J_d \frac{T_{ж} - T(t)}{T_d F_T N} + \left(k_B + \frac{k_M k_\omega}{R_{я} + \hat{R}_{я}} \right) \omega + F_m |\omega| (s_\tau + H_{гд} C_r \omega) + \hat{M}_B \right) \frac{R_{я} + \hat{R}_{я}}{k_M k_y} \quad (24)$$

Поскольку реальную тягу двигателя $T(t)$ измерить затруднительно, то вместо $T(t)$ в выражении (24) целесообразно использовать правую часть уравнения (16). В результате в окончательной форме искомый закона управления принимает вид:

$$u = \left(J_d \frac{T_{ж} - F_\tau |\omega| s_\tau}{T_d F_T N} + \left(k_B + \frac{k_M k_\omega}{R_{я} + \hat{R}_{я}} \right) \omega + F_m |\omega| (s_\tau + H_{гд} C_r \omega) + \hat{M}_B \right) \frac{R_{я} + \hat{R}_{я}}{k_M k_y}, \quad (25)$$

который позволит описать каждый двигатель ПР в виде (16), одновременно компенсируя последствия появления любого из двух дефектов, приводящих к появлению ненулевых функций $\hat{M}_B(t)$ и $\hat{R}_{я}(t)$. Если же в процессе движения ПР дополнительно выявляются ошибки в показаниях некоторых датчиков угловых скоростей вращения двигателей, то реальные значения этих скоростей рассчитываются по выражениям $\omega(t) = y_1(t) - \hat{\omega}(t)$, которые затем используются при формировании сигналов (25) вместо сигналов, получаемых сразу же от датчиков угловых скоростей и содержащих ошибки.

Обобщенная структурная схема синтезированной системы для устранения последствий одиночных и парных дефектов показана на рис. 1. При ее работе банк, состоящий из трёх ДН (4) - (6) формирует невязки $e_y^{(1)}(t)$, $e_y^{(2)}(t)$ и $e_y^{(3)}(t)$, которые в блоке определения вида дефектов позволяют определить эти дефекты. Если какой-либо дефект выявлен, то в соответствующем ему НПС (8), (9) и (10) определяются величины $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_{я}(t)$ или $\hat{\omega}(t)$, с учетом которых формируются управляющие сигналы (25), обеспечивающие соответствующим двигателям создание желаемых тяг $T_{ж}$ с одновременной компенсацией последствий появляющихся дефектов. При обнаружении парных дефектов вместо НПС-3 используются дополнительные НПС-4 (14) и НПС-5 (15), а также блок формирования сигнала $\omega^{0ц}(t)$, который имеет на выходе величину $\omega^{0ц}(t) = \omega_1^{0ц}(t)$, когда $\hat{M}_B(t) \neq 0$, и $\omega_2^{0ц}(t)$, когда $\hat{R}_{я}(t) \neq 0$. Кроме того, в этом случае вместо сигнала от датчика угловой скорости в ДН-1 (4), ДН-2 (5), НПС-1 (8) и НПС-2 (9) используется сигнал $\omega^{0ц}(t)$.

Для проверки эффективности системы, предназначенной для устранения последствий возникающих одиночных дефектов (см. рис. 1) было проведено математическое моделирование, в ходе которого исследовалось влияние возникающих дефектов на ошибку отслеживания ПР с параметрами и высококачественной системой управления, детально описанными в работе [14], заданной траектории $x(t) = t$ м, $y(t) = 10 \sin(0.02t)$ м, $z(t) = 5 \cos(0.002t) - 5$ м.

Результаты математического моделирования для проверки эффективности системы, предназначенной для устранения последствий одиночных и парных дефектов (см. рис. 1) при их возникновении в двигателе ПР, создающем тягу продольную тягу, и без этих дефектов. показаны на рис. 2.

Цифрой 1 на рис. 2 показаны изменения ошибок отслеживания ПР заданной программной траектории, при отсутствии дефектов, а цифрой 2 изменения ошибки слежения при появлении ненулевых значений $\hat{M}_B(t) = 0.5 M_{вд}(t)$ в момент времени $t = 150$ с и $\hat{\omega}(t) = 10$ рад/с в $t = 50$ с без компенсации их последствий. В этом случае ошибка слежения увеличилась до 12.4 м (в 41.66 раз). Цифрой 3 отмечен график ошибки слежения ПР при появлении ненулевых значений $\hat{R}_{я}(t) = 0.6$ Ом с в момент времени $t = 100$ с и $\hat{\omega}(t)$. В этом случае ошибка слежения увеличивается до 1.41 м (в 4.7 раз). Цифрой 4 обозначена ошибка слежения ПР при появлении ненулевых функций $\hat{M}_B(t)$ и $\hat{R}_{я}(t)$, достигающая 21.5 м (возрастающая более чем в 71 раз). На этом же рисунке цифрой 5 обозначена ошибка отслеживания ПР программной траектории при возникновении любых сочетаний указанных парных дефектов, но при введении синтезированной системы (см. рис. 1) компенсации их последствий. Это позволило стабилизировать ошибку слежения на исходном уровне при любых сочетаниях появляющихся парных дефектов.

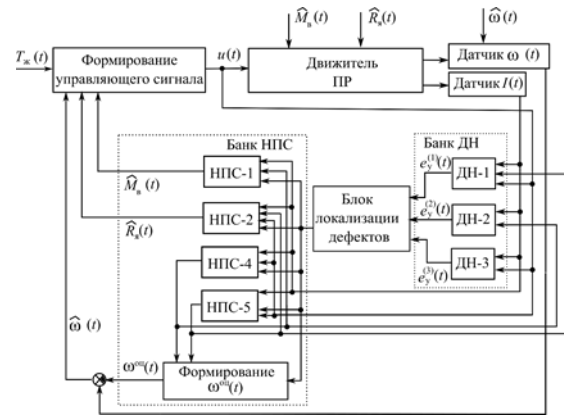


Рис. 1. Структурная схема системы для устранения последствий одиночных и парных дефектов в двигателях ПР

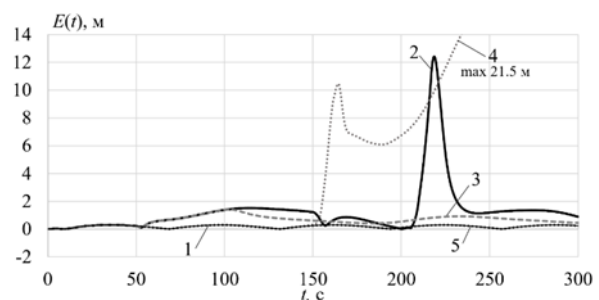


Рис. 2. Изменения ошибок слежения ПР при возникновении парных дефектов и без них

Таким образом, результаты моделирования показали, что при возникновении любого из рассмотренных парных дефектов применение систем устранения их негативных последствий (см. рис. 1) позволяет полностью сохранять исходную точность движения ПР по задаваемым траекториям. Аналогичные результаты были получены и при возникновении перечисленных дефектов в остальных двигателях ПР.

Экспериментальные исследования системы для устранения негативных последствий выявляемых дефектов

Для проверки работоспособности синтезированной системы устранения негативных последствий появляющихся дефектов кроме математического моделирования проводилась серия натуральных экспериментов с использованием электромеханического стенда, общий вид которого показан на рис. 3. Он содержит два электродвигателя постоянного тока сопоставимой мощности, соединенных ременной передачей. В состав сенсорной подсистемы стенда входят: тахогенератор для определения скорости вращения валов двигателей и датчики тока, установленные на обоих электродвигателях. Для управления стендом используется программное обеспечение Matlab. Это позволяет легко изменять структуру и параметры используемой системы управления, задавать параметры объекта управления и сохранять результаты экспериментов. Цифровое управление стендом осуществляется через ЭВМ с помощью микроконтроллера ESP-32. С его помощью в компьютер вводятся необходимые сигналы, поступающие от датчиков, находящихся в стенде, и выводятся сигналы управления электродвигателями, которые затем, усилившись с помощью двух усилителей мощности Cytron MD30B, подаются на входы электроприводов.



Рис. 3. Общий вид лабораторного электромеханического стенда

Суть проводимого эксперимента заключалась в том, чтобы с помощью предлагаемой системы компенсации последствий появившихся дефектов обеспечить точное отслеживание заданной скорости вращения выходного вала первого электродвигателя стенда, имитирующего электродвигатель движителя ПР. При этом появление дефекта имитировалось подачей постоянного ($u_2 = 7$ В) или переменного ($u_2(t) = 3.5 \sin(0.4t) + 3.5$ В) напряжения на второй электропривод стенда, которое приводило к появлению внешнего момента нагрузки $\bar{M}_B(t)$, препятствующего вращению первого электродвигателя. Появление ошибки в датчике угловой скорости имитировалось программным добавлением постоянной ($\hat{\omega} = 5$ рад/с) или

переменной ($\hat{\omega}(t) = 4 \sin(0.1t) + 2$ рад/с) величины $\hat{\omega}(t)$ к реальным показаниям датчика.

В ходе эксперимента предлагаемая система (см рис. 1) устранения негативных последствий дефектов должна обеспечивать вращение выходного вала первого электродвигателя с угловой скоростью $\omega^*(t) = 4 \sin(0.15t) + 16$ рад/с. Так как управление электроприводом осуществлялось по скорости, а не по тяге, вместо закона управления (25) использовался закон, устраняющий влияние дополнительного момента нагрузки $\bar{M}_B(t)$ на скорость вращения двигателя вида:

$$u(t) = \bar{U}(t) + \frac{R_{я}}{k_{\omega} k_M} \bar{M}_B(t), \quad (26)$$

где $\bar{U}(t)$ сигнал управления, формируемый типовым ПИД-регулятором.

На рис. 4 и 5 показаны ошибки управления скоростью электродвигателя при введении парных дефектов. При этом сначала в момент времени $t = 70$ с осуществлялась подача переменного напряжения на второй электропривод стенда, обеспечивая переменность момента $\bar{M}_B(t)$, а в момент времени $t = 120$ с добавлялась постоянная (рис. 4) или переменная (рис. 5) ошибка $\hat{\omega}(t)$. Из этих рисунков видно, что указанные парные дефекты приводят к увеличению максимальной ошибки управления скоростью вращения первого двигателя до 7.5 рад/с (в 9.37 раз) в первом случае и до 6.9 рад/с (в 8.62 раз) во втором. Использовании системы устранения негативных последствий выявленных дефектов (см. рис. 1) снижает эти ошибки до 1.6 рад/с и до 1.7 рад/с.

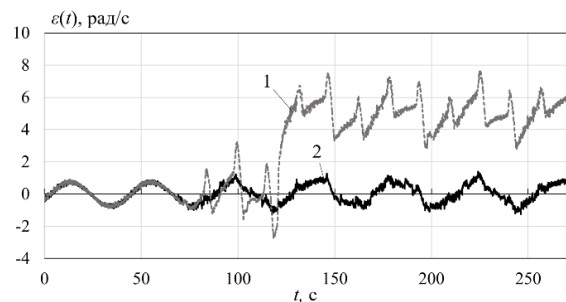


Рис. 4. Ошибка управления скоростью вращения первого электродвигателя при постоянной ошибке в показаниях его датчика скорости и при подаче переменного напряжения на второй электродвигатель

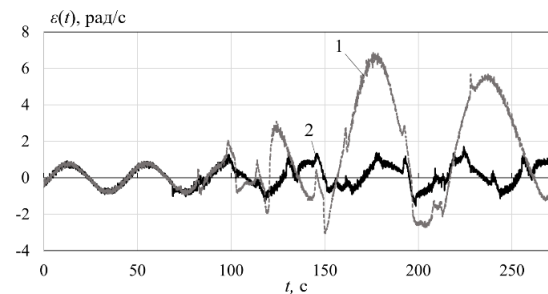


Рис. 5. Ошибка управления скоростью вращения первого электродвигателя при переменной ошибке в показаниях его датчика скорости и при подаче переменного напряжения на второй электродвигатель

Таким образом, при появлении переменной величины $\hat{M}_B(t)$ и постоянной $\hat{\omega}(t)$ применение системы устранения негативных последствий выявляемых дефектов позволяет снизить ошибку управления 4.68 раз, а при переменной $\hat{M}_B(t)$ и переменной $\hat{\omega}(t)$ в 4.05 раз.

Результаты натуральных экспериментов и исследования синтезированной системы устранения последствий выявляемых дефектов в движителях подводных роботов полностью подтвердили ее высокую эффективность при появлении различных как одиночных, так и парных дефектов.

Заключение

В статье был разработан метод синтеза легкорезализуемых адаптивных систем обнаружения, идентификации и устранения последствий дефектов. За счет использования НПС, построенных на основе только упрощенных моделей объекта диагностирования, эти системы обеспечивают

точную оценку величин одиночных и парных отклонений всех параметров движителей ПР от своих номинальных значений и ошибок в показаниях датчиков их угловых скоростей, которые обусловлены появлением этих дефектов. На основе известного метода синтеза нелинейных регуляторов были разработаны системы для компенсации последствий одиночных и парных дефектов, которые за счет формируемых дополнительных управляющих воздействий позволяют сохранить работоспособность и обеспечить стабилизацию важнейших характеристик этих движителей при неожиданном появлении дефектов. Эти воздействия формируются с учётом оценок величин отклонений параметров движителей от своих номинальных значений и ошибок в показаниях датчиков угловых скоростей. Работоспособность и высокая эффективность разработанной системы была подтверждена посредством цифрового моделирования и натуральных экспериментов с использованием электромеханического стенда.

Литература

1. Агеев М. Д., Киселев Л. В., Матвиенко Ю. В. Автономные подводные роботы. Системы и технологии // М.: Наука. 2005. 400 с.
2. Yuh J., Marani G., Blidberg D. Applications of marine robotic vehicles // Intelligent Service Robotics. 2011. Vol. 4. No. 4. P. 221-231.
3. Инзарцев А. В., Грибова В. В., Клещёв А. С. Интеллектуальная система для формирования адекватного поведения автономного подводного робота в аварийных ситуациях // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 4-11.
4. Frank P. M. On-line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: A survey // International Journal Systems Science. 1994. № 25(12). P. 2129-2154.
5. Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Жирабок А. Н., Проценко А. А. Разработка системы аккомодации к дефектам в движителях подводных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. № 22(5). С. 262-271.
6. DeWijns B. AUV/ROV propulsion thrusters // OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Providence, RI, USA. 2000. Vol. 1. P. 173-176.
7. Choi J. -K., Kondo H. On fault-tolerant control of a hovering AUV with four horizontal and two vertical thrusters // OCEANS'10 IEEE SYDNEY, Sydney, Australia. 2010. P. 1-6.
8. Агеев М. Д. Упрощенная методика расчета движителей для АПА // Подводные роботы и их системы. 1995. С. 33-49.
9. Жирабок А. Н., Усольцев С. А. Линейные методы при диагностировании нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. 2000. № 7. С. 149-159.
10. Жирабок А. Н., Зуев А. В., Шумский А. Е. Диагностирование линейных динамических систем: подход на основе скользящих наблюдателей // Автоматика и телемеханика. 2020. № 2. С. 18-35.
11. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding Mode Observers for Fault Detection and Isolation // Automatica. 2000. Vol. 36. P. 541-553.
12. Zhirabok A., Zuev A., Filaretov V., Protchenko A., Chung Il. K. Robust virtual sensors design for linear and nonlinear systems under external disturbances // International journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2023. P. 1-16.
13. Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А. Устройства и системы управления подводных роботов // М.: Наука. 2005. С. 270.
14. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А. Двухконтурная система с эталонной моделью для управления пространственным движением грузового необитаемого подводного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 3. С. 134-144.

References

1. Ageev M. D., Kiselev L. V., Matvienko YU. V. Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii. [Autonomous underwater robots. Systems and technologies] M.: Nauka. 2005. 400 p.
2. Yuh J., Marani G., Blidberg D. Applications of marine robotic vehicles. Intelligent Service Robotics. 2011. Vol. 4. No. 4. P. 221-231.
3. Inzarcev A. V., Gribova V. V., Kleshchiov A. S. Intellektual'naya sistema dlya formirovaniya adekvatnogo povedeniya avtonomnogo podvodnogo robota v avarijnyh situacijah [Intelligent system for the formation of adequate behavior of an autonomous underwater robot in emergency situations] Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2015. No. 2 (20). P. 4-11.
4. Frank P. M. On-line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: A survey. International Journal Systems Science. 994. No. 25(12). P. 2129-2154.

5. Filaretov V. F., Zuev A. V., Zhirabok A. N., Procenko A. A. Razrabotka sistemy akkomodatsii k defektam v dvizhiteleyah podvodnyh robotov [Development of an accommodation system for defects in underwater robot propellers] Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2021. No. 22(5). P. 262-271.
6. DeWijns B. AUV/ROV propulsion thrusters. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Providence, RI, USA. 2000. Vol. 1. P. 173-176.
7. Choi J. -K., Kondo H. On fault-tolerant control of a hovering AUV with four horizontal and two vertical thrusters. OCEANS'10 IEEE SYDNEY, Sydney, Australia. 2010. P. 1-6.
8. Ageev M. D. Uproshchennaya metodika rascheta dvizhitelej dlya APA [Simplified method of calculating propellers for AUV] Podvodnye roboty i ih sistemy. 1995. P. 33-49.
9. Zhirabok A. N., Usol'cev S. A. Linejnye metody pri diagnostirovanii nelinejnyh sistem [Linear methods in the diagnosis of nonlinear systems] Avtomatika i telemekhanika. 2000. No. 7. P.149-159.
10. Zhirabok A. N., Zuev A. V., SHumskij A. E. Diagnostirovanie linejnyh dinamicheskikh sistem: podhod na osnove skol'z'yashchih nablyudatelej [Diagnostics of linear dynamical systems: an approach based on sliding observers] Avtomatika i telemekhanika. 2020. No. 2. P.18-35.
11. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding Mode Observers for Fault Detection and Isolation. Automatica. 2000. Vol. 36. P. 541-553.
12. Zhirabok A., Zuev A., Filaretov V., Procenko A., Chung Il. K. Robust virtual sensors design for linear and nonlinear systems under external disturbances. International journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2023. P. 1-16.
13. Filaretov V. F., Lebedev A. V., YUhimec D. A. Ustrojstva i sistemy upravleniya podvodnyh robotov [Devices and control systems of underwater robots] M.: Nauka. 2005. 270 p.
14. Filaretov V. F., YUhimec D. A. Dvuhkonturnaya sistema s etalonnoj model'yu dlya upravleniya prostran-stvennym dvizheniem gruzovogo neobitaemogo podvodnogo apparata [A two-circuit system with a reference model for controlling the spatial movement of an uninhabited cargo underwater vehicle] Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2021. Vol. 22. No. 3. P. 134-144.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Зуев Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией интеллектуальных информационных систем для морских роботов, Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, 690091, г. Владивосток, ул.Суханова, д.5а, e-mail: zuev@dvo.ru.

Филаретов Владимир Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией робототехнических систем Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН, главный научный сотрудник Севастопольского государственного университета, 690041, г.Владивосток, ул. Радио, д.5, e-mail: filaretov@inbox.ru

Жирабок Алексей Нилович, доктор технических наук, профессор, профессор департамента автоматизации и робототехники, Дальневосточный Федеральный университет, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п.Аякс, 10, e-mail: zhirabok@mail.ru

Проценко Александр Анатольевич, научный сотрудник, Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, 690091, г. Владивосток, ул.Суханова, д.5а, e-mail: protsenko_aa@dvfu.ru.

Alexander V. Zuev, Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Deputy Director for Scientific Work, Head of the Laboratory of Intelligent Information Systems for Marine Robots, M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems named after Academician FEB RAS, 690091, Russian Federation, Vladivostok, Sukhanova str., 5a, e-mail: zuev@dvo.ru.

Vladimir F. Filaretov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Laboratory of Robotic Systems of the Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Chief Researcher of Sevastopol State University, 690041, Vladivostok, Radio str., 5, e-mail: filaretov@inbox.ru

Alexey N. Zhirabok, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Automation and Robotics, Far Eastern Federal University, 690922, Russian Federation, Vladivostok, Russian island, Ajax, 10, e-mail: zhirabok@mail.ru

Alexander A. Protsenko, Researcher, Institute of Marine Technology Problems. Academician M.D. Ageeva FEB RAS, 690091, Russian Federation, Vladivostok, Sukhanova str., 5a, e-mail: protsenko_aa@dvfu.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2023.

Научная статья

УДК 004.942

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.063>

Сравнительное исследование методов оценки вектора состояния движущихся объектов

Немиро И.Е.^{1,2} nemiro.ie@students.dvfu.ru, Губанков А.С.^{1,3,4} gubankov@dvo.ru¹МГУ им. адм. Г.И. Невельского, ²Дальневосточный федеральный университет, ³Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, ⁴Севастопольский государственный университет

Аннотация. В статье рассмотрена разработка метода оценки вектора состояния движущегося объекта в условиях, когда данные от датчиков приходят с низкой частотой, а сами измерения сильно зашумлены. Для восстановления вектора состояния объекта применяется фильтр Калмана. Ввиду низкой частоты обновления вектора измерений предлагается повысить частоту прогнозирования состояния движущегося объекта между этими обновлениями. Проблема выделения движущегося объекта на фоне помех в работе решается с помощью трех различных методов: метода ближайшего соседа, вероятностного метода объединения данных, нечеткой логики. Представлено сравнение результатов моделирования разработанного алгоритма с использованием трех рассмотренных методов. При использовании нечеткой логики рассматривается значительно меньше ложных измерений, чем при использовании двух других методов, поскольку измерение движущегося объекта выбирается на основе нескольких критериев.

Ключевые слова: Оценка вектора состояния, отслеживание объектов, фильтр Калмана, метод ближайших соседей, вероятностный метод объединения данных, нечеткая логика.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, проект FEFM-2021-0014.

Для цитирования: Немиро И.Е., Губанков А.С. Сравнительное исследование методов оценки вектора состояния движущихся объектов, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 32—41. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.063

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.063>

Studies of state vector estimation methods for dynamic objects

Irina E. Nemiro^{1,2} nemiro.ie@students.dvfu.ru, Anton S. Gubankov^{1,3,4} gubankov@dvo.ru¹Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, ²Far Eastern Federal University, ³Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, ⁴Sevastopol State University

Abstract. The article considers the studies of various state vector estimation methods of dynamic objects in conditions when measurements of the object's position are received with a low frequency, and there are a large number of false measurements. The state vector of a moving object is estimated using the Kalman filter. The problem of low frequency of updating the measurement vector is solved by increasing the frequency of prediction of the state vector of the object between these updates. The problem of identifying a moving object at noisy measurements is solved using various methods: the nearest neighbor method, the probabilistic method of data association, and fuzzy logic. The article presents a comparison of the simulation results of the developed algorithm for estimating the state vector of dynamic objects using three methods. When using fuzzy logic to allocate measurements of an object, the algorithm shows better results than when using the nearest neighbor method or the probabilistic data association method.

Keywords: State vector estimation, tracking, extended Kalman filter, nearest neighbor, probabilistic data association, fuzzy logic.

Financial Support: This work is supported Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation, project FEFM-2021-0014.

For citation: Irina E. Nemiro, Anton S. Gubankov, Studies of state vector estimation methods for dynamic objects, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 32—41. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.063

Введение

Методы оценки вектора состояния применяются для решения задач навигации, управления, диагностики, отслеживания движущихся объектов (трекинга) и т.д. [1–4]. Слежение за объектами традиционно встречается в задачах разного рода локации и оптического наблюдения. В воздушной среде и при дневном освещении отслеживание объектов происходит достаточно точно. В условиях же подводной среды или ночью получение информации о положении объекта может происходить с низкой частотой, а также с

повышенным количеством помех. На сегодняшний день существует достаточно много работ, посвященных отслеживанию объектов, но малое число из них содержит описание эффективных методов оценки вектора состояния объектов в условиях, когда присутствует большое число зашумленных измерений, а обновление вектора измерений происходит с низкой частотой.

Для решения задач трекинга объектов распространено применение фильтра Калмана [1]. В работах [5, 6] доказана его лучшая работоспособность по сравнению с альфа-бета и альфа-бета-гамма фильтрами. Результаты

исследований, представленные в указанных выше работах, обосновывают выбор фильтра Калмана в качестве инструмента для восстановления вектора состояния движущегося объекта.

При получении набора измерений на некоторых итерациях работы алгоритма нередко проблема окклюзии (перекрытия наблюдаемого объекта стационарными объектами переднего плана или близкого расположения наблюдаемых объектов), решение которой предложено в статьях [7–10]. В моменты времени, когда измерения отслеживаемого объекта не могут быть получены, предлагается [7–9] продолжать прогнозирование его вектора состояния, не выполняя этап коррекции фильтра Калмана на текущей итерации. Описанное решение может быть использовано в данной работе, но стоит учесть, что это решение применяется для наблюдения за объектами с помощью видеокамеры при хорошей освещенности, для которой частота формирования информации об объекте значительно высока. Ввиду же низкой частоты обновления измерительной информации об объекте, следует ввести повышенную частоту прогнозирования состояния между получениями измерений.

В работе [11] приводятся методы объединения (ассоциации, привязки) данных в случае сопровождения одной или нескольких целей, их достоинства и недостатки. Рассмотрены такие методы, как метод ближайшего соседа (выбор ближайшего измерения), метод сильнейшего соседа (выбор измерения с наибольшим значением отношения сигнал/шум), вероятностный метод объединения данных, вариации совместного вероятностного объединения данных.

В статье [12] отмечено, что для сопровождения объектов часто используется метод ближайшего соседа. В работе [10] предлагается использовать метод взвешенного ближайшего соседа и оценивать дистанцию между предыдущим и текущим полученными измерениями объекта. Этот метод работает достаточно точно в рассмотренной статье ввиду того, что получение измерений положения объекта происходит с использованием видеокамеры. Ввиду же низкой частоты формирования измерений в данной работе, во избежание ошибок при определении каждого нового измерения целесообразно первым делом спрогнозировать положение объекта на текущем шаге, после чего оценивать расстояние между измерением и спрогнозированным положением сопровождаемого объекта.

В последнее время все большее распространение получают интеллектуальные методы, в частности методы, основанные на нечеткой логике [13, 14]. В статье [13] представлен метод отождествления воздушных объектов, основанный на использовании положений нечеткой логики, что позволяет применять единый подход к обработке как координатных параметров измерений, так и некоординатных параметров (качественных признаков) объектов. В статье [14] предлагается способ обнаружения траектории объекта с использованием нечеткого логического вывода, а также приводится его сравнение с алгоритмом, основанным на логических критериях. По результатам сравнения двух алгоритмов автором отмечается, что в случаях сложной помеховой

обстановки использование предложенной методики позволяет снизить вероятность формирования ложных траекторий на 27%. Сложность применения нечеткой логики заключается в выборе оптимальных ограничений функций принадлежности.

Таким образом, в работе для восстановления вектора состояния предлагается использовать фильтр Калмана. Для решения проблемы, связанной с низкой частотой обновления вектора измерений, предлагается между получениями измерений выполнять прогнозирование состояния движущегося объекта с повышенной частотой. Для решения проблемы выделения объекта на фоне помех в работе предлагается рассмотреть 3 различных метода: метод ближайшего соседа, вероятностный метод объединения данных, нечеткую логику – и произвести сравнение результатов их работы.

В разделе 1 работы приводится общее описание разработанного алгоритма. В разделе 2 представлено математическое описание алгоритма: метода восстановления вектора состояния движущегося объекта, а также трех методов выделения измерений объекта на фоне помех. В разделе 3 представлены результаты моделирования алгоритма на сгенерированных данных, а также описано сравнение трех рассматриваемых методов выделения реальных измерений объекта.

1 Общее описание работы алгоритма

Блок-схема разработанного алгоритма изображена на рисунке 1. Алгоритм состоит из двух основных этапов: этапа обнаружения движущихся объектов и этапа последующего сопровождения обнаруженных движущихся объектов, блок-схема которых представлена на рисунке 2. Сразу после запуска выполняется лишь этап обнаружения. После обнаружения первого движущегося объекта начинается свою работу этап сопровождения. С началом работы этапа сопровождения этап обнаружения движущихся объектов продолжается: он выполняется на каждой итерации алгоритма после выполнения этапа сопровождения уже обнаруженных движущихся объектов. Это позволяет обнаруживать и сопровождать движущиеся объекты, которые появились в зоне видимости в любое время после запуска алгоритма.

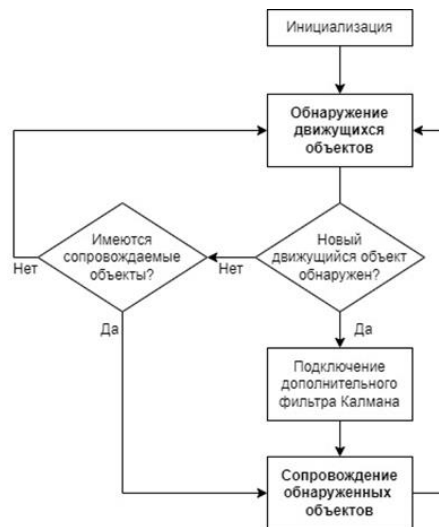


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

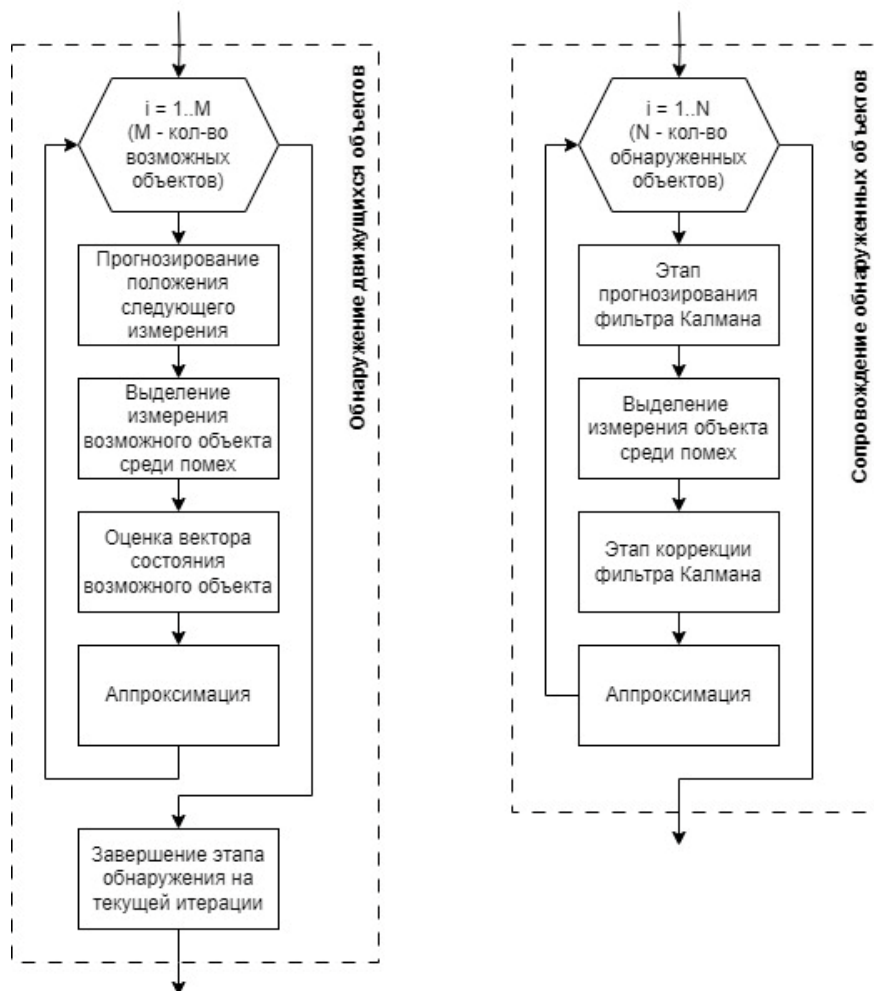


Рис. 2. Блок-схема двух основных этапов алгоритма

На этапе сопровождения обнаруженных движущихся объектов для восстановления вектора состояния в работе применяется расширенный фильтр Калмана. Число одновременно работающих фильтров Калмана соответствует числу сопровождаемых объектов и может изменяться на протяжении всей работы алгоритма.

Перед тем, как оценивать вектор состояния на этапе обнаружения или корректировать спрогнозированные значения параметров вектора состояния с использованием фильтра Калмана на этапе сопровождения, требуется выделить реальное измерение для каждого из объектов среди помех. Для выделения измерений объектов на фоне помех в данной работе используется три различных метода: метод ближайшего соседа (kNN), вероятностный метод сопоставления данных (PDA), а также нечеткая логика (FL).

В реальных условиях измерительная информация об объекте содержит существенные погрешности. Это может приводить к неточностям при прогнозировании изменения вектора состояния объекта, что, в свою очередь, может приводить к значительным неточностям оценки вектора состояния объекта или к потере сопровождаемого движущегося объекта. Для устранения этого недостатка в данной работе сразу после уточнения вектора состояния объекта (на обоих этапах

алгоритма) выполняется аппроксимация последовательности ранее рассчитанных векторов состояния объекта.

2 Математическое описание алгоритма

2.1 Восстановление вектора состояния движущегося объекта

В работе перемещение объекта во времени представляется твердым телом, имеющим ориентацию и движущимся равноускорено. Вектор состояния объекта имеет вид:

$$x = [p_x \ v_x \ a_x \ p_y \ v_y \ a_y \ \omega]^T, \quad (1)$$

где p_x, p_y – координаты положения объекта в двумерной декартовой системе координат; v_x, v_y, a_x, a_y – соответствующие составляющие линейных скорости и ускорения объекта; ω – угловая скорость объекта.

Поскольку отслеживаемые объекты имеют ориентацию, для восстановления вектора состояния объекта применяется расширенный фильтр Калмана. Фильтр Калмана включает модель системы и модель наблюдения:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}), \quad (2)$$

$$z_k = h(x_k, v_k), \quad (3)$$

где k – номер итерации; x – вектор состояния; u – вектор управляющих воздействий (причем $u_{k-1} = 0$,

так как управление объектом в данной работе не предусматривается); w – вектор ошибки модели (ошибка имеет нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей Q); z – вектор измерений/наблюдения; v – вектор ошибок измерения (ошибка имеет нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей R).

Процесс работы фильтра Калмана, как известно, состоит из двух этапов: прогнозирование и коррекция. При классической работе фильтра Калмана, когда эти этапы чередуются, из-за погрешностей измерений и из-за того, что данные приходят редко, возникают серьезные ошибки при отслеживании, особенно при движении объекта по криволинейной траектории. По этой причине в данной работе этап прогнозирования фильтра Калмана выполняется с повышенной частотой на промежутках времени между получениями измерений (рис. 3). Таким образом, на этапе прогнозирования с заданной частотой оцениваются параметры состояния движущегося объекта, а при получении новых измерений выполняется этап коррекции. На рисунке 3 приняты следующие обозначения: x^-, x^+ – соответственно прогнозное и скорректированное значения вектора состояния объекта; P^-, P^+ – соответственно прогнозная и скорректированная матрицы ковариации состояния объекта; F – матрица процесса (матрица частных производных

$$\frac{\partial f_k}{\partial x} \Big|_{x_k^+}; \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} -$$

– матрица наблюдений.



Рис. 3. Процесс работы фильтра Калмана

На этапе обнаружения движущихся объектов прогнозирование состояния объекта рассчитывается аналогично прогнозированию состояния в фильтре Калмана:

$$\tilde{x}_k = F\hat{x}_{k-1}, \quad (4)$$

где \tilde{x} – прогнозное значение вектора состояния предполагаемого реального движущегося объекта; \hat{x} – оценка вектора состояния (1) на предыдущем шаге.

Координаты положения для оценок векторов состояния \hat{x} предполагаемых движущихся объектов принимаются равными полученным измерениям координат объекта, а линейные скорости и ускорения рассчитываются с помощью формул численного дифференцирования:

$$\begin{aligned} v_k &= (p_k - p_{k-2})\Delta t, \\ a_k &= (v_k - v_1)(k - 2\Delta t). \end{aligned} \quad (5)$$

В работе выполняется аппроксимация функции многочленом порядка P . Аппроксимируются координаты положения объекта. Изменения координат положения во времени могут быть описаны с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} p_x(t) &= k_{x0} + k_{x1}t + k_{x2}t^2 + \dots + k_{xP}t^P, \\ p_y(t) &= k_{y0} + k_{y1}t + k_{y2}t^2 + \dots + k_{yP}t^P, \end{aligned} \quad (6)$$

где t – интервал времени между получениями измерений; $k_{x0} \dots k_{xP}, k_{y0} \dots k_{yP}$ – коэффициенты аппроксимирующих многочленов.

Ниже представлен метод определения коэффициентов аппроксимирующих многочленов только для координаты $p_x(t)$. Для координаты $p_y(t)$ коэффициенты многочлена определяются аналогично. Для определения величин $k_{x0} \dots k_{xP}$ используется метод наименьших квадратов. Равенство (6) перепишем в матричном виде:

$$p_x(t) = [k_{x0} \ k_{x1} \ k_{x2} \ \dots \ k_{xP}] [1 \ t \ t^2 \ \dots \ t^P]^T. \quad (7)$$

Последовательность измерений $p_x(t)$ запишем в вектор X :

$$X = [p_x(0) \ p_x(t) \ p_x(2t) \ \dots \ p_x((N-1)t)]^T, \quad (8)$$

где N – число рассматриваемых ранее рассчитанных векторов состояния.

С учетом выражений (7) и (8) можно записать:

$$X = \Phi k, \quad (9)$$

где $\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & t & t^2 & \dots & t^P \\ 1 & 2t & (2t)^2 & \dots & (2t)^P \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & (N-1)t & ((N-1)t)^2 & \dots & ((N-1)t)^P \end{bmatrix}$,
 $k = [k_{x0} \ k_{x1} \ k_{x2} \ \dots \ k_{xP}]^T$ – вектор коэффициентов многочлена.

Оценка вектора коэффициентов вычисляется по формуле:

$$k = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T X. \quad (10)$$

Матрица $[\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T$ остается неизменной, если период внесения новых данных в вектор X постоянен. Поэтому в таком случае матрица $[\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T$ может быть вычислена заранее, что существенно снижает вычислительную сложность алгоритма.

Величина P определяет точность аппроксимации и зависит от характера движения объекта. Чем выше порядок аппроксимирующего многочлена, тем точнее оценка процесса изменения координат, но тем меньше подавляются шумы.

В разработанной программе перед началом моделирования возможно задание вручную как порядка многочлена P , так и числа N рассматриваемых предыдущих измерений. При этом важно учитывать, что $N \geq P + 1$. Причем после начала моделирования для выполнения аппроксимации в первый раз алгоритм не будет ждать, когда накопятся первые N измерений. Аппроксимация впервые выполняется, когда число измерений становится равным $(P + 1)$. В этом случае при первых вычислениях аппроксимации не будет использоваться неизменная заранее рассчитанная матрица $[\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T$, о чем говорилось выше, до тех пор, пока не накопится число измерений, равное N .

2.2 Выделение реальных измерений движущегося объекта среди помех

2.2.1 Метод ближайшего соседа

Метод ближайшего соседа в данной работе работает следующим образом: прогнозируется следующее положение предполагаемого движущегося объекта, а затем оцениваются расстояния от прогнозного положения объекта до каждого из новых измерений на текущей итерации и выбирается ближайшее среди них. Если это ближайшее измерение попадает в область обнаружения (круг заданного радиуса, где центр круга – прогнозное положение движущегося объекта), то оно присваивается траектории объекта.

В качестве сравнительной характеристики отслеживаемого объекта и каждого из новых полученных измерений используется следующая функция (на этапе обнаружения и этапе сопровождения объектов соответственно):

$$d = \|H\tilde{x} - z\| \text{ и } \tilde{d} = \|Hx^- - z\|. \quad (11)$$

Причем чем меньше вычисленное значение, тем более вероятна принадлежность нового измерения треку.

2.2.2 Вероятностный метод объединения данных

Вероятностный метод объединения данных, в отличие от kNN, позволяет более мягко определить новое измерение объекта. Выделяются все измерения, попадающие в эллипс (область обнаружения), после чего вычисляется средневзвешенное значение этих измерений. Это позволяет получить более точную оценку измерения объекта.

Область поиска в методе PDA представляет собой эллипс. Он определяется из условия:

$$y_k^T S^{-1} y_k \leq Y, \quad (12)$$

где $y_k = z_k - Hx_k^-$ – невязка измерения; S – ковариация невязки обнаружения; Y – порог пропускания.

После получения очередного набора измерений, из условия (12) определяется, попадает ли каждое из измерений в заданную область. При попадании измерения в эллипс для каждого из этих измерений рассчитывается вероятность его истинности по формуле:

$$\beta_i = \frac{e_i}{b + \sum_{j=1}^m e_j}, \quad (13)$$

где $i = 1 \dots m$, причем m – количество измерений, попавших в эллипс;

$$e_i = e^{-\frac{1}{2} y_k^T S^{-1} y_k},$$

$$b = \left(\frac{2\pi}{\gamma}\right)^{\frac{n_z}{2}} m \cdot c_{n_z}^{-1} \frac{1 - P_D P_G}{P_D},$$

$$\gamma_i = \frac{1}{m} P_D P_G, \quad i = 1 \dots m,$$

где для $n_z = 2$: $c_{n_z} = \pi/2$; P_D – вероятность того, что в эллипс попало реальное измерение объекта; P_G – вероятность того, что в эллипс попало хотя бы одно измерение.

Кроме того, требуется также знать значение вероятности того, что в эллипс не попало реальное измерение объекта. Она вычисляется аналогично:

$$\beta_0 = \frac{b}{b + \sum_{j=1}^m e_j}, \quad (14)$$

$$\gamma_0 = 1 - P_D P_G.$$

Алгоритм PDA легко интегрируется вместе с фильтром Калмана. Для возможности применения условия (12), требуется рассчитывать значение матрицы S сразу после окончания вычислений на этапе прогнозирования фильтра Калмана. На этапе коррекции фильтра Калмана выражения для уточнения вектора состояния и ковариационной матрицы состояния преобразуются к следующим:

$$x_k^+ = x_k^- + K_k \sum_{i=1}^N \beta_i (z_i - h(x_k^-, 0)), \quad (15)$$

$$P_k^+ = P_k^- - (1 - \beta_0) K_k S_k K_k^T + P_k,$$

где

$$P_k = K_k \sum_{i=1}^N [\beta_i (z_i - h(x_k^-, 0))(z_i - h(x_k^-, 0))^T - (\delta y)(\delta y)^T] K_k^T,$$

$$\delta y = \sum_{j=1}^N \beta_j (z_j - h(x_k^-, 0)).$$

Использование метода PDA вместо метода kNN может быть осуществлено только на втором этапе алгоритма – этапе последующего сопровождения обнаруженного движущегося объекта. Метод PDA не может быть использован на этапе обнаружения, так как для его работы требуются ковариационные матрицы. В связи с этим на первом этапе алгоритма для выделения движущихся объектов на фоне помех используется метод kNN.

2.2.3 Нечеткая логика

Методы kNN и PDA представляют собой готовые алгоритмы. С помощью этих методов реальные измерения объектов определяются лишь по отклонениям их координат, ввиду чего сложно подобрать оптимальные ограничения. Нечеткая логика позволяет получить нечеткие заключения о выборе реального измерения объекта среди помех на основе нечетких условий. Главным ее преимуществом по сравнению с двумя другими рассмотренными методами является возможность принимать решение, оценивая одновременно несколько входных параметров. Таким образом, использование нечеткой логики позволяет выбирать реальные измерения движущихся объектов, основываясь не только на оценке расстояния от предсказания до каждого нового измерения, что применяется в методах kNN и PDA, но также на оценках линейной и угловой скоростей. Кроме того, в реальных условиях важно также использовать еще один параметр – отношение сигнал/помеха, что потенциально должно улучшить выбор реальных измерений объекта и более эффективно отсеивать помехи.

В качестве входных лингвистических переменных рассматриваются «расстояние от прогнозного положения до полученного измерения» (с терминами «близко» и «далеко»), «линейная скорость» (с терминами «низкая», «средняя», «высокая»), «угловая скорость» (с терминами «низкая», «высокая») и «отношение сигнал/помеха» (с терминами «низкий», «высокий»). Выходная лингвистическая переменная – «решение о принятии измерения за реальное» (с терминами «реальное измерение» и «помеха»).

Для осуществления выбора реальных измерений среди помех посредством нечеткой логики было задано 24 нечетких правила, отражающих выбор

измерений в различных ситуациях. В каждом из правил нечеткие высказывания соединены с использованием конъюнкции. Например, первое правило выглядит следующим образом:

Если «Близко» И «Средняя линейная скорость» И «Низкая угловая скорость» И «Высокий сигнал/помеха», то «Реальное измерение».

При этом в каждом из нечетких высказываний определены функции принадлежности для каждого термина лингвистической переменной (рис. 4). Согласно рис. 4 выполняется фаззификация – установление соответствия между численным значением входной переменной и значением функции принадлежности соответствующего ей термина лингвистической переменной.

Дефаззификация может выполняться с использованием различных методов, в данной работе числовое значение выходной переменной определяется согласно следующему выражению:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{k_p} p_i + 0,5 \sum_{l=1}^{k_b} b_l}{\sum_{i=1}^{k_p} p_i + \sum_{l=1}^{k_b} b_l + \sum_{j=1}^{k_n} n_j}, \quad (16)$$

где p_i , b_l , n_j – степень истинности правила с лингвистическим значением «Реальное измерение», «Реальное измерение или помеха» и «Помеха» соответственно; k_p , k_b , k_n – количество правил с лингвистическим значением «Реальное измерение», «Реальное измерение или помеха» и «Помеха» соответственно.

Причем степень истинности каждого из правил определяется на основе известных значений

истинности составляющих его высказываний при помощи конъюнкции:

$$\mu = \mu_d \cdot \mu_v \cdot \mu_w \cdot \mu_{sn} = \min(\mu_d, \mu_v, \mu_w, \mu_{sn}), \quad (17)$$

где μ – общее обозначение степени истинности правила, обозначенной в (16) как p , b или n ; μ_d , μ_v , μ_w , μ_{sn} – значение функции принадлежности термина лингвистической переменной «расстояние от прогнозного положения до полученного измерения», «линейная скорость», «угловая скорость» и «отношение сигнал/помеха» соответственно.

Таким образом, числовым значением выходной переменной (16) является число, принадлежащее отрезку $[0; 1]$, определяющее вероятность того, насколько рассматриваемое измерение является реальным измерением. Из всех измерений на текущей итерации выбирается то, для которого это значение вероятности наибольшее. В том случае, если P для выбранного измерения больше, чем некоторое заданное значение, это измерение присваивается траектории движущегося объекта.

В разработанном алгоритме нечеткая логика используется как на этапе сопровождения уже обнаруженных объектов, так и на этапе обнаружения движущихся объектов.

Перед запуском программы пользователю предоставляется возможность задать числовые ограничения функций принадлежности для термов лингвистических переменных. В настоящей работе приняты значения, обозначенные на графиках на рис. 4.

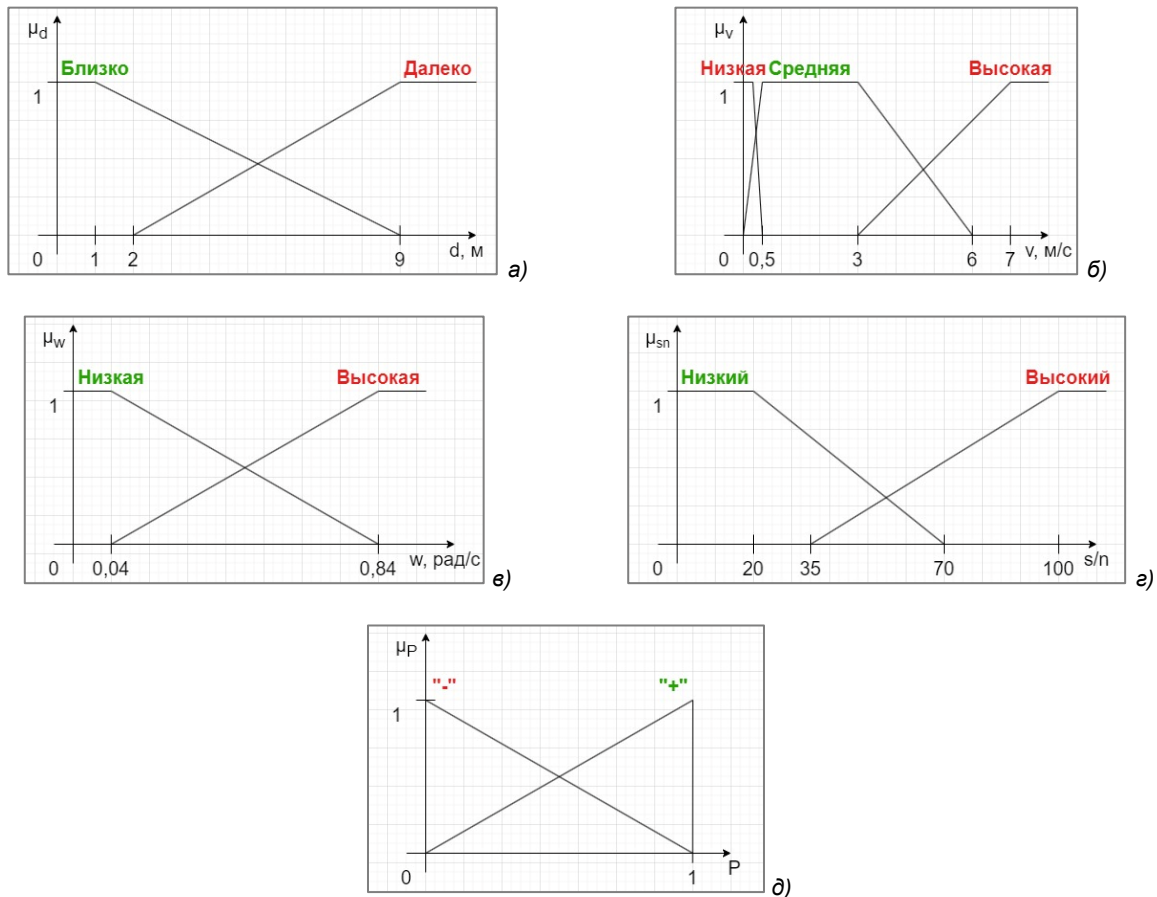


Рис. 4. Функции принадлежности для входных и выходных переменных: а) расстояние, б) линейная скорость, в) угловая скорость, г) сигнал/помеха, д) выходная переменная

3. Результаты моделирования

Сгенерированные данные включают в себя 3 движущихся объекта. При моделировании новые измерения поступали каждые 1,5 секунды, а прогнозирование состояния на этапе сопровождения обнаруженных объектов происходило каждую 0,01 секунды. Скорости объектов составляют 1,5–2 м/с.

На рисунках 5–7 приведены результаты работы на сгенерированных данных трех методов: метода kNN, метода PDA и нечеткой логики соответственно. Ограничения по расстоянию от предсказания до каждого нового измерения в методах kNN и PDA были приняты равными 9 метров, что соответствует ограничению для термина «Близко» соответствующей лингвистической переменной в нечеткой логике (рис. 4а). Как видно, движущиеся объекты сопровождалась с использованием каждого из рассмотренных методов. При отслеживании объектов при помощи алгоритмов kNN и PDA были получены близкие результаты, хотя при использовании метода PDA было выделено меньше ложных объектов при рассмотренных ограничениях. Как видно на рис. 7, в результате же применения нечеткой логики для выделения движущихся объектов был обнаружен всего один ложный объект,

что показывает его лучшую работу по сравнению с двумя другими рассмотренными методами. Это связано с тем, что в FL измерение выбирается исходя не только из расстояния до него от прогнозного значения, но также основываясь на линейной и угловой скоростях объекта. Включение же в нечеткие правила лингвистической переменной «отношение сигнал/помеха» при использовании алгоритма FL в реальных условиях также позволит значительно сократить число выбранных ложных измерений на каждой итерации.

На рисунке 8 показан результат моделирования без выполнения этапа прогнозирования с повышенной частотой между получениями измерений (а также без постоянного выполнения этапа обнаружения), что доказывает, что его введение в алгоритм было необходимым для точного сопровождения объектов. По приведенному результату можно видеть, что действительно при классической работе фильтра Калмана из-за погрешностей измерений и из-за того, что данные приходят редко, возникают серьезные ошибки при отслеживании, особенно при движении объектов по криволинейной траектории.

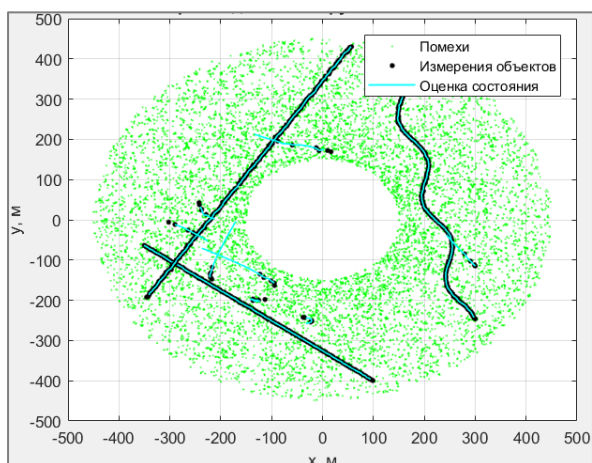


Рис. 5. Результат сопровождения движущихся объектов с помощью метода kNN

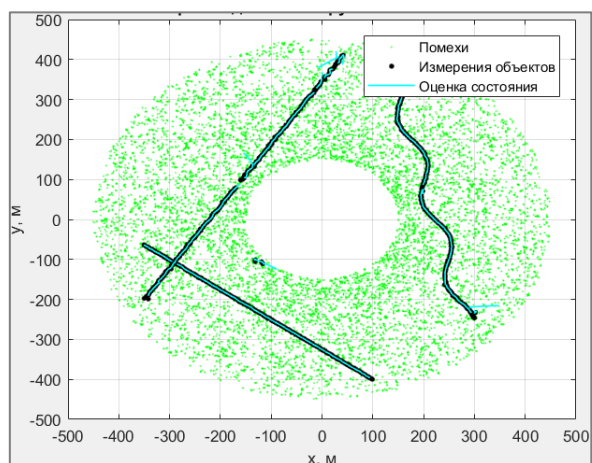


Рис. 7. Результат сопровождения движущихся объектов с помощью метода FL

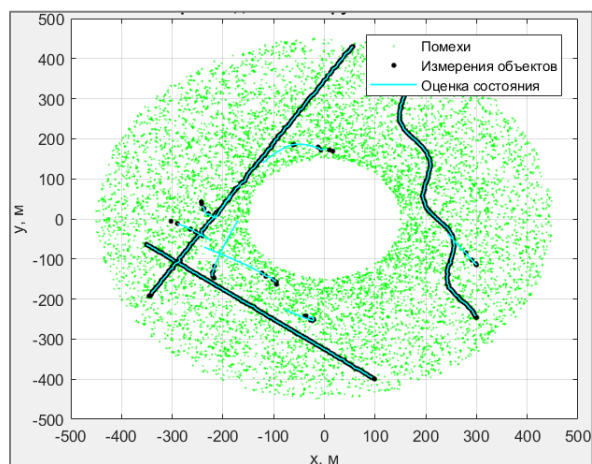


Рис. 6. Результат сопровождения движущихся объектов с помощью метода PDA

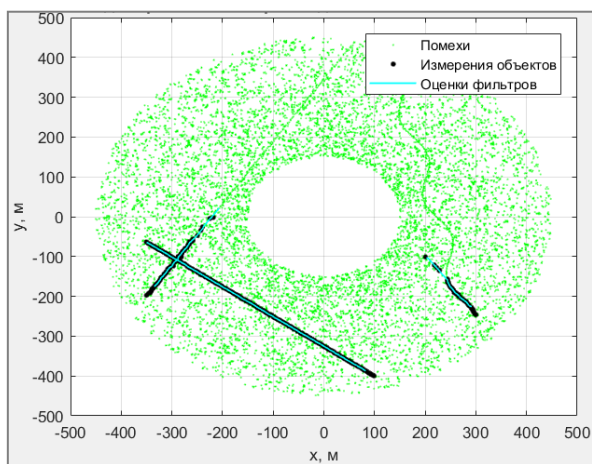


Рис. 8. Результат сопровождения движущихся объектов при классической работе фильтра Калмана

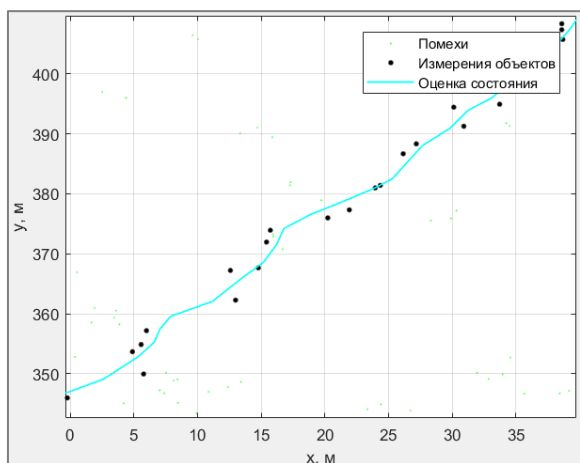


Рис. 9. Результат моделирования алгоритма без аппроксимации

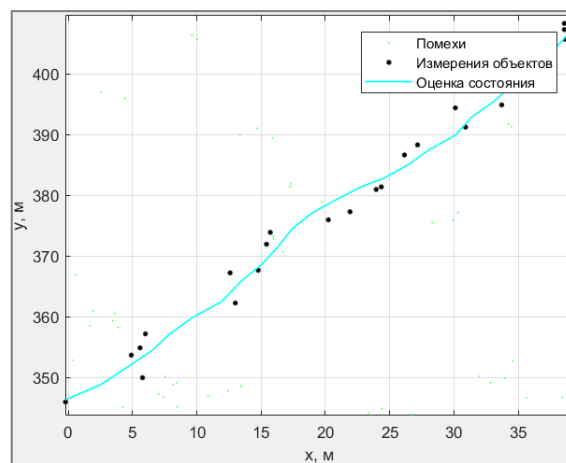


Рис. 10. Результат моделирования алгоритма с аппроксимацией

На рисунках 9–10 для сравнения представлены участки траекторий при работе двух алгоритмов: с аппроксимацией и без аппроксимации. Для аппроксимации рассматривались порядок многочлена $P = 2$ и число $N = 10$ предыдущих измерений. Как видно, с использованием аппроксимации удается получить более гладкую траекторию объекта: аппроксимация позволяет сгладить полученные с существенными погрешностями измерения объектов и, тем самым, избежать возможных ошибок при прогнозировании и выделении последующих измерений.

Заключение

В статье был предложен метод оценки вектора состояния движущегося объекта и произведено моделирование его работы. Для восстановления вектора состояния объекта в работе используется

расширенный фильтр Калмана. Проблема, связанная с низкой частотой формирования информации об объекте, решается посредством введения в алгоритм повышенной частоты прогнозирования состояния движущегося объекта между получениями измерений. Рассмотрено три метода выделения измерений движущихся объектов на фоне помех: метод ближайшего соседа, вероятностный метод PDA и нечеткая логика, – приведено сравнение полученных результатов. В ходе проведенного сравнительного исследования было выявлено, что использование нечеткой логики для выделения движущихся объектов показывает ее лучшую работу по сравнению с двумя другими рассмотренными методами. Это связано с тем, что в FL измерение движущегося объекта выбирается на основе нескольких параметров объекта, а не только на основе одного параметра.

Литература

1. Dan Simon, Optimal State Estimation // A John Wiley & Sons, Inc. Cleveland State University, USA, 2006, 526 p.
2. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Zuev A.V., Gubankov A.S., and Minaev D.D. Development of a digital platform for the implementation of distributed control and navigation systems for underwater robotic systems performing technological operations in Arctic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 816, 2021, 012009, pp. 1–9.
3. Filaretov V.F., Zhirabok A.N., Zhev A.V., Protsenko A.A., Tuphanov I.E., and Scherbatyuk A.F. Design and investigation of dead reckoning system with accommodation to sensors errors for autonomous underwater vehicle // OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington, 2015, pp. 7401832.
4. Filaretov V., Zhirabok A., Zuev A., and Protsenko A. The new approach for synthesis of diagnostic system for navigation sensors of underwater vehicles // 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013, "Procedia Engineering" 2014, pp. 822-829.
5. K. David Solomon Raj and I. Mohan Krishna. Kalman Filter based target tracking for track while scan data processing // IEEE Sponsored 2nd International Conference on Electronics and Communication System (ICECS 2015). JNTUK-Kakinada, Andhra Pradesh, 2015, pp. 878–883.
6. Macharla Vinaykumar and Ravi Kumar Jatoth. Performance evaluation of Alfa-Beta and Kalman Filter for object tracking // 2014 IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCT). National Institute Of Technology, Warangal, India, 2014, pp. 1369–1373.
7. Pramod R. Gunjal, Bhagyashri R. Gunjal, Haribhau A. Shinde, Swapnil M. Vanam, and Sachin S. Aher. Moving object tracking using Kalman Filter // 2018 International Conference On Advances in Communication and Computing Technology (ICACCT). Amrutvahini College of Engineering, Sangamner, Ahmednagar, India, 2018, pp. 544–547.

8. Агафонов В.Ю., Розалиев В.Л., Заболеева-Зотова А.В. Использование фильтра Калмана в задачах трекинга объектов // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. – 2016. – Т. 20. – № 4. – С. 13–17.
9. Пименова М.Б. Применение фильтра Калмана в задачах трекинга воздушных объектов // Политехнический молодежный журнал. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – № 12. – С. 1–11.
10. Соловей О.П., Иванов Н.Н. Алгоритм трекинга объектов реальном времени с обработкой ошибок // Доклады БГУИР. – Минск: БГУИР, 2013. – № 6 (76). – С. 31–35.
11. Ворошилина Е.П., Тисленко В.И. Анализ методов автоматического сопровождения целей по дальности // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 8. – С. 67–71.
12. Воронина Н.Г. Решение задачи сопровождения траекторий морских объектов по угломерной информации // Системы, технологии и эксперименты. Подводные исследования и робототехника. – Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2019. – № 3 (29). – С. 13–23.
13. Белов С.Г. Использование нечеткой логики при отождествлении воздушных радиолокационных объектов в процессе их многоцелевого сопровождения // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 5. – 16 с.
14. Шаймухаметов Ш.И. Методика обнаружения траектории маневрирующего летательного аппарата на основе последовательного анализа // I-methods. – 2018. – Т. 10. – № 1. – С. 19–30.

References

1. Dan Simon, Optimal State Estimation. A John Wiley & Sons, Inc. Cleveland State University, USA, 2006, 526 p.
2. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Zuev A.V., Gubankov A.S., and Minaev D.D. Development of a digital platform for the implementation of distributed control and navigation systems for underwater robotic systems performing technological operations in Arctic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 816, 2021, 012009, pp. 1–9.
3. Filaretov V.F., Zhirabok A.N., Zhev A.V., Protsenko A.A., Tuphanov I.E., and Scherbatyuk A.F. Design and investigation of dead reckoning system with accommodation to sensors errors for autonomous underwater vehicle. *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, 2015, pp. 7401832.
4. Filaretov V., Zhirabok A., Zuev A., and Protchenko A. The new approach for synthesis of diagnostic system for navigation sensors of underwater vehicles. *24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 2013, "Procedia Engineering" 2014, pp. 822-829.
5. K. David Solomon Raj and I. Mohan Krishna. Kalman Filter based target tracking for track while scan data processing. *IEEE Sponsored 2nd International Conference on Electronics and Communication System (ICECS 2015)*. JNTUK-Kakinada, Andhra Pradesh, 2015, pp. 878–883.
6. Macharla Vinaykumar and Ravi Kumar Jatoth. Performance evaluation of Alfa-Beta and Kalman Filter for object tracking. *2014 IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCT)*. National Institute Of Technology, Warangal, India, 2014, pp. 1369–1373.
7. Pramod R. Gunjal, Bhagyashri R. Gunjal, Haribhau A. Shinde, Swapnil M. Vanam, and Sachin S. Aher. Moving object tracking using Kalman Filter. *2018 International Conference On Advances in Communication and Computing Technology (ICACCT)*. Amrutvahini College of Engineering, Sangamner, Ahmednagar, India, 2018, pp. 544–547.
8. Agafonov V.Yu., Rozaliev V.L., and Zaboloeva-Zotova A.V. Using of the Kalman filter in problems of object tracking. *Intelligent Systems. Theory and Application*, 2016, vol. 20, № 4, pp. 13–17. (In Russian)
9. Pimenova M.B. Application of the Kalman filter in tracking problems of air objects. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal [Politechnical student journal]*, Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2019, № 12(41), pp. 1–11. (In Russian)
10. Solovey O.P. and Ivanov N.N. Real-time algorithm of object tracking with error handling. *Reports of BSUIR, Minsk: BGUIR*, 2013, № 6(76), pp. 31–35. (In Russian)
11. Voroshilina H.P. and Tislenko V.I. Analysis of autotracking methods by range. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, № 8, pp. 67–71. (In Russian)
12. Voronina N.G. Solving problem of bearings-only marine-target tracking. *Systems, technologies and experiments. Underwater research and robotics, Saint Petersburg: CSRI "Elektroprigor"*, 2019, № 3 (29), pp. 13–23. (In Russian)
13. Belov S.G. The use of fuzzy logic in identifying airborne radar objects in the process of their multi-purpose tracking. *Journal of Radio Electronics*, 2017, № 5, 16 p. (In Russian)
14. Shaymukhametov S.I. Trajectory detection method of maneuvering aircraft on the basis of sequential analysis. *I-methods*, 2018, vol. 10, № 1, pp. 19–30. (In Russian)

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Немиро Ирина Евгеньевна, младший научный сотрудник, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, магистрант, Дальневосточный Федеральный университет, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: nemiro.ie@students.dvfu.ru

Irina E. Nemiro, junior researcher, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, student, Far Eastern Federal University, 10, Ajacs, Russian isl., Vladivostok, 690922, Russian Federation, e-mail: nemiro.ie@students.dvfu.ru

Губанков Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Севастопольский государственный университет, заведующий лабораторией морской беспилотной авиации и морских авиационных систем, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а, e-mail: gubankov@dvo.ru

Anton S. Gubankov, PhD (Eng.), Associate Professor, senior scientist Institute of Automation and control processes FEB RAS, Sevastopol State University, Head of laboratory of marine unmanned aviation and marine aviation systems, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 50a, Verhneportovaya str., Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: gubankov@dvo.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2023.

Научная статья

УДК 681.518.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.064>

Метод обеспечения навигации для автономных подводных аппаратов на основе данных, получаемых от гидроакустической станции

Юхимец Д.А.^{1,2} undim@dvo.ru, Губанков А.С.^{1,3} gubankov@dvo.ru, Филаретов В.Ф.⁴ filaretov@inbox.ru

¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, ²Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, ³МГУ им. адм. Г.И. Невельского,

⁴Севастопольский государственный университет

Аннотация. В статье предложен метод построения навигационной системы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), использующей ограниченный набор бортовых датчиков и получающей данные по акустическим каналам связи о положении АНПА от гидроакустической станции освещения подводной обстановки. Предложенный алгоритм формирует оценки положения и скоростей АНПА на основе его динамической модели в предположении, что угловые скорости, углы ориентации и глубина АНПА определяются с помощью его бортовых датчиков. Предложенная схема построения навигационной системы позволяет обеспечить коррекцию ее показаний в условиях нерегулярного обновления данных от станции. После определенного периода работы системы и получения достаточного количества данных, происходит уточнение параметров модели, использующейся в фильтре Калмана, что существенно увеличивает точность его работы.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, адаптивная навигационная система, гидроакустическая станция, идентификация.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта СевГУ 42-01-09/253/2023-1.

Для цитирования: Юхимец Д.А., Губанков А.С., Филаретов В.Ф. Разработка адаптивной навигационной системы для автономного подводного аппарата на основе данных, получаемых от гидроакустической станции, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 42—52. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.064

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.064>

A navigation method for autonomous underwater vehicles based on data received from a hydroacoustic station

Dmitry A. Yukhimets^{1,2,3} undim@dvo.ru, Anton S. Gubankov^{1,2,3} gubankov@dvo.ru,

Vladimir F. Filaretov⁴ filaretov@inbox.ru

¹Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, ²M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems,

³Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, ⁴Sevastopol State University

Abstract. The article proposes a navigation method for autonomous underwater vehicles (AUV) using a limited set of on-board sensors and receiving data via acoustic communication channels about the position of the AUV from a hydroacoustic station. The proposed algorithm generates estimates of the position and velocities of the AUV based on its dynamic model, assuming that the angular velocities, orientation angles and depth are determined by means of onboard sensors. The proposed scheme allows for the correction of data in the conditions of its irregular updates from the station. After a certain period of operation of the system and obtaining a sufficient amount of data, the parameters of the model used in the Kalman filter are refined, which significantly increases the accuracy of its operation.

Keywords: autonomous underwater vehicle, adaptive navigation system, hydroacoustic station, identification.

Financial Support: This work is supported by SevSU internal grant 42-01-09/253/2023-1.

For citation: Dmitry A. Yukhimets, Anton S. Gubankov, Vladimir F. Filaretov, A navigation method for autonomous underwater vehicles based on data received from a hydroacoustic station, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 42—52. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.064

Введение

В настоящее время АНПА являются одним из самых эффективных инструментов для выполнения большого количества подводных операций: картографирование, поиск подводных объектов, мониторинг окружающей среды и т.д. [1,2]. Этот подход имеет и свои недостатки, существенно ограничивающие использование АНПА, среди которых их высокая стоимость и сложность подготовки к выполнению миссий. В качестве одного из таких факторов, значительно влияющих на стоимость АНПА, является необходимость установки

дорогостоящих акустических бортовых датчиков (доплеровских лагов) и развертывания гидроакустических навигационных систем, с помощью которых формируется необходимая навигационная информация о положении АНПА, требующаяся для успешного выполнения миссии.

Существует большое количество подходов к построению навигационных систем АНПА. Традиционным подходом является использование гидроакустических навигационных систем с длинной базой, которая состоит из нескольких заранее установленных маяков-ответчиков [3]. Этот подход требует выполнения достаточно длительных работ

по установке и позиционированию маяков. При этом для обеспечения точности определения координат на борту АНПА часто требуется дополнительно иметь измеритель скорости звука и высокоточные синхронизированные часы, что приводит к существенному удорожанию АНПА.

Также для навигации АНПА используются системы с короткой и ультракороткой базой, которые обычно устанавливаются на судне-носителе и используются для определения положения подводных аппаратов [4,5]. Определенным недостатком таких систем можно считать необходимость использования специализированного судна обеспечения в течение всей миссии АНПА, что не позволяет реализовать полностью автономное выполнение этих миссий.

Альтернативным вариантом навигации АНПА является оценка их положения на основе известной карты дна и карт различных аномалий (гравитационных, магнитных и т.д.) [6]. Указанные методы обычно дают достаточно большую погрешность определения положения АНПА и требуют наличие априорной информации о рельефе дна, которая часто является недоступной.

Так как данные от гидроакустических навигационных систем обновляются с достаточно большим периодом, что неприемлемо для работы системы управления, то в АНПА дополнительно используется инерциальная система навигации, которая основана на использовании датчиков, измеряющих параметры движения АНПА: линейные и угловые скорости, углы ориентации. Данные от этой инерциальной навигационной системы комбинируются с данными, полученными от гидроакустических навигационных систем, на основе различных алгоритмов [7,8]. При этом важной частью этой инерциальной системы является доплеровский лаг, позволяющий измерять линейные скорости АНПА. Следует отметить, что доплеровский лаг имеет достаточно высокую цену и габариты, что существенно увеличивает стоимость АНПА.

Другим способом формирования информации о параметрах движения АНПА является использование моделей динамики АНПА, с помощью которых можно оценить параметры движения АНПА под воздействием известных сил и моментов, формируемых движительным комплексом АНПА [9]. При этом необходимым условием такого подхода является предварительная идентификация параметров динамической модели АНПА. Указанная идентификация может проводиться с помощью различных подходов [10], однако в различных миссиях параметры АНПА могут измениться, например, за счет крепления дополнительного оборудования. Кроме того, на точность работы динамической модели АНПА влияет наличие заранее неизвестных подводных течений. Для получения оценки вектора течений предложены специальные наблюдатели [11]. Однако для их работы необходима информация о параметрах динамической модели АНПА, а также информация о линейных скоростях движения АНПА, получаемая от доплеровского лага.

Для решения указанных проблем в работе предлагается подход к синтезу навигационной системы, построенной на основе гидроакустических станций освещения подводной обстановки (ГАСО) [12], которые позволяют определять дистанцию и

угол пеленга на АНПА и передать полученную информацию по акустическим каналам связи. Это позволит использовать в качестве навигационных систем стационарно установленные или автономно перемещаемые станции, что сократит время подготовки АНПА к применению. При этом для реализации предложенной навигационной системы не используются данные от доплеровского лага, а формирование оценок линейных скоростей движения АНПА происходит на основе его динамической модели, параметры которой, включая вектор подводных течений, уточняются в процессе движения АНПА на основе данных, поступающих от гидроакустической станции.

Постановка задачи

В работе рассматривается АНПА, имеющий следующее бортовое оборудование, используемое для построения навигационной системы:

- инерциальное измерительное устройство на основе MEMS-датчиков (трехосевой акселерометр, трехосевой датчик угловых скоростей, трехосевой магнетометр), формирующее информацию об угловых скоростях АНПА в связанной с ним системе координат (ССК) и углах ориентации в абсолютной системе координат (АСК);
- датчик глубины;
- акустический модем, получающий данные от гидроакустической станции, содержащие информацию о положении АНПА относительно станции (пеленг и дистанция);
- движительный комплекс, формирующий управляющие силы по осям x (движение вперед), z (движение вверх) и моменты вокруг осей y (управление по углу дифферента) и z (управление по углу курса) ССК;
- маяк-ответчик, который формирует акустический импульс в ответ на импульс от ГАСО.

Предполагается, что в процессе выполнения миссии АНПА находится в зоне действия ГАСО, которая способна с определенной точностью и дискретностью определять его положение относительно себя, формируя дистанцию D_g до АНПА и пеленг α_g .

При этом в работе предполагается, что навигационная система АНПА работает по следующему принципу. В процессе работы ГАСО излучает импульс, который доходит до АНПА и маяка-ответчика, расположенного на АНПА. Маяк, получив импульс, излучает ответный импульс, который принимает ГАСО и определяет направление и дальность до АНПА. Эти данные ГАСО передает через акустический канал связи, которые навигационная АНПА система использует для коррекции своих оценок положения АНПА в АСК. В этом случае ГАСО самостоятельно производит все измерения, что не требует наличия синхронизированных с ней часов на борту АНПА. При этом данные о своем положении относительно ГАСО АНПА получает с задержкой, а данные, передаваемые по акустическим каналам связи, могут приходиться с искажениями или теряться в процессе передачи.

Процесс взаимодействия АНПА с ГАСО показан на рисунке 1.

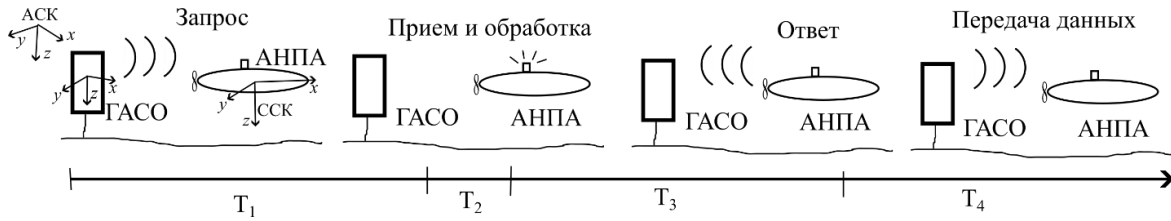


Рис. 1. Процесс взаимодействия АНПА и ГАСО

На рисунке 1 показана временная диаграмма, отражающая процесс поступления навигационных данных от ГАСО к АНПА. На промежутке времени T_1 ГАСО излучает импульс, который доходит до АНПА. На промежутке времени T_2 маяк, установленный на борту АНПА принимает импульс, обрабатывает информацию и излучает ответный импульс. На промежутке времени T_3 импульс от маяка доходит до ГАСО. На промежутке времени T_4 ГАСО обрабатывает полученную информацию и формирует данные о дистанции и угле пеленга до АНПА и передает эту информацию по акустическим каналам связи. Таким образом полная задержка в поступлении информации о положении АНПА будет равна:

$$T_G = T_2 + T_3 + T_4$$

При этом промежутки времени T_3 и T_4 зависят от дистанции между АНПА и ГАСО и скорости распространения звука в воде. Следует отметить, что задержка T_1 не учитывается, так как измерение будет проводиться в момент, когда импульс от ГАСО достигнет маяка-ответчика.

В работе предполагается, что движение АНПА описывается следующей динамической моделью [13] с учетом наличия подводных течений:

$$M(\dot{v} - \dot{v}_c) + C_R(M_R, v)v + g(\xi) + (C_A(M_A, v_r) + D(v_r))v_r = \tau, \quad (1)$$

$$\dot{\eta} = J(\xi)v,$$

где $M = M_R + M_A \in R^{6 \times 6}$; $M_R \in R^{6 \times 6}$ - матрица инерции АНПА; $M_A \in R^{6 \times 6}$ - матрица инерции присоединенных масс жидкости и их моментов инерции; $C_R(M_R, v) \in R^{6 \times 6}$, $C_A(M_A, v_r) \in R^{6 \times 6}$ - матрицы кориолисовых и центробежных сил и моментов; $D(v_r) \in R^{6 \times 6}$ - матрица гидродинамических сил и моментов; $g(\xi) \in R^6$ - вектор гидростатических сил и моментов; $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ - вектор положения и углов ориентации АНПА в АСК; $\xi = [\varphi, \theta, \psi]$ - вектор углов крена, дифферента и курса; $J(\xi) \in R^{6 \times 6}$ - матрица перехода из ССК в АСК; τ - вектор сил тяг и моментов, развиваемых движительным комплексом в связанной с АНПА в ССК; $v = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ - вектор линейных и угловых скоростей АНПА в ССК; $v_c = [v_{cx}, v_{cy}, v_{cz}, 0, 0, 0]^T$ - вектор подводных течений в ССК; $v_r = v - v_c$ - вектор скорости движения АНПА относительно среды.

Матрицы кориолисовых и центробежных сил и моментов, входящие в уравнения (1), описывается выражениями [13]:

$$C_R(M_R, v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) \\ -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) & -S(M_{21}v_1 + M_{22}v_2) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$C_A(M_A, v_r) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(A_{11}v_{1r} + A_{12}v_2) \\ -S(A_{11}v_{1r} + A_{12}v_2) & -S(A_{21}v_{1r} + A_{22}v_2) \end{bmatrix},$$

$$M_R = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, M_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

где $v_1 = [v_x, v_y, v_z]^T$, $v_{1r} = [v_{rx}, v_{ry}, v_{rz}]^T$, $v_2 = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$, а оператор $S(\cdot)$ - выражениями:

$$S(\beta) = \begin{bmatrix} 0 & -\beta_3 & \beta_2 \\ \beta_3 & 0 & -\beta_1 \\ -\beta_2 & \beta_1 & 0 \end{bmatrix}, \beta = [\beta_1, \beta_2, \beta_3]^T.$$

Матрица гидродинамических сил и моментов является диагональной и ее элементы имеют вид [13]:

$$D_{ii} = d_{1i} + d_{2i}|v_i|, i = \overline{1,6}, \quad (3)$$

где d_{1i} и d_{2i} - гидродинамические коэффициенты.

Гидростатические силы и моменты, действующие на АНПА, описываются следующими выражениями:

$$g(\xi) = \begin{bmatrix} P_a \sin \theta \\ -P_a \cos \theta \sin \varphi \\ -P_a \cos \theta \cos \varphi \\ -B_y \cos \theta \cos \varphi + B_z \cos \theta \sin \varphi \\ B_z \sin \theta + B_x \cos \theta \cos \varphi \\ -B_x \cos \theta \sin \varphi - B_y \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $P_a = W_a - B_a$ - остаточная плавучесть АНПА; W_a - сила тяжести; B_a - Архимедова сила; $B_x = W_a x_G - B_a x_B$, $B_y = W_a y_G - B_a y_B$, $B_z = W_a z_G - B_a z_B$; x_G, y_G, z_G и x_B, y_B, z_B - соответственно, координаты центров тяжести и плавучести АНПА в ССК.

В работе считается, что параметры математической модели (1) (присоединенные массы и моменты инерции, гидродинамические коэффициенты) известны с определенной точностью в результате выполненных теоретических расчетов на основе известной геометрической формы АНПА или выполненной процедуры идентификации с использованием экспериментальных данных [10]. При этом вначале движения АНПА вектор скоростей подводных течений v_c неизвестен.

Модель (1)-(4) движения АНПА может быть использована для получения оценок линейных скоростей движения АНПА в ССК, что позволяет в определенных условиях обойтись без использования доплеровского лага, являющегося дорогостоящим и габаритным устройством. Очевидно, что такой подход не может обеспечить точный расчет линейных скоростей из-за неизбежной неопределенности в параметрах модели АНПА и характеристиках движительного комплекса и, следовательно, приведет к накоплению ошибок в оценке положения АНПА в АСК. Однако использование модели (1)-(4) для оценки скоростей АНПА позволяет обеспечить физическую корректность этой оценки (АНПА не движется, если

не приложена сила тяги от движительного комплекса), а для увеличения точности оценки линейных скоростей можно подстроить параметры модели (1)-(4) на основе массива данных о движении АНПА, сформированного с помощью информации, поступающей от ГАСО.

Таким образом, в работе ставится следующая задача. Необходимо разработать метод построения навигационной системы АНПА, на основе минимально необходимого набора бортовых инерциальных датчиков и данных, поступающих от ГАСО о положении АНПА, с учетом задержек их поступления и периодических потерях указанных данных, а также с учетом подводных течений.

Описание алгоритма работы навигационной системы

Предлагаемый алгоритм функционирования навигационной системы АНПА основан на использовании фильтра Калмана, с учетом переменности периода поступления данных о положении АНПА из-за возможной потери этих данных, передающихся по акустическому каналу связи, и с учетом переменной величины задержки поступления данных в АНПА, зависящей от дистанции между АНПА и ГАСО.

В работе предполагается, что данные о положении АНПА поступают от двух источников информации:

- датчик глубины формирует данные о положении АНПА по координате z АСК с периодом, равным периоду работы навигационной системы;

- акустический модем, получающий данные о дистанции и пеленге АНПА относительно ГАСО, с периодом значительно превышающим период работы навигационной системы. При этом указанный период из-за возможной потери данных может быть переменным и заранее не прогнозируемым. Также указанные данные поступают с задержкой, зависящей от дистанции от АНПА до ГАСО.

Работа навигационной системы состоит из трех этапов и организуется следующим образом (рис. 2). На первом этапе вычисляются оценки положения АНПА в АСК и линейных скоростей с желаемым периодом. Для этого используется модель динамики

АНПА, где в качестве исходных данных выступают показания инерциально-измерительного устройства (вектор угловых скоростей в ССК и углы ориентации в АСК) и управляющие сигналы τ , формируемые системой управления и подаваемые на движительный комплекс АНПА.

На втором этапе происходит коррекция оценок скоростей и положения АНПА, сформированных на основе его динамической модели, с использованием данных, полученных от датчика глубины и ГАСО. При этом указанная коррекция в зависимости от доступных данных может выполняться в двух вариантах: если новые данные от ГАСО не доступны, то коррекция происходит только с помощью показаний датчика глубины, а если пришли новые данные от ГАСО, то коррекция выполняется на основе этих данных и показаний датчика глубины с учетом задержки в поступлении данных от ГАСО. То есть в этом случае удается учесть переменный и заранее неизвестный период поступления данных от ГАСО и обновлять данные о положении и скоростях АНПА с желаемым периодом.

Третий этап запускается, когда от ГАСО получено достаточно информации, чтобы провести оценку вектора скорости подводного течения и текущих параметров модели динамики АНПА. Этот этап запускается с заданной периодичностью, которая соответствует получению от ГАСО заданного количества данных. В процессе выполнения этапа происходит настройка параметров модели величин вектора подводных течений так, чтобы траектория движения АНПА, полученная по модели (1)-(4) оптимально соответствовала траектории движения АНПА, на основе данных от ГАСО. Полученные параметры модели передаются в модель АНПА и навигационная система далее работает уже с этими обновленными параметрами.

Расчет положения АНПА на основе инерциально-измерительного устройства и управляющих сигналов происходит с помощью динамической модели (1). В этой модели используются только уравнения, описывающие изменения линейных скоростей АНПА в ССК и его координат в АСК, с учетом того, что известны величины угловых скоростей в ССК и углов

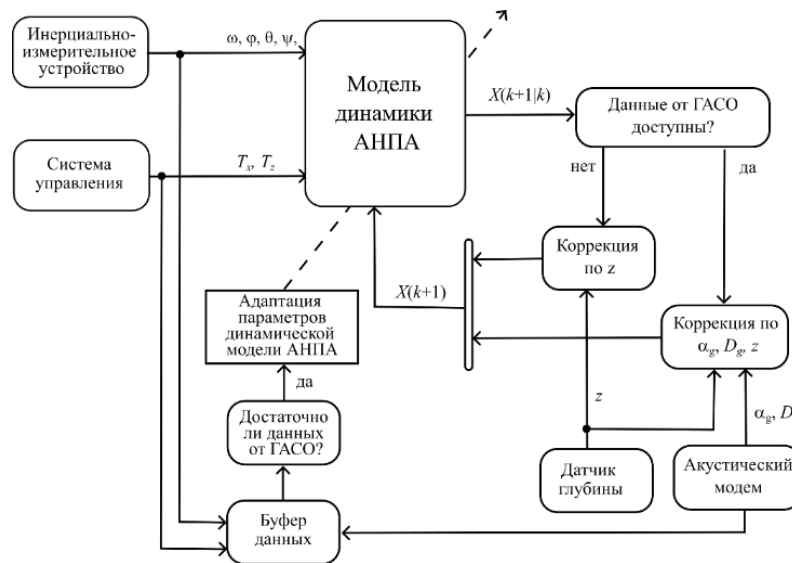


Рис. 2. Структура навигационной системы, использующей данные от ГАСО

ориентации в АСК, а также развиваемые движительным комплексом силы тяги. То есть из модели (1) формируется следующая модель оценки указанных скоростей и координат в предположении, что угловые ускорения АНПА малы и ими можно пренебречь, а матрица присоединенных масс и моментов инерции имеет диагональный вид, что для большинства АНПА является корректным допущением:

$$\begin{aligned} & (m_a - \lambda_{11})(\dot{v}_x - \dot{v}_{cx}) + (d_{1x} + d_{2x}|v_{rx}|)v_{rx} - (m_a v_y - \lambda_{22} v_{ry})\omega_z + (m_a v_z - \lambda_{33} v_{rz})\omega_y + P s_\theta = T_x, \\ & (m_a - \lambda_{22})(\dot{v}_y - \dot{v}_{cy}) + (m_a v_x - \lambda_{11} v_{rx})\omega_z + (d_{1y} + d_{2y}|v_{ry}|)v_{ry} - (m_a v_z - \lambda_{33} v_{rz})\omega_x - P c_\theta s_\varphi = 0 \\ & (m_a - \lambda_{33})(\dot{v}_z - \dot{v}_{cz}) - (m_a v_x - \lambda_{11} v_{rx})\omega_y + (m_a v_y - \lambda_{22} v_{ry})\omega_x + (d_{1z} + d_{2z}|v_{rz}|)v_{rz} - P c_\theta c_\varphi = T_z, \quad (5) \\ & \dot{x} = c_\psi c_\theta v_x + (c_\psi s_\theta s_\varphi - s_\psi c_\varphi)v_y + (s_\psi s_\varphi + c_\psi c_\theta s_\theta)v_z, \\ & \dot{y} = s_\psi c_\theta v_x + (c_\psi c_\varphi + s_\psi s_\theta s_\varphi)v_y + (s_\theta s_\psi c_\varphi - c_\psi s_\varphi)v_z, \\ & \dot{z} = -s_\theta v_x + c_\theta s_\varphi v_y + c_\theta c_\varphi v_z, \\ & v_c = \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \\ v_{cz} \end{bmatrix} = (R_{\varphi\theta\psi})^T v_c^a, \end{aligned}$$

где m_a – масса АНПА; λ_{ii} – присоединенные массы жидкости; c_ξ, s_ξ – обозначение функций \cos и \sin соответствующего угла; $v_c^a = [v_{cx}^a, v_{cy}^a, v_{cz}^a]^T$ – вектор скорости подводного течения в АСК; $R_{\varphi\theta\psi} \in R^{3 \times 3}$ – матрица перехода из ССК в АСК.

Далее будем предполагать, что скорость подводного течения постоянна в АСК или медленно меняется, что соответствует большинству реальных условий. Поэтому величина $\dot{v}_c = [\dot{v}_{cx}, \dot{v}_{cy}, \dot{v}_{cz}]^T$ будет рассчитываться по формуле:

$$\dot{v}_c = \dot{R}_{\varphi\theta\psi}^T v_c^a = \left(\frac{\partial R_{\varphi\theta\psi}^T}{\partial \varphi} \dot{\varphi} + \frac{\partial R_{\varphi\theta\psi}^T}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial R_{\varphi\theta\psi}^T}{\partial \psi} \dot{\psi} \right) v_c^a, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s_\varphi t_\theta & c_\varphi t_\theta \\ 0 & c_\varphi & -s_\varphi \\ 0 & s_\varphi / c_\theta & c_\varphi / c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix},$$

где t_θ – обозначение функции tg соответствующего угла.

В модели (5) предполагается, что динамические параметры АНПА известны с некоторой точностью. А также известны характеристики движительного комплекса, то есть известны зависимости силы тяги, которые формирует каждый движитель от величины управляющего сигнала, формируемых системой управления АНПА.

Модель (5) в дискретном виде можно представить как:

$$X(k+1) = A(\omega, \varphi, \theta, \psi)X(k) + BF(k) + \dot{v}_c^E(k)h, \quad (7)$$

где h – шаг дискретизации системы; $X(k) = [v_x(k), v_y(k), v_z(k), x(k), y(k), z(k)]^T$ – вектор состояния системы; $F = [T_x(k), T_y(k), T_z(k), P_a, v_{cx}, v_{cy}, v_{cz}]^T$; $\dot{v}_c^E = [\dot{v}_{cx}, \dot{v}_{cy}, \dot{v}_{cz}, 0, 0, 0]^T$; A, B – матрицы системы и управления, соответственно.

Модель (7) может быть использована в фильтре Калмана для оценки вектора линейных скоростей в ССК и вектора координат в АСК на этапе прогнозирования. Следует отметить, что из-за того,

что угловые скорости и углы ориентации не требуют дополнительной оценки, модель (7) является линейной и не приводит к увеличению сложности реализации фильтра. При этом в начале работы, когда величины скоростей подводных течений не оценены, они принимаются нулевыми.

Таким образом, этап прогнозирования выполняется с помощью следующих формул:

$$\begin{aligned} X(k+1|k) &= A(k)X(k) + BF(k) \\ P(k+1|k) &= A(k)P(k)A(k)^T + Q \end{aligned} \quad (8)$$

где $X(k+1|k)$ – прогнозируемое значение вектора состояния; $P(k+1|k) \in R^{6 \times 6}$ – прогнозируемое значение матрицы ковариации ошибок оценки вектора состояния; $Q \in R^{6 \times 6}$ – матрица ковариации шумов системы.

Этап коррекции в фильтре реализован в двух вариантах. Если данных от ГАСО не поступило, то коррекция происходит с использованием данных от датчика глубины. В этом случае этап коррекции осуществляется на каждом шаге расчета фильтра по следующим формулам:

$$\begin{aligned} K_{Gz} &= P(k+1|k)H_z^T (H_z P(k+1|k)H_z^T + R_z)^{-1} \\ X(k+1) &= X(k+1|k) + K_{Gz}(Y_z - H_z X(k+1|k)), \quad (9) \\ P(k+1) &= (I - K_{Gz}H_z)P(k+1|k), \\ Y_z &= z_s, H_z = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1], \end{aligned}$$

где $K_{Gz} \in R^6$ – вектор коэффициентов фильтра в случае, когда коррекция осуществляется на основе только показаний датчика глубины; R_z – матрица ковариации шумов измерения; Y_z и H_z – вектор и матрица измерения; z_s – показания датчика глубины; $I \in R^{6 \times 6}$ – единичная диагональная матрица.

Второй вариант коррекции оценок скоростей и положений АНПА используется в случае, когда приходят данные от ГАСО с информацией о дистанции и пеленге АНПА относительно ГАСО. В этом случае коррекция выполняется за несколько последовательных шагов.

На первом шаге необходимо пересчитать данные от ГАСО в значения координат x, y АНПА в АСК, при этом считается, что положение и ориентация ГАСО в АСК известна. Указанный расчет производится по следующим формулам.

$$\begin{aligned} x_{sg} &= \left(D_g^2 - (z_g - z_s)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \cos \alpha_g, \\ y_{sg} &= \left(D_g^2 - (z_g - z_s)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \sin \alpha_g, \\ x_s &= x_{sg} \cos \psi_g + y_{sg} \sin \psi_g + x_g, \quad (10) \\ y_s &= -x_{sg} \sin \psi_g + y_{sg} \cos \psi_g + y_g, \end{aligned}$$

где D_g – измеренная дистанция от ГАСО до АНПА; (x_g, y_g, z_g) – координаты ГАСО в АСК; α_g – угол пеленга на АНПА, относительно ГАСО; ψ_g – ориентация ГАСО по углу курса.

Из выражений (10) видно, что в работе для простоты считается, что ориентация ГАСО по углам крена и дифферента равна 0, что обычно выполняется. При этом если указанные углы отличны от 0, то это можно учесть, используя внутренние датчики ГАСО, обеспечивающие определение ее ориентации, и используя в формуле (10) полную матрицу поворота по трем углам ориентации.

На втором шаге происходит компенсация временной задержки, которая возникает из-за

конечной скорости распространения акустических сигналов в воде. Эта задержка рассчитывается по следующим формулам (см. рис. 1):

$$t_{\Delta} = \frac{2D_g}{v_s} + \frac{N_G}{B_r} + T_c, \quad (11)$$

где v_s – скорость звука в воде; N_G - количество байт в пакете данных, пересылаемых от ГАСО к АНПА; B_r - скорость передачи данных по акустическим каналам связи; T_c – суммарная временна задержка, обусловленная временем, необходимым на обработку акустических сигналов в маяке и ГАСО.

В (11) используется удвоенная величина дистанции между ГАСО и АНПА, так как акустический сигнал в процессе измерения проходит расстояние от АНПА до ГАСО, а затем в процессе передачи данных по акустическому каналу от ГАСО до АНПА. При этом учет указанной задержки позволит увеличить точность определения координат АНПА и оценок линейных скоростей движения АНПА. Скорость звука в воде при расчете задержки по (11) может считаться постоянной, или при наличии встроенных средств измерения передаваться АНПА в пакете данных с навигационной информацией.

Учет указанной задержки будет происходить следующим образом (см. рис. 3). В процессе работы навигационной системы происходит сохранение рассчитанных векторов $X(k)$ в буфер типа FIFO (First Input First Output), в котором новые данные записываются в начало буфера, наиболее старые из буфера убираются, а все остальные сдвигаются на одну позицию назад. Так как вычисление вектора $X(k)$ происходит с постоянным шагом h , то каждая ячейка хранит данные, отстоящее от текущего шага на промежуток времени $-nh$, где n – номер ячейки буфера.

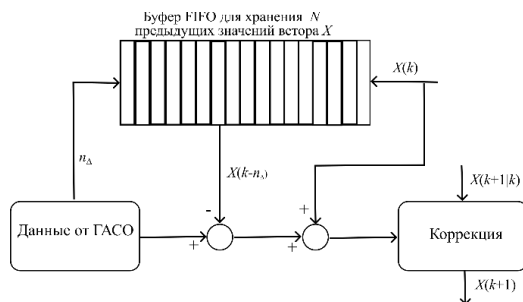


Рис. 3. Схема учета задержек получения навигационных данных от ГАСО

После расчета величины t_{Δ} в буфере ищется ячейка, соответствующая этой задержке, то есть:

$$n_{\Delta} = \text{mod}(t_{\Delta}/h),$$

где n_{Δ} – номер ячейки буфера, в которой хранятся оценки вектора $X(k - n_{\Delta})$, сформированного в момент когда ГАСО произвела измерение; $\text{mod}()$ – операция взятия целой части от частного.

Далее формируется вектор измерений для коррекции показаний навигационной системы:

$$Y_{xyz} = \begin{bmatrix} x(k) + (x_s - x(k - n_{\Delta})) \\ y(k) + (y_s - y(k - n_{\Delta})) \\ z_s \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $x(k - n_{\Delta}), y(k - n_{\Delta})$ – соответствующие компоненты вектора $X(k - n_{\Delta})$, хранящегося в буфере.

После формирования Y_{xyz} происходит коррекция текущей оценки вектора $X(k + 1|k)$:

$$K_{Gxyz} = P(k + 1|k)H_{xyz}^T (H_{xyz}P(k + 1|k)H_{xyz}^T + R_{xyz})^{-1},$$

$$X(k + 1) = X(k + 1|k) + K_{Gxyz} (Y_{xyz} - H_{xyz}X(k + 1|k)),$$

$$P(k + 1) = (I - K_{Gxyz}H_{xyz})P(k + 1|k), \quad (13)$$

$$H_{xyz} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $K_{Gxyz} \in R^{6 \times 3}$ – матрица коэффициентов фильтра для случая, когда коррекция происходит по данным, полученным от ГАСО; $R_{xyz} \in R^{3 \times 3}$ – ковариационная матрица шумов измерений для случая, когда коррекция происходит по данным, полученным от ГАСО.

В результате предложенная система навигации АНПА обеспечивает коррекцию оценок линейных скоростей и координат АНПА на основе нерегулярно поступающих от ГАСО данных с учетом переменных задержек этих данных. Однако при неточных оценках параметров АНПА или величин скоростей подводных течений, оценка скорости движения АНПА и прогноз его движения в промежутке между приходом данных от ГАСО будет существенно неточным. Для устранения этой проблемы в предлагаемом алгоритме навигации запускается третий этап работы алгоритма.

Оценка параметров модели и вектора подводных течений

Третий этап алгоритма заключается в уточнении параметров модели (7) на основе данных о реальном движении АНПА, поступивших от ГАСО. При этом идентификация параметров модели будет основываться на следующих предположениях.

1. Так как период поступления данных о положении АНПА от ГАСО большой, то переходные процессы при изменении скоростей линейных АНПА не будут наблюдаться по данным от ГАСО. Поэтому при идентификации будет считаться, что АНПА движется в установившемся режиме, то есть будет считаться, что производные линейных скоростей равны нулю. Следует отметить, что такой режим является наиболее частым, так как при выполнении миссий движение АНПА происходит по заданным участкам траектории с постоянной скоростью.

2. Так как ГАСО определяет только две координаты АНПА, то в процессе идентификации будет рассматриваться модель движения АНПА в горизонтальной плоскости. При этом все параметры движения АНПА в вертикальной плоскости можно с большой точностью определить, используя данные от датчика глубины.

3. Предполагается, что АНПА имеет движительный комплекс, который может создать силу тяги по координате x ССК, и не создает тягу по координате y ССК.

4. В силу п.3 предполагается, что скорость АНПА по координате y в ССК в установившемся режиме будет определяться только соответствующим компонентом вектора скорости течения в ССК.

5. Предполагается, что АНПА движется в горизонтальной плоскости со стабилизацией глубины, что обычно является основным рабочим режимом АНПА.

6. Предполагается, что вектор скорости течения в АСК постоянен на всем промежутке времени, за который происходит сбор данных для идентификации.

Исходя из указанных предположений, математическая модель движения АНПА, параметры которой будут идентифицироваться, примет следующий вид:

$$\begin{aligned} (d_{1x} + d_{2x}(v_x - v_{cx}))(v_x - v_{cx}) &= \tau_x, \\ v_y &= v_{cy}, \\ v_c &= R_\psi^T v_c^a, \\ \dot{X}_G &= R_\psi v_G, \end{aligned} \quad (14)$$

где $X_G = [x, y]^T$ – вектор координат АНПА в горизонтальной плоскости АСК; $v_G = [v_x, v_y]^T$ – вектор скорости АНПА в ССК в горизонтальной плоскости; R_ψ – матрица поворота вокруг оси z. Первое уравнение системы (14) записано в предположении, что движение АНПА происходит вперед (скорость $(v_x - v_{cx}) > 0$), что является основным режимом движения АНПА.

Из системы (14) видно, что в идентифицируемыми параметрами модели будут являться $d_{1x}, d_{2x}, v_{cx}^a, v_{cy}^a$. Указанные параметры позволят более точно оценивать текущие скорости движения АНПА и тем самым существенно увеличить точность оценки координат АНПА на этапе прогнозирования.

Из первого уравнения системы (14) можно получить выражение для расчета скоростей движения АНПА в зависимости от приложенных сил тяги, параметров гидродинамических сопротивлений и скорости течения. Это выражение для $v_x > 0$ имеет вид:

$$v_x = \frac{(d_{1x}^2 + 4d_{2x}T_x)^{1/2} - d_{1x}}{2d_{2x}} + v_{cx},$$

с учетом которого, модель (14) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} v_G &= \begin{bmatrix} \frac{(d_{1x}^2 + 4d_{2x}T_x)^{1/2} - d_{1x}}{2d_{2x}} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \end{bmatrix} = v_B + v_c, \\ \dot{X}_G &= R_\psi v_G = R_\psi v_B + v_c^a. \end{aligned} \quad (15)$$

В дискретном виде модель (15) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} v_B(i) &= \begin{bmatrix} \frac{(d_{1x}^2 + 4d_{2x}T_x(i))^{1/2} - d_{1x}}{2d_{2x}} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ X_G(i+1) &= X_G(i) + (R_\psi(i)v_B(i) + v_c^a)h_x(i), \end{aligned} \quad (16)$$

где $h_x(i)$ – шаг дискретизации, соответствующий периоду поступления данных от ГАСО. С учетом возможных искажений и потерь данных при передаче по акустическим каналам связи величина $h_x(i)$ может меняться.

Модель (16) является нелинейной относительно вектора параметров

$P_r = [d_{1x}, d_{2x}, v_{cx}^a, v_{cy}^a]^T$, поэтому идентификацию следует проводить с помощью методов численной оптимизации. При этом критерий, который будет минимизироваться, имеет вид:

$$J = \sum_{i=1}^{N_G} (X_s(i) - X_G(i))^T (X_s(i) - X_G(i)), \quad (17)$$

где $X_s(k)$ – данные о положении АНПА, полученные от ГАСО; N_G – количество данных, по которым проводится идентификация.

В качестве метода идентификации используется метод Ливенберга-Марквардта. Полученные в результате идентификации оценки параметров АНПА и вектора подводных течений используются в модели (7) на этапе прогнозирования, что позволит существенно увеличить точность оценки вектора линейных скоростей АНПА и его координат.

Результаты моделирования

Для исследования предложенного метода построения навигационной системы было проведено математическое моделирование. Для этого в среде MATLAB/Simulink была разработана модель, описывающая динамику движения АНПА в соответствии с моделью (1), модель формирования данных о положении АНПА с помощью ГАСО. Эта модель на основе текущих координат ГАСО и АНПА, вычисляет дистанцию D_g и пеленг α_g АНПА относительно ГАСО. К рассчитанным величинам добавлялась случайная погрешность, амплитуда которой, составляла заданную долю от измеренной величины, а затем полученные зашумленные данные дискретизировались с заданным шагом по дистанции и углу пеленга, соответственно. Сформированные данные, которые имитируют навигационные данные от ГАСО передавались с задержкой, зависящей от дистанции между АНПА и ГАСО и скорости передачи данных по акустическому каналу, в модель навигационной системы АНПА, которая реализуется с помощью выражений (7)-(13), (16).

В процессе моделирования на вход модели (1) подавались следующие, изменяющиеся во времени, силы и моменты: $T_x = 50 + 10 \sin(t/500)$ Н. При этом величины моментов M_y и M_z формировались таким образом, чтобы угол дифферента стабилизировался на значении 0 рад, а угол курса изменялся в соответствии с законом: $\psi = \frac{\pi}{2} \sin(t/250)$. Также величина тяги F_z формировалась так, чтобы глубина АНПА была стабилизирована на заданном значении. Такой характер формирования управляющих сигналов имитировал движение АНПА в горизонтальной плоскости при движении по сложной криволинейной траектории.

Параметры математической модели АНПА имели следующие значения:

- матрица инерции АНПА $M = \text{diag}(100 \text{ кг}, 100 \text{ кг}, 100 \text{ кг}, 10.2 \text{ кгм}^2, 23.4 \text{ кгм}^2, 23.4 \text{ кгм}^2)$;
- матрица инерции присоединенных масс и моментов инерции $M_A = \text{diag}(-15 \text{ кг}, -185 \text{ кг}, -185 \text{ кг}, -5 \text{ кгм}^2, -9.6 \text{ кгм}^2, -9.6 \text{ кгм}^2)$;
- гидродинамические коэффициенты $d_1 = (25 \text{ Нс/м}, 105 \text{ Нс/м}, 105 \text{ Нс/м}, 20 \text{ Нмс}, 80 \text{ Нмс}, 80 \text{ Нмс})$, $d_2 = (19 \text{ Нс}^2/\text{м}^2, 105 \text{ Нс}^2/\text{м}^2, 105 \text{ Нс}^2/\text{м}^2, 20 \text{ Нмс}^2, 80 \text{ Нмс}^2, 80 \text{ Нмс}^2)$.

В процессе моделирования предполагалось, что вектор подводных течений имеет постоянную величину в АСК и равен $v_c^a = [0.4, 0.25, 0.0]^T$.

При реализации навигационной системы АНПА в модели (7) использовались параметры, отличающиеся от параметров модели (1)-(4) и имеющие следующие значения: $m_a = 170\text{кг}$, $\lambda_{11} = -13\text{кг}$, $\lambda_{22} = -165\text{кг}$, $\lambda_{33} = -205\text{кг}$, $d_{1x} = 15.0\text{Нсм}^{-1}$, $d_{2x} = 15.0\text{Нс}^2\text{м}^{-2}$, $d_{1y} = 115.0\text{Нсм}^{-1}$, $d_{2y} = 100.0\text{Нс}^2\text{м}^{-2}$, $d_{1z} = 107.0\text{Нсм}^{-1}$, $d_{2z} = 115.0\text{Нс}^2\text{м}^{-2}$, $P_a = 0.6H$. Шаг расчета навигационной системы был $h = 0.01\text{с}$. При этом матрицы Q и R имели значения: $Q = 0.001E$, $E \in R^{6 \times 6}$, $R_z = 100$, $R_{xyz} = 1000E$, $E \in R^{3 \times 3}$ где E – единичная диагональная матрица соответствующего размера.

Величины угловых скоростей, углов ориентации и координаты z (глубины), поступающие от соответствующих датчиков были зашумлены в соответствии с типовыми характеристиками указанных датчиков: амплитуда ошибки датчика угловой скорости 0.01с^{-1} , амплитуда ошибки датчика углов ориентации 0.02рад , амплитуда ошибки датчика глубины 0.05м .

Модель ГАСО имела следующие параметры: погрешность определения дистанции 1.0% от измеренной величины; погрешность определения угла пеленга – 1.0° ; шаг дискретизации по дистанции – 0.5м ; шаг дискретизации по углу пеленга – 0.5° ; скорость звука в воде – 1500м/с ; скорость передачи данных – 9600бит/с ; длина навигационного пакета 172бит ; период измерений 2.5с .

Результаты работы предложенного алгоритма показаны на рисунках 4-6.

На рисунках 4а и 4б показан процесс изменения истинных значений координат x и y АНПА в АСК (серая кривая), их оценок, полученных с помощью предложенного алгоритма (синяя линия), а также их измерения с помощью ГАСО (коричневая линия). На рисунке 5а и 5б показаны ошибки оценки координат x и y АНПА с помощью предложенного алгоритма (черная линия), и ошибка измерения ГАСО (серая линия).

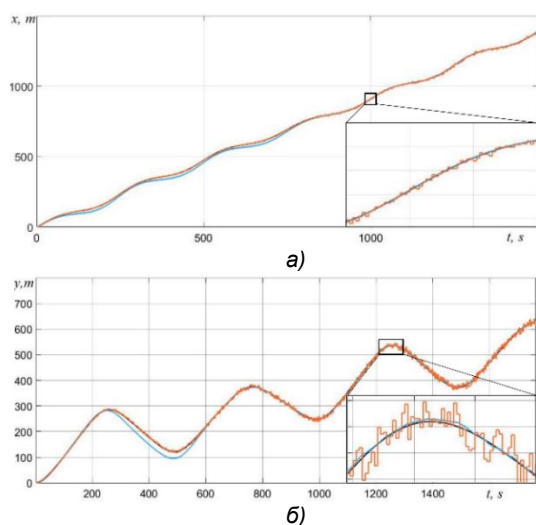


Рис. 4. Изменение координат x (а) и y (б) АНПА в АСК

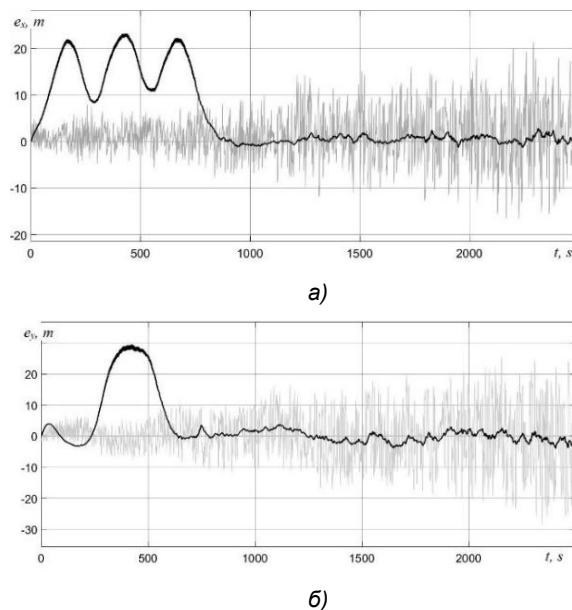
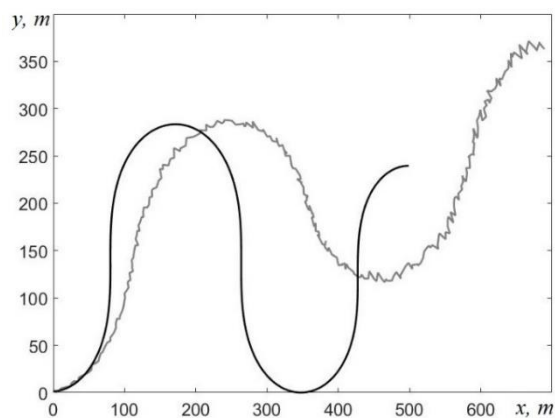


Рис. 5. Ошибка оценки и измерения координат x (а) и y (б) АНПА

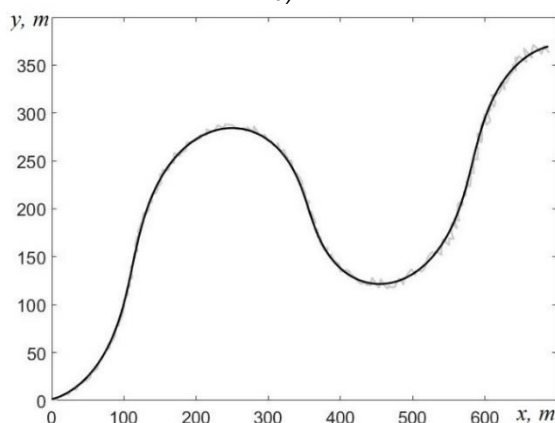
Как видно из представленных рисунков в случае, когда модель динамики АНПА не имела данных о подводных течениях и не использовала уточненные гидродинамические параметры АНПА, ошибка в оценке координат могла достигать 30м . Это объясняется сложным характером движения АНПА и достаточно большой инерционностью фильтра (7)-(13), которая выбрана из-за достаточно больших ошибок измерения ГАСО, чтобы избежать резких перепадов оценок координат АНПА на этапе коррекции.

После момента $t = 750\text{с}$, когда было собрано 300 измерений от ГАСО, была проведена адаптация параметров математической модели (7). Параметры, которые были определены с помощью процедуры идентификации имели следующие значения: $d_{1x} = 25.11$, $d_{2x} = 18.48$, $v_{cx}^a = 0.401\text{мс}^{-1}$, $v_{cy}^a = 0.2466\text{мс}^{-1}$.

При этом в процессе адаптации по параметры модели подбирались так, чтобы траектория движения АНПА, рассчитанная по модели (7), оптимально совпадала с измеренной траекторией. Сравнение измеренной траектории и ее оценка по модели перед адаптацией и после показаны на рисунке 6 (серая линия – измеренная траектория, черная – оценка траектории по модели (7)).



а)



б)

Рис. 6. Оценка траектории движения АНПА по модели (7) с исходными параметрами (а) и с параметрами после адаптации (б)

Из представленных рисунков видно, что после идентификации измеренная и оцененная траектории стали совпадать точно, а ошибка оценки координат резко уменьшилась и ее максимальное значение по координате x достигает 3м, а по координате y – 4м, что в 7 раз меньше, чем ошибка измерения.

В процессе моделирования были получены оценки линейных скоростей движения АНПА, которые после адаптации стали практически совпадать с реальными значениями, а ошибка оценки скорости АНПА в ССК по координате x не превышает 0.02м, а по координате y – 0.01 м. Также было исследовано влияние временных задержек поступления данных от ГАСО в бортовую навигационную систему АНПА. В результате, отсутствие учета временной задержки поступления данных в АНПА от ГАСО приводит к уменьшению точности определения параметров модели (7), а также к уменьшению точности оценки координат практически в 2 раза (ошибка возрастает до 8 м). Это в основном связано с тем, что коррекция оценок происходит на основе данных, которые были актуальны несколько секунд назад, что при скорости АНПА около 1,2 м/с приводит к увеличению ошибки.

Заключение

В работе предложен метод построения навигационной системы АНПА, использующей ограниченный набор бортовых датчиков и получающей данные по акустическим каналам связи о положении АНПА от гидроакустической станции освещения подводной обстановки. Предложенный алгоритм формирует оценки положения и скорости АНПА на основе его динамической модели в предположении, что угловые скорости, углы ориентации и глубина АНПА определяются с помощью его бортовых датчиков.

Результаты моделирования с использованием модели, описывающей все основные особенности работы ГАСО и ее взаимодействия с АНПА (задержки в получении информации, наличие шумов измерений и дискретизация данных ГАСО) показали достаточно высокую эффективность предложенного решения. При этом в качестве основного преимущества можно указать возможность использования минимального количества бортовых датчиков и возможность быстрого развертывания навигационного оборудования для взаимодействия с АНПА.

Литература

1. Yu L. et al. Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends // 2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC), Lancaster, United Kingdom, 2019, pp. 1-6.
2. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. Владивосток: Дальнаука, 2016, 400 с.
3. Watanabe K., Utsunomiya K., Harada K., Shen Q. Development of a Floating LBL System and a Lightweight ROV for Sky to Water System // OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE, Seattle, WA, USA, 2019, pp. 1-6.
4. Caiti A., Calabrò V., Fabbri T., Fenucci D., Munafò A. Underwater communication and distributed localization of AUV teams // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS, 2013, pp. 1–8.
5. Bao L., Zeng Q., Zhu Z., Dai X., Zhao Q. AUV Docking Recovery Based on USBL Integrated Navigation Method // 2019 Chinese Automation Congress (CAC), Hangzhou, China, 2019, pp. 5804-5809.
6. Heubach F., Seto M. L. Extended Range AUV Localization and Navigation Aided by Gravity Anomalies and Bathymetry // 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), St. Johns, NL, Canada, 2020, pp. 1-6.
7. Menna B.V., Villar S.A., Acosta G.G. Particle filter based autonomous underwater vehicle navigation system aided thru acoustic communication ranging // Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE San-Diego, USA, 2020, pp. 5-14.
8. Юхимец Д.А., Губанков А.С. Навигационная система автономного подводного аппарата на основе данных, передаваемых по акустическому каналу от гидроакустической станции // Известия ЮФУ. Технические науки, 2023, №1, С. 227-240.
9. Randeni P., N. R. Rypkema, E. M. Fischell, A. L. Forrest, M. R. Benjamin, H. Schmidt. Implementation of a Hydrodynamic Model-Based Navigation System for a Low-Cost AUV Fleet // 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop, Porto, Portugal, 2018, pp. 1-6.

10. Cardenas P., Barros E. A. Estimation of AUV Hydrodynamic Coefficients Using Analytical and System Identification Approaches // IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, vol. 45, no. 4, pp. 1157-1176.
11. Borhaug E., Pivano L., Pettersen K.Y., et al. A Model-Based Ocean Current Observer for 6DOF Underwater Vehicles //IFAC Proceedings, 2007, vol. 40, pp. 169–174.
12. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Zuev A.V., Gubankov A.S., Minaev D.D. Development of a digital platform for the implementation of distributed control and navigation systems for underwater robotic systems performing technological operations in Arctic // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sc., 2021, vol. 816, paper 012009.
13. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011, 582 p.

References

1. Yu L. et al. Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends // 2019 25th International Conference on Automation and Computing, Lancaster, United Kingdom, 2019, pp. 1-6.
2. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Osobennosti sinteza vysokotochnykh sistem upravleniya skorostnym dvi-zheniem i stabilizatsiei podvodnykh apparatov v prostranstve. [Features of synthesis of high-precision control systems for high-speed movement and stabilization of underwater vehicles in space] Vladivostok., izd.«Dal'nauka»,2016,400 s.
3. Watanabe K., Utsunomiya K., Harada K., Shen Q. Development of a Floating LBL System and a Lightweight ROV for Sky to Water System // OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE, Seattle, WA, USA, 2019, pp. 1-6.
4. Caiti A., Calabrò V., Fabbri T., Fenucci D., Munafò A. Underwater communication and distributed localization of AUV teams // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS, 2013, pp. 1–8.
5. Bao L., Zeng Q., Zhu Z., Dai X., Zhao Q. AUV Docking Recovery Based on USBL Integrated Navigation Method // 2019 Chinese Automation Congress, Hangzhou, China, 2019, pp. 5804-5809.
6. Heubach F., Seto M. L. Extended Range AUV Localization and Navigation Aided by Gravity Anomalies and Bathymetry // 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium, St. Johns, Canada, 2020, pp. 1-6.
7. Menna B.V., Villar S.A., Acosta G.G. Particle filter based autonomous underwater vehicle navigation system aided thru acoustic communication ranging // Proc. of the OCEANS MTS/IEEE, San-Diego, USA, 2020, pp. 5-14.
8. Yukhimets D.A., Gubankov A.S. Navigatsionnaya sistema avtonomnogo podvodnogo apparata na osnove dannykh, peredavaemykh po akusticheskomu kanalu ot gidroakusticheskoy stantsii. [Navigation system of an autonomous underwater vehicle based on data transmitted with an acoustic channel from a hydroacoustic station.] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2023, №1, S. 227-240.
9. Randeni P., N. R. Rypkema, E. M. Fischell, A. L. Forrest, M. R. Benjamin, H. Schmidt. Implementation of a Hydrodynamic Model-Based Navigation System for a Low-Cost AUV Fleet // 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), Porto, Portugal, 2018, pp. 1-6.
10. Cardenas P., Barros E. A. Estimation of AUV Hydrodynamic Coefficients Using Analytical and System Identification Approaches // IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, vol. 45, no. 4, pp. 1157-1176.
11. Borhaug E., Pivano L., Pettersen K.Y., et al. A Model-Based Ocean Current Observer for 6DOF Underwater Vehicles //IFAC Proceedings, 2007, vol. 40, pp. 169–174.
12. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Zuev A.V., Gubankov A.S., Minaev D.D. Development of a digital platform for the implementation of distributed control and navigation systems for underwater robotic systems performing technological operations in Arctic // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sc., 2021, vol. 816, paper 012009.
13. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011, 582 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юхимец Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор департамента автоматизации и робототехники, Дальневосточный Федеральный университет, 690922, г.Владивосток, о. Русский, п.Аякс, 10 e-mail: yukhimets.da@dvvu.ru

Dmitry A. Yukhimets, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of automation and robotics of Far Eastern Federal University, 10, Ajacs, Russian isl., Vladivostok, 690922, Russian Federation, e-mail: yukhimets.da@dvvu.ru

Губанков Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, заведующий лабораторией морской беспилотной авиации и морских авиационных систем, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а, e-mail: gubankov@dvo.ru

Anton S. Gubankov, Ph. D. (Eng.), Associate Professor, senior scientist Institute of Automation and control processes FEB RAS, Head of laboratory of marine unmanned aviation and marine aviation systems, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 50a, Verhneportovaya str., Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: gubankov@dvo.ru

Филаретов Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: filaretov@inbox.ru

Vladimir F. Filaretov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, e-mail: filaretov@inbox.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2023.

Научная статья

УДК 629.584

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.065>

Разработка метода управления большими группами АНПА на основе визуальной информации

Юхимец Д.А.^{1,2,3} undim@iacp.dvo.ru,

¹Севастопольский государственный университет, ²Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, ³МГУ им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. В статье предложен подход к построению систем управления группами АНПА, движущихся в заданном строю в режиме «лидер-ведомые». Указанная система управления основана на использовании видеоизображений, поступающих от бортовых камер АНПА-ведомых, для определения их положения относительно АНПА-лидера. Это позволяет обойтись без использования акустических каналов связи, а также позволяет масштабировать группу АНПА, используя отдельных ведомых, как лидеров для других ведомых группы. Для реализации безопасного движения группы АНПА в заранее неизвестной обстановке с препятствиями был предложен алгоритм формирования таких траекторий АНПА-ведомых, которые обеспечат обход препятствий на безопасном расстоянии и при этом гарантируют отсутствие столкновений между АНПА группы. Для обеспечения высокоточного движения АНПА-ведомых в строю была синтезирована СУ на основе прогнозирующей модели, что позволило обеспечить указанные точные перемещения в условиях переменности и неопределенности параметров самих АНПА. Для проверки работоспособности решения была создана программная реализация ИУС. Полученные результаты в среде моделирования CoppeliaSim подтвердили работоспособность и эффективность разработанного метода.

Ключевые слова: Автономный необитаемый подводный аппарат, групповое управление, обход препятствий, система управления, техническое зрение.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФ (грант 22-19-00392)

Для цитирования: Юхимец Д.А. Разработка метода управления большими группами АНПА на основе визуальной информации, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 53—61. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.065

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.065>

Development of formation control of AUV group on the base of visual information

Dmitry A. Yukhimets^{1,2,3} undim@iacp.dvo.ru,

¹ Sevastopol State University, ²Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, ³Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy

Abstract. The article proposes an approach to the construction of control systems for AUV groups moving in a given formation in the "leader-followers" mode. The specified control system is based on the use of video images coming from the onboard cameras of the AUV-followers to determine their position relative to the AUV-leader. This allows it to dispense with the use of acoustic communication channels and allows it to scale the AUV group using some followers as leaders for other followers of the group. To implement the safe movement of the AUV group in a previously unknown environment with obstacles, the algorithm was proposed for the formation of such trajectories of AUV-followers ones that will ensure the bypass of obstacles at a safe distance and at the same time guarantee the absence of collisions between the AUV of the group. To ensure the high-precision movement of the AUV-followers in the formation, a control system was synthesized. This control system is based on a predictive model, which made it possible to ensure these exact movements under conditions of variability and uncertainty of the parameters of the AUV themselves. To check the operability of the solution, a mathematical simulation was carried out. The results obtained in the CoppeliaSim modeling environment confirmed the operability and effectiveness of the developed method.

Keywords: Autonomous unmanned underwater vehicle, control system, formation control, obstacle avoidance, computer vision.

Financial Support: This work is supported by Russian Scientific Foundation (grant 22-19-00392).

For citation: Dmitry A. Yukhimets, Development of formation control of AUV group on the base of visual information, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 53—61. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.065

Введение

В настоящее время АНПА активно используются при исследовании и освоении Мирового океана, ввиду их возможности выполнять широкий спектр задач, связанных с обзорно-поисковыми и геологоразведочными работами,

океанографическими исследованиями и технологическими операциями [1, 2].

Одним из наиболее перспективных методов повышения эффективности выполняемых АНПА миссий является использование группы подводных аппаратов [3, 4]. Одной из основных стратегий формирования группы является система «лидер – ведомые» [5], в которой один из АНПА назначается

лидером, имеющим полную информацию о заданной миссии и формирующим траекторию движения группы, а другие АНПА назначаются ведомыми, получающими от лидера информацию о его текущем положении и на ее основе корректирующими свое движение с учетом предписанного им положения в строю.

При движении АНПА в подводной среде подразумевается его перемещение в заранее неизвестной обстановке, в которой могут иметься препятствия, препятствующие движению по траекториям, заданным в миссии. В этом случае АНПА должны обходить эти препятствия на безопасной дистанции, исключая при этом возможности столкновения с другими участниками группы.

Одним из подходов обеспечения безопасного движения роботов является использование специального расписания, при котором не допускается столкновение роботов [6-7]. Но использование такого метода допустимо лишь в случаях с заранее известной рабочей обстановкой. В работах [8, 9] описаны методы управления группой роботов на основе алгоритмов, которые предназначаются для роя роботов, что делает их малоприменимыми для использования с группой АНПА, так как роевое управление подразумевает под собой частый обмен информацией между членами группы, что может быть затруднительно в подводной среде. Также, управление группой роботов в неизвестной обстановке рассматривается в работах [10], где столкновения с препятствиями предотвращаются путем изменения типа заданного строя или скорости движения группы роботов.

Указанные примеры подразумевают коррекцию траектории роботов в группе с помощью постоянного обмена информацией между роботами группы, содержащей текущее положение друг друга. Такой подход является малоприменимым для АНПА, так как традиционно для передачи данных между подводными объектами используются акустические каналы связи, который имеет низкую пропускную способность и большие задержки в передаче данных. В работе [11] представлен метод, в котором формирование траектории участников группы АНПА при обходе препятствий осуществляется без необходимости частого обмена информацией между участниками группы. Недостатком предложенного подхода является то, что он предполагает, что каждый АНПА группы имеет информацию о своем положении в абсолютной системе координат (АСК), что требует использования специальных систем согласования показаний их навигационных систем [12] и тем самым, усложняет реализацию систем группового управления.

Для решения указанной проблемы используются методы группового управления АНПА, основанные на использовании видеоинформации, поступающей от бортовых камер ведомых [13]. В таких системах относительные положение и ориентация АНПА-лидера определяются при помощи бортовых видеокамер, идентифицирующих маяки, установленные на его корпусе. Однако в этом методе не рассматривается случай обхода группой АНПА препятствия, когда может произойти перекрытие области видимости бортовых камер другими АНПА.

В статье предлагается развитие методов из работ [11, 13] построения системы группового управления АНПА, который не требует непрерывного обмена данными по акустическим каналам связи, обеспечивает безопасный обход препятствий, а также допускает масштабирование количества АНПА в группе.

Постановка задачи

В работе рассматривается группа АНПА, состоящая из АНПА-лидера и АНПА-ведомых. Лидер имеет всю информацию о выполняемой миссии и формирует траекторию движения, которая обеспечивает выполнение этой миссии. АНПА-ведомые не имеют информации о миссии и следуют за лидером в заданном строю (рис.1), который обеспечивает покрытие бортовыми датчиками АНПА-ведомых заданной площади. АНПА-ведомые не имеют информации о своем положении в абсолютной системе координат (АСК). Для того, чтобы обеспечить согласованное движение группы АНПА на борту АНПА-лидера установлены несколько световых маяков, которые могут наблюдать АНПА-ведомые через свои бортовые видеокамеры и на основе этой видеоинформации формировать данные о текущем положении и ориентации АНПА-лидера относительно ведомого.

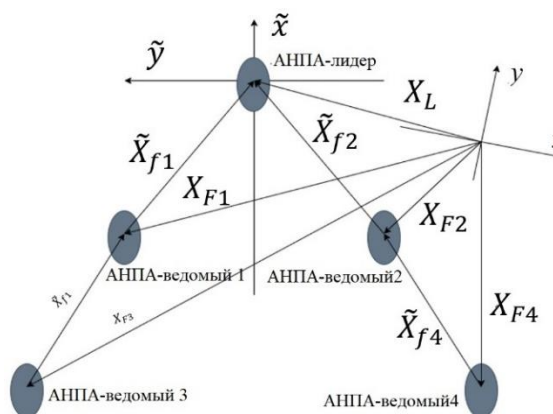


Рис. 1. Формирование строя АНПА

Расположение этих маяков известно относительно центра масс лидера. Положение маяков задается координатами $B = (B_1, B_2, \dots, B_k)$, где $B_i = (x_{bi}, y_{bi}, z_{bi})^T$ – координаты i -го маяка в СК АНПА-лидера; k – количество маяков на АНПА-лидере. Маяки имеют такие характеристики, что их можно идентифицировать на изображении, получаемом с видеокамеры ведомого. При этом формируется вектор $P = (P_1, P_2, \dots, P_k)$, где $P_i = (p_{xi}, p_{yi})$ – пиксельные координаты i -го маяка.

Так как в подводной среде дистанция обзора бортовых камер ограничена, то при использовании больших групп АНПА, отдельные АНПА-ведомые будут выступать как лидеры для других ведомых. В этом случае на их корпус также устанавливаются световые маяки, а АНПА-ведомые, для которых они заданы как лидеры начинают отслеживать их перемещения через свои бортовые видеокамеры. Это позволяет формировать большие группы АНПА, движущихся согласованно в предписанном строю.

При отсутствии препятствий положение целевой \tilde{X}_F^* точки каждого АНПА-ведомого в собственной СК рассчитывается исходя из известного положения АНПА-лидера в СК этого АНПА-ведомого:

$$\tilde{X}_F^* = (R_L^F)^T X_T + X_L^F, \quad (1)$$

где $X_L^F \in R^3$ – вектор координат положения АНПА-лидера в СК АНПА-ведомого; $R_L^F \in R^{3 \times 3}$ – матрица ориентации АНПА-лидера в СК АНПА-ведомого; $X_T \in R^3$ – желаемое положение АНПА-ведомого, задаваемое в СК, связанной с АНПА-лидером.

Когда группа АНПА входит в область, содержащую препятствия, возникает необходимость безопасного их обхода. При этом считается, что АНПА-лидер сам должен найти безопасный путь среди препятствий, который обеспечит выполнение заданной миссии [5], а АНПА-ведомые, следуя за лидером, должны также обойти препятствия безопасным способом.

Для этого все АНПА-ведомые оснащены дальномерами для обнаружения препятствий и расстояний до них. В процессе движения формируется вектор $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, где d_i – расстояние до препятствия, определенное i -ым дальномером. Этот вектор используется при расчете положения целевой точки АНПА при обходе обнаруженных препятствий.

Таким образом, в статье ставится и решается задача разработки метода формирования таких траекторий движения АНПА-ведомых (траекторий перемещения целевой точки X_T) при обходе препятствий, которые удовлетворяли следующим требованиям.

1. Формирование траекторий АНПА группы происходит независимо друг от друга. АНПА-ведомые формируют свои траектории используя информацию о положении АНПА-лидера и показания с бортовых дальномеров.

2. Формируемые траектории проходят на безопасном расстоянии от обнаруженных препятствий.

3. Во время движения и обхода препятствий должна быть исключена возможность столкновения АНПА группы между собой.

4. В процессе обхода препятствий не требуется сохранение заданного строя.

5. В процессе обхода препятствий АНПА-ведомые не должны обмениваться между собой данными о траекториях своих движений.

6. Так как камеры в подводной среде имеют ограниченную область видимости, то отдельные ведомые могут выступать в качестве лидеров для других ведомых.

При этом для обеспечения безопасного движения АНПА-ведомых по сформированным траекториям эти АНПА должны обладать высокоточными системами управления, которые могут сохранять заданное качество управления в условиях неопределенности и переменности их параметров. Эта задача также будет решаться в статье.

Метод формирования траектории движения группы АНПА

Для реализации согласованного движения группы АНПА-ведомых с помощью изображений, получаемых от бортовых камер, должны оцениваться положение и ориентацию лидера и рассчитывать

текущее положение целевой точки (1). Для этого на указанных изображениях с помощью стандартных алгоритмов обработки изображений выделяются световые маяки, установленные на лидере, и рассчитываются их пиксельные координаты.

Выражения, связывающие пиксельные координаты маяка на кадре с положением и ориентацией АНПА-лидера в системе координат камеры, имеют следующий вид:

$$P_i = F_{B2P}(U, B_i, X_L^C, A_L^C), \quad (2)$$

$$X_{Bi}^C(P_i) = R_L^C(A_L^C)B_i + X_L^C, \quad i = (\overline{1, k}),$$

где $X_{Bi}^C \in R^3$ – вектор координат маяков в СК камеры; $X_L^C \in R^3$ – вектор координат АНПА-лидера в СК камеры; R_L^C – матрица поворота АНПА-лидера относительно СК камеры; $A_L^C \in R^3$ – вектор углов ориентации АНПА-лидера относительно осей СК камеры. Система уравнений (2) содержит 6 неизвестных переменных, необходимо минимум 3 маяка для их однозначного определения.

Так как уравнения (2) являются существенно нелинейными, то не могут быть решены аналитически, то определение величин A_L^C и X_L^C возможно при помощи методов численной оптимизации [13, 14].

Таким образом, вектор координат АНПА-лидера в системе координат ведомого будет определяться выражением:

$$X_L^F = R_C^F X_L^C + X_C^F, \quad (3)$$

где $X_C^F \in R^3$ – вектор координат камеры ведомого в СК ведомого; $R_C^F \in R^{3 \times 3}$ – матрица поворота камеры в СК ведомого. Полученные координаты позволяют вычислить отклонения ведомых от их желаемого положения в строю и скорректировать его с помощью бортовой системы управления движением.

В случае, когда АНПА-ведомый обнаруживает препятствие на небезопасном от себя расстоянии, он должен совершить его обход. Для этого положение целевой точки \tilde{X}_F^* должно быть скорректировано.

Из-за отсутствия каналов связи между АНПА-ведомыми возникает проблема согласования траекторий движения участников группы в процессе обхода препятствий [11]. При этом желаемое положение АНПА-ведомых определяется относительно положения АНПА-лидера, и все ведомые могут определить положение лидера относительно себя. Этот факт можно использовать для того, чтобы гарантировать безопасное движение ведомых при обходе препятствий без непосредственного согласования их траекторий. То есть в процесс обхода препятствия можно реализовать с помощью согласованного изменения желаемых положений АНПА-ведомых относительно лидера. Указанное изменение должно происходить с использованием информации от бортовых дальномеров и обеспечивать безопасный обход обнаруженных препятствий.

Метод изменения желаемых положений АНПА-ведомых при обходе препятствий показан на рис. 2. На этом рисунке показаны АНПА-ведомые, двигающиеся в заданном строю за АНПА-лидером, и находящиеся на своих предписанных местах в строю. При этом для АНПА-ведомых во втором ряду лидерами являются ведомые первого ряда.

Черными точками на рисунке 2 обозначены желаемые места АНПА-ведомых в строю, а пунктирными линиями – траектории заданных

смещений АНПА-ведомых внутри строя при обходе обнаруженных препятствий.

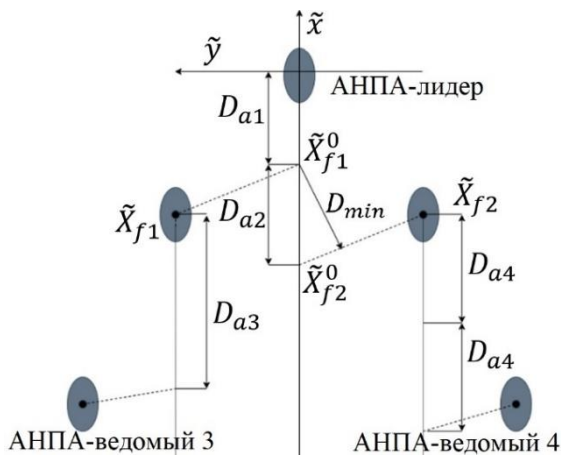


Рис. 2. Траектории движения АНПА – ведомых при обходе препятствий

При обнаружении бортовыми датчиками препятствий, расположенных на дистанции меньшей чем безопасная, желаемое положение АНПА-ведомого внутри строя начинает смещаться вдоль пунктирных линий в сторону траектории, по которой прошел АНПА-лидер. Так как АНПА-лидер уже нашел безопасную траекторию движения, то смещаясь к этой траектории АНПА-ведомые также обеспечат себе безопасный проход. При этом сами траектории перемещения АНПА-ведомых внутри строя выбираются так, чтобы обеспечить им безопасные перемещения друг относительно друга.

Указанные траектории движения являются отрезками прямых в СК АНПА-лидера. Начальная точка траектории i -го ведомого соответствует его желаемому положению в строю с координатами $\tilde{X}_{Fi} = (\tilde{x}_{fi}, \tilde{y}_{fi})$, а конечная точка лежит на оси \tilde{x} СК АНПА-лидера имеет координаты $\tilde{X}_{Fi}^0 = (\tilde{x}_{fi} \pm D_{ai}/2, 0)$. Величина D_{ai} выбирается для каждого ведомого так, чтобы при перемещении различных АНПА-ведомых вдоль этих заданных траекторий внутри строя расстояния между ними всегда были бы не меньше, чем безопасное расстояние D_{min} . Выбор знака при определении точки \tilde{X}_{Fi}^0 зависит от расположения АНПА-ведомого относительно оси \tilde{x} (знак “+” указывает на то, что АНПА расположен слева от оси \tilde{x} , знак “-” указывает на то, что АНПА расположен справа от оси \tilde{x}). Величины $D_{ai} > D_{min}$ зависят от особенностей строя и количества АНПА-ведомых.

Уравнение траектории смещения i -го АНПА-ведомого внутри строя, проходящей через точки \tilde{X}_{Fi} и \tilde{X}_{Fi}^0 в СК АНПА-лидера в горизонтальной плоскости имеет следующий вид [11]:

$$\pm \frac{D_{ai}}{2} (\tilde{y} - \tilde{y}_{fi}) + \tilde{y}_{fi} (\tilde{x} - \tilde{x}_{fi}) = 0. \quad (4)$$

Так как информацию о положении АНПА-лидера, АНПА-ведомые получают при помощи видеоинформации, поступающей от бортовой видеокамеры, которая отслеживает положение световых маяков лидера, становится возможной ситуация, при которой в процессе смещения АНПА-ведомые будут перекрывать собой область видимости маяков для других членов группы.

Для устранения указанной ситуации предлагается проводить дополнительное смещение в вертикальной плоскости вдоль оси \tilde{z} (рис. 3).

Формирование траектории смещения вдоль оси \tilde{z} происходит аналогично выражению (4):

$$\pm \frac{D_b}{2} (\tilde{y} - \tilde{y}_{Fi}) + \tilde{y}_{Fi} \tilde{z} = 0. \quad (5)$$

Величина D_b зависит от характеристик видеокамер, установленных на АНПА-ведомых, характеристик маяков АНПА-лидера и формы строя. Величина D_b выбирается для каждого ведомого таким образом, чтобы при любом их смещении вдоль заданных траекторий внутри строя достаточное количество маяков на лидере оставалось видимым для других членов группы.

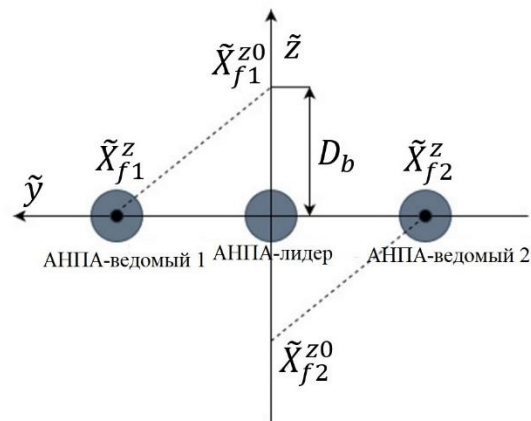


Рис. 3. Траектории движения АНПА-ведомых в вертикальной плоскости при обходе препятствий

В процессе движения за лидером ведомые определяют наличие и близость препятствий к траекториям с помощью бортовых датчиков. Если это расстояние меньше некоторого безопасного D_{min} , то целевая точка этого ведомого, задающего его положение в строю, смещается вдоль траектории, описываемой выражениями (3), (4). При срабатывании сразу нескольких датчиков оценивается расстояние до всех препятствий и выбирается ближайшее из них. Если расстояния до препятствий больше безопасного, то АНПА-ведомые продолжают движение в предписанном им месте в строю.

Для определения требуемого смещения программной точки АНПА-ведомого, необходимо определить ближайшую к ведомому точку препятствия, которую необходимо обойти. Так как смещение АНПА-ведомого задается в СК АНПА-лидера, то координаты обнаруженных точек препятствия переводятся в СК лидера. Указанный расчет происходит следующим образом:

$$X_{aj} = X_F^L + (R_L^F)^T \begin{bmatrix} d_j \cos(\alpha_j) \\ d_j \sin(\alpha_j) \end{bmatrix}, j = (\overline{1, n}), \quad (6)$$

где $X_{aj} \in R^3$ - координаты обнаруженной точки препятствия в абсолютной СК, фиксируемой j – м датчиком АНПА-ведомого; α_j – угол ориентации j -го датчика относительно продольной оси АНПА-ведомого; d_j – расстояние до точки на препятствии, определяемое j -м датчиком; X_F^L – вектор координат ведомого в системе координат лидера, рассчитывающийся по выражению:

$$X_F^L = -(R_L^F)^T X_L^F. \quad (7)$$

Для расчета смещения целевой точки, задающей положение АНПА-ведомого необходимо определить, какая точка на препятствии наиболее близка к траектории движения АНПА-ведомого. Так как АНПА-ведомый не знает заранее траекторию своего движения, так как она определяется движением АНПА-лидера, то будем считать, что прогнозируемая траектория движения АНПА-ведомого является прямой параллельной оси \tilde{x} (см. рис.2). Следовательно близость обнаруженных точек X_{dj} к указанной траектории можно вычислить по формуле:

$$\delta_j = S(\tilde{y}_{dj})(\tilde{y}_{dj} - \tilde{y}_F), j = (\overline{1, m}), \quad (8)$$

$$S(\tilde{y}_{dj}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{y}_{dj} \geq 0 \\ -1, & \text{если } \tilde{y}_{dj} < 0 \end{cases}$$

где $\tilde{y}_{di}, \tilde{y}_F$ – соответствующие координаты точек X_{dj} и X_F^* , соответственно.

Множитель $S(\tilde{y}_{dj})$ необходим для учета того, с какой стороны от ведомого обнаружено препятствие.

Ближайшая к траектории движения точка X_{dc} считается точка X_{dj} для которой величина δ_j будет иметь минимальное значение.

Новое программное положение целевой точки в СК АНПА-лидера для АНПА-ведомого будет вычисляться по выражению:

$$y_{FL}^* = \begin{cases} y_{dc} - \text{sign}(y_{dc})D_{min}, & \text{если } \min(\delta_j) < D_{min}, j = (\overline{1, m}) \\ \tilde{y}_{FL}, & \text{если } \min(\delta_j) < D_{min}, j = (\overline{1, m}) \end{cases}$$

$$\tilde{x}_{FL}^* = \tilde{x}_{FL} \pm \frac{D_{ai}(\tilde{y}_{FL} - \tilde{y}_{FL}^*)}{2\tilde{y}_{FL}}, \quad (9)$$

$$\tilde{z}_{FL}^* = \pm \frac{D_b(\tilde{y}_{FL} - \tilde{y}_{FL}^*)}{2\tilde{y}_{FL}},$$

где $\tilde{x}_{FL}^*, \tilde{y}_{FL}^*, \tilde{z}_{FL}^*$ – координаты нового положения целевой точки \tilde{X}_{FL}^* АНПА-ведомого при обходе препятствия в строю.

При обнаружении препятствий или наличии больших шумов в данных, формируемых сонарами, возможно резкое изменение положения целевой точки, что будет приводить к выработке некорректных сигналов управления. Устранить указанную ситуацию возможно с помощью фильтра низких частот для сглаживания траекторий [15]:

$$\hat{X}_{FL}^*(k) = \hat{X}_{FL}^*(k-1) + \beta(\tilde{X}_{FL}^*(k) - \hat{X}_{FL}^*(k-1)), \quad (10)$$

где $\hat{X}_{FL}^* \in R^3$ - сглаженное значение желаемого положения АНПА-ведомого на текущем шаге работы системы; $0 \leq \beta \leq 1$ – коэффициент сглаживания.

Перевод желаемого положения в СК, связанную с АНПА-ведомым, может быть произведен следующим образом:

$$\hat{X}_F^* = -(R_L^F)\hat{X}_{FL}^*. \quad (11)$$

Таким образом, предложенный метод формирования траекторий движения АНПА при их движении в группе позволяет обойтись без использования акустических каналов связи для согласования траекторий движения этих АНПА при обходе обнаруженных препятствий.

Система управления АНПА-ведомого

Полученные координаты целевой точки \hat{X}_F^* АНПА-ведомого являются отклонением его текущего положения от желаемого положения в строю. Это рассогласование должно быть отработано с помощью бортовой системы управления движением ведомого.

АНПА является сложным объектом, описываемым системой нелинейных уравнений [16, 17]. При этом, в процессе движения в группе и обхода препятствий требуется возможность двигаться по сложным пространственным траекториям. Таким образом, дополнительно возникает задача синтеза такой СУ АНПА, которая обеспечит движение этих АНПА в пространстве с достаточной точностью. Основная особенность такой системы должна быть возможность точного управления в условиях, когда скорость движения целевой точки относительно АНПА-ведомого непосредственно не определяется, а также необходимость обеспечения робастности системы без использования разрывных сигналов управления, что существенно упростит требования к аппаратной части исполнительных устройств АНПА. Поэтому в качестве системы управления движением АНПА-ведомых будет использоваться система управления с прогнозирующей моделью, которая отвечает описанным требованиям.

Для разработки СУ движением АНПА необходимо учитывать математическую модель динамики и кинематики АНПА.

Пространственные движения АНПА без учета кинематики описываются следующей системой уравнений [17]:

$$M\dot{v} + (C(v) + D(v))v + g(x) = \tau, \quad (12)$$

где $M = M_R + M_a \in R^{6 \times 6}$ – матрица инерции АНПА (включающая матрицу инерции M_R и матрицу M_a присоединенных масс и моментов инерции жидкости); $C(v) \in R^{6 \times 6}$ – матрица кориолисовых и центробежных сил; $D(v) \in R^{6 \times 6}$ – матрица гидродинамических сил и моментов; $g(x) = [F_{гсх}, F_{гсy}, F_{гсz}, M_{гсх}, M_{гсy}, M_{гсz}] \in R^6$ – вектор гидростатических сил и моментов; $x = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T \in R^6$ – вектор положения и ориентации АНПА в абсолютной СК; α, β, γ – углы крена, дифферента и курса АНПА, соответственно; $\tau = [\tau_{\partial x}, \tau_{\partial y}, \tau_{\partial z}, M_{\partial x}, M_{\partial y}, M_{\partial z}]^T \in R^6$ – вектор проекций тяг и моментов движителей АНПА на оси связанной с ним СК; $v = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \in R^6$ – вектор проекций линейной и угловой скоростей движения АНПА на оси связанной с ним СК.

Так как динамика движительного комплекса оказывает влияние на динамику АНПА, при синтезе СУ АНПА необходимо учитывать динамику движительного комплекса в общей математической модели движения АНПА.

Будем считать, что динамика движительного комплекса известна и описывается апериодическим звеном первого порядка:

$$\dot{t} = (t^* - \tau)/T_d, \quad (13)$$

где T_d – постоянная времени.

С учетом того, что положение АНПА-ведомого в АСК неизвестно, а положение его целевой точки в его СК является отклонением от желаемого положения в строю, то кинематические уравнение модели движения АНПА-ведомого с учетом выражения (11) имеют следующий вид:

$$\dot{X}_F^* = -R_L^F \dot{X}_{FL}^* - \dot{R}_L^F X_{FL}^*. \quad (14)$$

Выражения (12)-(14) описывают движение АНПА-ведомого в связанной с ним СК относительно желаемого положения в строю.

Указанная модель используется в системе управления с прогнозирующими моделями (УПМ) [18] для формирования текущих управляющих

воздействий на основе анализа предсказанной реакции АНПА на различные последовательности их изменений. Это позволяет обеспечить робастные свойства указанных СУ, то есть обеспечить их малую чувствительность к неопределенности или изменению параметров АНПА.

Для построения СУ с прогнозирующей моделью необходимо использовать дискретную модель динамики АНПА [18]:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= f(x_i, u_i), \quad i = 0, 1, 2, \dots \\ y_i &= Hx_i \end{aligned} \quad (15)$$

где векторы $x_i \in E^n, u_i \in E^m, y_i \in E^r$ представляют собой текущее состояние объекта, управляющие воздействия и вектор наблюдений соответственно; i – текущий такт работы системы; f – известная нелинейная вектор-функция; H – матрица измерений.

Модель (15) инициализируется на начальном такте текущим состоянием объекта управления и позволяет приближенно предсказать его динамику. Конечная последовательность векторов $x_{i+j}, j = 1, \dots, P$ – вычисляемая по этой модели представляет собой прогноз движения объекта на горизонте предсказания P . При этом программный сигнал считается постоянным, что соответствует условиям работы АНПА-ведомых, так как на основе визуальной информации определяется только положение АНПА-лидера без скорости его перемещения.

Для формирования оптимальной величины сигнала управления используется следующий функционал [18]:

$$\begin{aligned} J &= J(\bar{x}, \bar{u}); \\ \bar{x} &= (x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_{i+P}) \in E^{nP}, \\ \bar{u} &= (u_i, u_{i+1}, \dots, u_{i+P-1}) \in E^{mP} \end{aligned} \quad (16)$$

Поведение системы (15) на тактах $i = 1, 2, \dots, P$ (горизонте прогноза), однозначно зависит от выбора вектора \bar{u} . Учитывая, что имеется функциональная зависимость $\bar{x} = f(\bar{u})$, можно считать, что $J = J(\bar{x}, \bar{u}) = J(\bar{u})$. Таким образом, задача оптимизации с ограничениями формулируется следующим образом:

$$J = J(\bar{u}) \rightarrow \min_{u \in \Omega \subset E^{mP}} \quad (17)$$

где $\Omega = \{\bar{u} \in E^{mP} : u_{i+j-1} \in U, j = 1, 2, \dots, P\}$ – допустимое множество конечных последовательностей m -мерных векторов. $J(\bar{u})$ является функцией mP аргументов.

Таким образом, схема выработки сигналов управления в системе с прогнозирующей моделью (см. рис. 4) принимает следующий вид:

1. Производится измерение вектора состояния y_i ;
2. Решается оптимизационная задача (17) для прогнозирующей модели (15) с начальными условиями $\bar{x} = x_i$. Вычисляется экстремум функционала $J(u_i, u_{i+1}, \dots, u_{i+P-1})$ на допустимом множестве значений Ω .
3. Из сформированной оптимальной последовательности $u_i^*, u_{i+1}^*, \dots, u_{i+P-1}^*$ в качестве управляющего воздействия на следующем такте работы системы используется первый вектор.
4. Для следующего такта операции 1–3 повторяются.

При управлении движением АНПА на основе прогнозирующей модели функционал качества управления (17) на горизонте прогноза имеет вид:

$$J = \rho_1 \sum_{j=1}^P e_{i+j}^2 + \rho_2 \sum_{j=1}^P (u_{i+j} - u_{i+j-1})^2$$

где e_{i+j} – ошибка выхода системы; ρ_1 – вклад стоимости изменения ошибки в итоговый функционал J ; ρ_2 – вклад стоимости изменения управляющего сигнала в итоговый функционал J . Такая форма позволяет минимизировать не только ошибку выхода системы, но и резкие изменения управляющего воздействия на аппарат.



Рис. 4. Структурная схема работы системы управления АНПА с прогнозирующей моделью

Задающий сигнал r_i и текущая оценка y_i^* подаются на вход блока оптимизации. При этом в качестве задающего сигнала для случая АНПА-ведомого, получающего информацию по видеоканалу, используется нулевой сигнал, который говорит о том, что положение АНПА-ведомого должно совпадать с желаемым положением в строю. Этот блок генерирует последовательности управляющих воздействий u_i^* , подаваемых на прогнозирующую модель объекта управления, и получает прогноз поведения объекта y_i на P тактов вперед. Значение функционала $J(\bar{y}, \bar{u})$ вычисляется для каждой последовательности. Найденное оптимальное значение u_i^* является входом объекта управления, на который также действуют внешние возмущения w_i . Состояние объекта x_i изменяется, производятся измерения y_i с неизвестными шумами v_i , и состояние объекта уточняется наблюдателем.

Таким образом, в результате использования предложенной СУ можно обеспечить точное управление движением АНПА-ведомых в условиях неопределенности и переменности параметров этих АНПА.

Результаты математического моделирования

Для проверки разработанных алгоритмов и СУ было проведено математическое моделирование. В процессе моделирования исследовалось движение группы из пяти АНПА (1 лидер, 2 ведомых, 2 ведомых за ведомыми), двигающихся в клиновидном строю. Каждый АНПА-ведомый оснащен видеоканалом, с разрешением камер 512x512 пикселей, имел на борту 4 дальномера, расположенных в передней части АНПА. На корпусах АНПА-лидера и АНПА-ведомых были установлены маяки. Видеоканалы ведомых были установлены на поворотных платформах, которые обеспечивали центрирование

изображения на маяках в процессе перемещения. Моделирование работы камеры, дальномеров проводилось в среде CoppeliaSim (рис. 5) с использованием модели динамики движения АНПА (12)-(13). АНПА-лидер двигался по прямой, проходя через узкий проход между двумя препятствиями, а АНПА-ведомые, не имея возможности пройти препятствия с сохранением строя, смещаются за траекторию своего лидера.

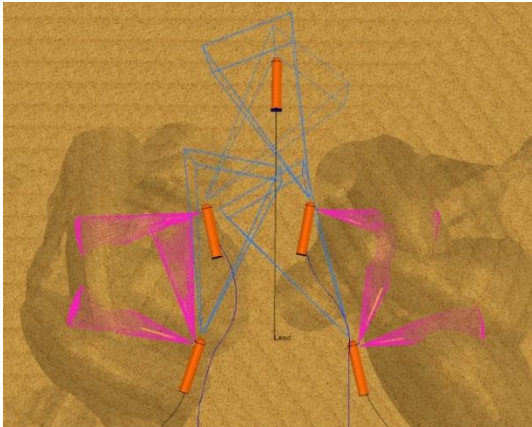


Рис. 5. Внешний вид модели в среде CoppeliaSim

На рисунке 6 показаны траектории движения АНПА группы в процессе обхода препятствий. Из рисунка видно, что в процессе движения АНПА-ведомые обнаруживают препятствия на своем пути и осуществляют их обход по сформированным безопасным траекториям. При этом траектории движения АНПА-ведомых повторяют форму препятствия, а расстояния между АНПА и обнаруженными препятствиями в процессе обхода сохраняется на безопасной величине 2м (рисунок 7).

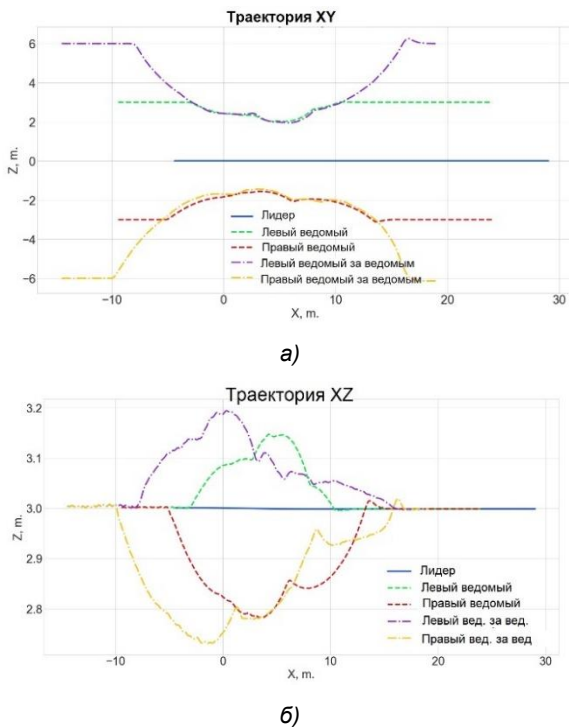


Рис. 6. Траектории движения АНПА-ведомых при обходе препятствий в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

При этом смещение АНПА-ведомых происходит также и в вертикальной плоскости (рисунок 6б), что обеспечивает им непрерывное отслеживание АНПА-лидера с помощью бортовых видеокамер даже в случае, когда эти АНПА выстраиваются друг за другом в процессе обхода препятствий.

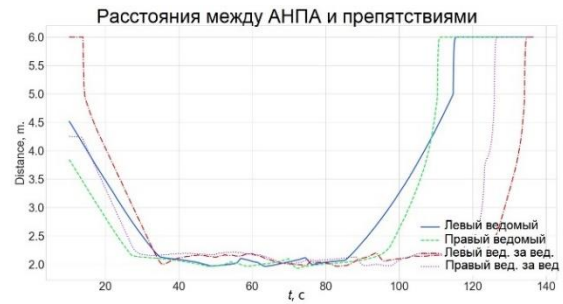


Рис. 7. Изменение расстояний от АНПА-ведомых до обнаруженных препятствий

На рисунке 8 показаны изменения расстояний между АНПА-группы. Из рисунка видно, что в процессе обхода препятствий расстояния между АНПА начинают уменьшаться, но нигде не снижаются меньше, чем 3.8м, что говорит о безопасном движении в группе при обходе препятствий.

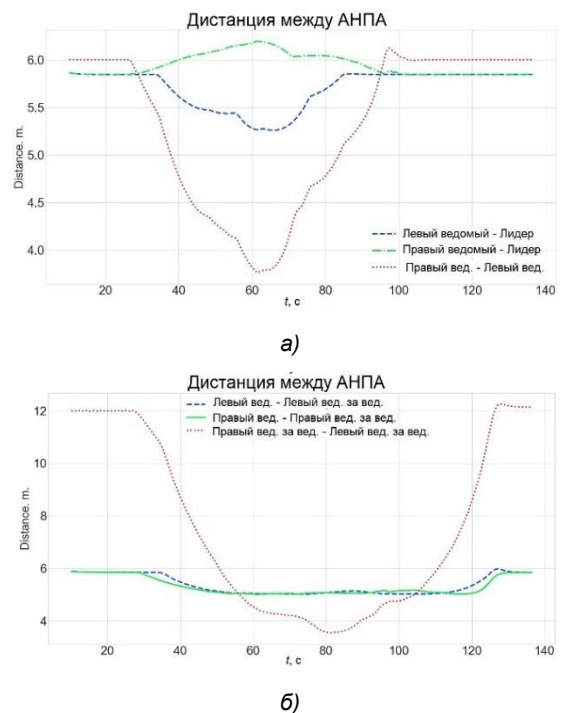


Рис. 8. Измерение расстояний между АНПА-ведомыми и лидером (а) и между АНПА-ведомыми (б)

Таким образом, результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного подхода.

Заключение

В статье предложен подход к построению систем управления группами АНПА. Указанная система управления основана на использовании видеоизображений, поступающих от бортовых камер АНПА-ведомых, для определения их положения

относительного АНПА-лидера. Это позволяет обойтись без использования акустических каналов связи, а также позволяет масштабировать группу АНПА, используя отдельных ведомых, как лидеров для других ведомых группы.

Для реализации безопасного движения группы АНПА в заранее неизвестной обстановке с препятствиями был предложен алгоритм формирования таких траекторий АНПА-ведомых, которые обеспечат обход препятствий на безопасном расстоянии и при этом гарантируют отсутствие столкновений между АНПА группы.

Для обеспечения высокоточного движения АНПА-ведомых в строю была синтезирована СУ на основе прогнозирующей модели, что позволило обеспечить указанные точные перемещения в условиях перемещения и неопределенности параметров самих АНПА.

Для проверки работоспособности решения была создана программная реализация ИУС. Полученные результаты в среде моделирования CoppeliaSim подтвердили работоспособность и эффективность разработанного метода.

Литература

1. Ляхов, Д.Г. Современные задачи подводной робототехники // Подводные исследования и робототехника, 2012, Т.13, №1, С. 15-24.
2. Агеев, М. Д. Автономные подводные роботы: Системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко; под общ. ред. М.Д. Агеева, М.: Наука, 2005, 398 с.
3. Пшихопов В.Х. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Д.А. Белоглазов, А.Р. Гайдук, Е.Ю. Косенко, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, В.В. Соловьев, А.Е. Титов, В.И. Финаев, И.О. Шаповалов; под общ. ред. В.Х. Пшихопова, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015, 305 с.
4. Каляев И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, 280 с.
5. Das B., Subudhi B., Pati B. Cooperative formation control of autonomous underwater vehicles: An overview // International Journal of Automation and Computing, 2016, vol.13, no. 3, pp.199-225.
6. Spensieri D., Carlson J. S., Ekstedt F., Bohlin R. An Iterative Approach for Collision Free Routing and Scheduling in Multirobot Stations // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 950 – 962. DOI: 10.1109/TASE.2015.2432746
7. Vo C., Harrison J. F., Lien J. Behavior-based motion planning for group control // Proc. Of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO, 2009, pp. 3768 – 3773. DOI: 10.1109/IROS.2009.5354032
8. Langerwisch M., Wagner B. Dynamic path planning for coordinated motion of multiple mobile robots // Proc. Of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Washington, DC, 2011, pp. 1989 – 1994.
9. Yong L. Yu L., Yipei G., Kejie C., Cooperative path planning of robot swarm based on ACO // Proc. of the IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronics and Automation Control Conference (ITNEC), pp. 1428–1432, 2017. DOI: 10.1109/ITNEC.2017.8285033
10. Lui S., Sun D., Zhu C., Coordinated Motion Planning for Multiple Mobile Robots Along Designed Paths with Formation Requirement // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 16, no. 6, pp. 1021–1031, 2011. DOI: 10.1109/ICINFA.2010.5512335
11. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Разработка метода формирования траекторий движения группы подводных роботов в среде с препятствиями во время их обхода. Мехатроника, автоматизация, управление, 2020, Т.21, №6, pp. 356 — 364. DOI: 10.17587/mau.21.356-365
12. Filaretov, V.; Subudhi, B.; Yukhimets, D.; Mursalimov, E. The method of matching the navigation systems of AUV-leader and AUV-followers moving in formation // Proceedings of the 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russia, September, 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867597
13. Yukhimets D., Filaretov V. The AUV-Follower Control System Based on the Prediction of the AUV-Leader Movement Using Data from the Onboard Video Camera // Journal of Marine Science and Engineering, 2022, Т. 10, №. 8, Paper Number 1141, P. 1-24. DOI:10.3390/jmse10081141.
14. Strutz, T. Data Fitting and Uncertainty: A practical introduction to weighted least squares and beyond, 2nd edition, Springer Vieweg, 2016
15. Rablincar L., Goud B. Theory and Application of Digital Signal Processing, Moscow, Mir, 1978, 848 p
16. Пантов Е.Н., Махин Е.Е., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1973. -209 с.
17. Fossen T.I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. – John Wiley & Sons, 2011
18. Budiyono Agus Model predictive control for autonomous underwater vehicle // Indian J. of Geo-Marine Sciences. – 2011.– Vol. 40(2). – P. 191–199.

References

1. Lyahov D.G. Sovremennye zadachi podvodnoy robototekhniki [Modern tasks for underwater robotic] // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika, 2012, Vol.13, No.1, pp. 15-24.
2. Ageev M.D. Avtonomnye podvodnye roboty: Systemy i Tekhnologii [Autonomous underwater vehicles: Systems and Technology], Moscow, Science, 2005, 398 p.
3. Pshikhopov V.H. Gruppovoe upravlenie podvizhnymi obektami v neopredelennykh usloviyakh [The group control of moving objects in an unknown environment], Moscow, PHIZMATLIT, 2015, 305 p.
4. Kalyaev I.A. Model ii algoritmy kolektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and Algorithms of the Collective Control in robot groups] , Moscow, PHIZMATLIT, 2009, 280 p.

5. Das B., Subudhi B., Pati B. Cooperative formation control of autonomous underwater vehicles: An overview // International Journal of Automation and Computing, 2016, vol.13, no. 3, pp.199-225.
6. Spensieri D., Carlson J. S., Ekstedt F., Bohlin R. An Iterative Approach for Collision Free Routing and Scheduling in Multirobot Stations // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 950 – 962. DOI: 10.1109/TASE.2015.2432746
7. Vo C., Harrison J. F., Lien J. Behavior-based motion planning for group control // Proc. Of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO, 2009, pp. 3768 – 3773. DOI: 10.1109/IROS.2009.5354032
8. Langerwisch M., Wagner B. Dynamic path planning for coordinated motion of multiple mobile robots // Proc. Of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Washington, DC, 2011, pp. 1989 – 1994.
9. Yong L. Yu L., Yipei G., Kejie C., Cooperative path planning of robot swarm based on ACO // Proc. of the IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronics and Automation Control Conference (ITNEC), pp. 1428–1432, 2017. DOI: 10.1109/ITNEC.2017.8285033
10. Lui S., Sun D., Zhu C., Coordinated Motion Planning for Multiple Mobile Robots Along Designed Paths with Formation Requirement// IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 16, no. 6, pp. 1021–1031, 2011. DOI: 10.1109/ICINFA.2010.5512335
11. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. The path planning method for AUV group moving in environment with obstacles, Mechatronics, automation, control, 2020, Vol.21, No.6, 2020, pp. 356 — 364. DOI: 10.17587/mau.21.356-365
12. Filaretov, V.; Subudhi, B.; Yukhimets, D.; Mursalimov, E. The method of matching the navigation systems of AUV-leader and AUV-followers moving in formation // Proceedings of the 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russia, September, 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867597
13. Yukhimets D., Filaretov V. The AUV-Follower Control System Based on the Prediction of the AUV-Leader Movement Using Data from the Onboard Video Camera // Journal of Marine Science and Engineering, 2022, T. 10, №. 8, Paper Number 1141, P. 1-24. DOI:10.3390/jmse10081141.
14. Strutz, T. Data Fitting and Uncertainty: A practical introduction to weighted least squares and beyond, 2nd edition, Springer Vieweg, 2016
15. Rablinear L., Goud B. Theory and Application of Digital Signal Processing, Moscow, Mir, 1978, 848 p
16. Pantov E.N., Makhin E.E., Sheremetov B.B. Osnovy teorii dvizheniya podvodnikh apparatov [Fundamentals of the theory of motion of underwater vehicles], Leningrad, Sudostroenie, 1973, 209 p.
17. Fossen T.I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. – John Wiley & Sons, 2011
18. Budiyo Agus Model predictive control for autonomous underwater vehicle // Indian J. of Geo-Marine Sciences. – 2011.– Vol. 40(2). – P. 191–199..

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юхимец Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН, 690041, г.Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: undim@iacp.dvo.ru

Dmitry A. Yukhimets, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading researcher IACP FEB RAS, 5, Radio str., Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: undim@iacp.dvo.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2023.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 531.8

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.066>

Об особенностях передачи видеоизображений в подводной робототехнике

Бельченко Ф.М.¹ philepp@mail.ru, Ермолов И.Л.¹ ermolov@ipmnet.ru,
Нагайцев Г.Н.¹ georgijnagajcev@gmail.com, Остриков П.П.^{1,2} ostricov93@yandex.ru

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,

²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Телеуправляемые (дистанционно управляемые) роботы составляют значительную часть современного парка роботов и используются для разведки местности и контроля состояния важных объектов и инфраструктуры в подводной среде. Применение телеуправления с участием оператора связано с несовершенством современных автономных робототехнических комплексов, поскольку в определенных ситуациях необходимо быстро и точно принимать решения по управлению роботом.

Человек в цепи управления подводным роботом является ключевым звеном. При этом он сильно ограничен техническими возможностями информационных средств, ему свойственно допускать ошибки принятия решений, подвержен стрессу, усталости. Следовательно, необходимо проводить разработки, облегчающие и повышающие эффективность работы оператора.

В работе рассматриваются особенности проведения подводной съемки с помощью робототехнического комплекса. Изучены проблемы водной среды, влияющие на качество и достоверность отображения окружающего пространства. Отдельно рассмотрены вопросы восприятия информации оператором от системы телеметрии подводного робота.

В настоящей работе также предложен ряд решений по совершенствованию систем телеметрии морских роботов. В качестве одного из решений предлагается применить наработки в области теории отображения перцептивного пространства, ранее успешно использовавшиеся в космической отрасли. Благодаря стремительному развитию и удешевлению систем технического зрения и видеонаблюдения, данные разработки стало возможно внедрять в морской робототехнике [1].

Ключевые слова: подводный робот, телеметрия, обработка видеоизображения, преобразование перспективы на изображении, дисторсия.

Для цитирования: Бельченко Ф.М., Ермолов И.Л., Нагайцев Г.Н., Остриков П.П. Об особенностях передачи видеоизображений в подводной робототехнике, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 62—67. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.066

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.066>

Specifics of underwater images transmission in marine robotics

Filipp M. Belchenko¹ philepp@mail.ru, Ivan L. Ermolov¹ ermolov@ipmnet.ru,
Georgij N. Nagajcev¹ georgijnagajcev@gmail.com, Pavel P. Ostrikov^{1,2} ostricov93@yandex.ru

¹shlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,

²St.Petersburg State Marine Technical University

Abstract. Teleoperated (remotely controlled) robots make up a significant part of the modern robot fleet and are used for terrain reconnaissance and monitoring the condition of important objects and infrastructure in the underwater environment. The use of telecontrol usage with the operator participation is associated with the modern autonomous robotic systems imperfections, since in certain situations it is necessary to quickly and accurately make robot control decisions.

A person is a key link in the underwater robot control chain. At the same time, he is severely limited by the information sources technical capabilities, he tends to make decision-making errors, and is susceptible to stress and fatigue. Therefore, it is necessary make developments that make the operator's work easier and more efficient.

Paper discusses underwater computer vision features of using a robotic complex. The problems of the aquatic environment that affect the quality and reliability of the surrounding space display have been studied. The operator information perception issues from the telemetry system of the underwater robot are considered separately.

This work also proposes a number of solutions to improve the systems marine robots telemetry. As one of the solutions, it is proposed to apply developments in the field of the mapping perceptual space theory, previously successfully used in the space industry. Thanks to the rapid development and reduction in technical vision and video surveillance systems costs, these developments have become possible to implement in marine robotics

Keywords: underwater robot, telemetry, video processing, image perspective transformation, distortion

For citation: Filipp M. Belchenko, Ivan L. Ermolov, Georgij N. Nagajcev, Pavel P. Ostrikov Specifics of underwater images transmission in marine robotics. Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 62—67. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.066

Введение

Влияние свойств водной среды на процесс формирования подводных изображений (ПИ) начало исследоваться еще до появления методов цифровой обработки изображений, в связи с проведением фото- и видеосъемки под водой (например, [6]). Уже тогда было ясно, что условия наблюдения в воде тем отличаются от наблюдений в воздухе, что показатель ослабления света в воде в сотни раз превышает показатель ослабления в воздухе. Ослабление света водой приводит к уменьшению наблюдаемой яркости объекта. Эти потери предлагалось компенсировать применением светосильной техники. Хорошие результаты можно получить, снимая предметы под водой на близком расстоянии или пользуясь источниками искусственного света, увеличивая освещенность

Однако чрезвычайно трудно получить натуральные цветные снимки из-за искажений, вызванных тем, что ослабление света значительно отличается в разных диапазонах видимого спектра.

При разработке подобных алгоритмов важно иметь измеримые критерии эффективности их работы, позволяющие проводить их оценку и оптимизацию параметров. Критерии задаются на множестве пар изображений: для каждого входного изображения задано идеальное целевое изображение, с которым и сравнивается результат работы алгоритма. Важным требованием к такому набору данных является его разнообразие и большие размеры. Для формирования таких пар физическими средствами необходимо подготовить набор сцен, каждая из которых снимается как минимум дважды: один раз в воде с заданными свойствами, а второй – в идеальной среде.

1. Общие проблемы съемки под водой

Вода, являясь средой относительно прозрачной, по физическим свойствам значительно отличается от воздушной среды. Будучи в 770 раз плотнее воздуха, она практически несжимаема, достаточно хорошо передает звуковые колебания и обладает значительно большей, по сравнению с воздухом, теплоемкостью. Вода, даже оптически чистая, примерно в 1000 раз сильнее воздуха ослабляет видимый свет. Если дальность видимости предметов в воздушной среде может достигать нескольких километров, — а космонавты отчетливо видят очертания материков и города даже за несколько сотен километров, — то дальность видимости в водной среде не превышает нескольких десятков метров. Подводный фотограф даже в ясный солнечный день видит предметы, окутанные в легкую голубоватую дымку. При фотографировании в воде изображения получаются малоcontrastными, а при цветной фотосъемке очень трудно добиться правильной и точной цветопередачи (рис. 1). Попадая под воду на небольшую глубину, человек наблюдает гамму цветовых тонов, близкую к надводной.

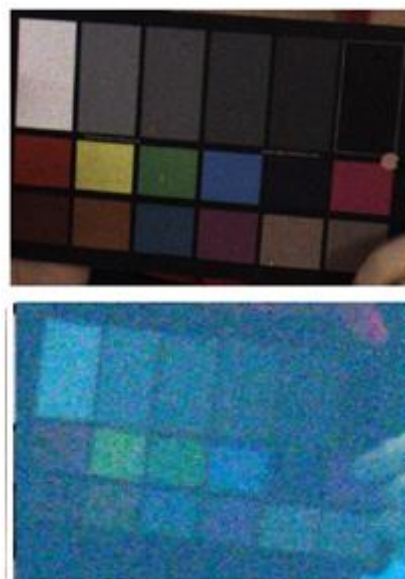


Рис. 1 Результаты съемки в воздушной среде и под водой [2].

В качестве основных физических ограничений, обусловленных особенностями распространения световых волн ближнего инфракрасного и видимого диапазонов в природной водной среде, можно выделить следующие факторы:

1. Высокая оптическая плотность среды, обуславливающая сильное ослабление интенсивности световых волн (в 1000 раз и более по сравнению с воздухом в зависимости от условий) и ограничивающая максимальную дальность прямой видимости десятками метров.
2. Низкая естественная освещенность (в большинстве случаев), приводящая к необходимости использования дополнительных искусственных источников освещения.
3. Динамичная относительная прозрачность среды, обуславливающая высокое поглощение световых волн и изменение дальности прямой видимости в широком диапазоне.
4. Наличие в воде взвесей, обуславливающих повышенное рассеяние световых волн и помеху обратного рассеяния (ПОР) при использовании осветительных приборов в активных подводных СТЗ.
5. Эффекты рефракции световых волн, светопоглощение и светорассеяние.

Ослабление светового потока обусловлено двумя основными причинами: поглощением и рассеянием. Наибольшие затруднения при работе подводных СТЗ вызываются рассеянием. Рассеяние света в воде вызывается как присутствием в воде механических частиц, так и перемещениями молекул самой воды, но в мутной воде в большей степени зависит именно от загрязненности взвешенными частицами.

В мутной воде и на больших глубинах используются активные системы подводного видения с прожекторами в своем составе (рис. 2).

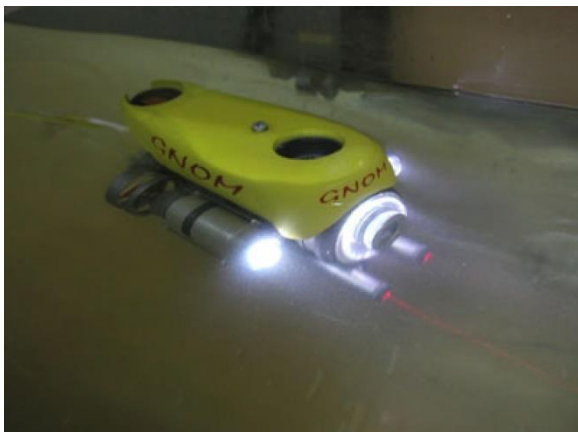


Рис. 2 АНПА «Гном» с камерами оснащенными прожекторами.

Для нормальной подводной съёмки важно соотношение количеств рассеянного и направленного света, поскольку существенная доля потока излучения рассеивается в заднюю полусферу относительно направления распространения. Рассеянный свет не может участвовать в образовании изображения, напротив, попадая через объектив на матрицу, он вызывает ее паразитную засветку. При этом повышение силы источника света незначительно увеличивает дальность видимости, поскольку повышение мощности светового пучка приводит к увеличению ПОР, снижающей контрастность изображения. Кроме того, повышение силы света светильника в 10 раз увеличивает дальность видимости всего на 15%. Таким образом, возникающая в канале распространения ПОР создает значительные сложности при приеме слабого отраженного сигнала.

Одним из эффективных методов подводной съёмки является метод с применением инфракрасного спектра. Расширение спектра съёмки позволяет получить изображение сквозь преграды для видимого спектра. При подводной съёмке такой преградой является взвесь возникающая в сезоны цветения воды и при активном перемещении по песчаному и илистому дну.

Одним из основных преимуществ инфракрасных камер под водой является их способность регистрировать излучение, которое не видно невооруженным глазом. Инфракрасное излучение позволяет обнаруживать объекты даже в условиях низкой видимости, например, при неполной прозрачности воды или в темноте. Благодаря инфракрасным камерам, дайверы могут обнаруживать подводные объекты и животных, которых они раньше не могли увидеть (рис. 3).

Еще одной особенностью инфракрасных камер при использовании под водой является их способность работать на глубинах, недоступных для обычных камер. Камеры под водой, оснащенные инфракрасными датчиками, могут работать на глубинах до нескольких сотен метров, в то время как обычные камеры теряют свою функциональность даже на глубине нескольких метров.



Рис. 3 Инфракрасная камера

Мутная вода характеризуется наличием большого количества различных частиц, таких как песок, глина или водоросли, которые существенно затрудняют обзор под водой. В результате, наблюдение за объектами или действиями приходится ограничивать величиной, которую можно увидеть невооруженным глазом.

Однако, инфракрасная камера под водой способна преодолеть данное ограничение благодаря использованию инфракрасного излучения. Инфракрасные лучи способны проникать через мутную воду и достигать объектов на значительном расстоянии от камеры. Таким образом, оператор может получить изображение и видеть то, что остается за пределами обзора невооруженного глаза.

2. Оптические проблемы съёмки под водой

Важной проблемой при погружении камеры морского РТК под воду является возникновение радиальной дисторсии изображения, которая зависит от ряда параметров воды. К таким параметрам относятся: соленость, плотность, наличие примесей, видимых частиц и присутствие планктона. Все эти факторы оказывают влияние на степень искажения изображения, что в контексте работы робототехнических систем подводной видеосъёмки может приводить к ошибкам измерения и ухудшения восприятия видеопотока (рис. 4) [3].

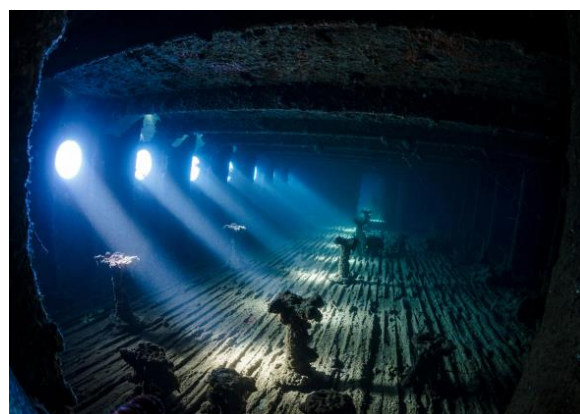


Рис. 4 Пример дисторсии при подводной съёмке. Стены и потолок искажены.

Для решения этой проблемы классическим способом достаточно выполнить повторную калибровку камеры под водой, однако это достаточно трудоемко: требуется сначала сделать набор изображений калибровочного объекта с разных ракурсов, а затем выполнить автоматизированный

поиск параметров исправления РД, качество которого определяется качеством собранного калибровочного набора изображений. Однако данная процедура длительна по времени и не может оперативно использоваться при работе с робототехническими комплексами

В качестве альтернативы предлагается применить наработки в области теории отображения перцептивного пространства, ранее успешно использовавшиеся в космической отрасли и ряде проектов, связанных с навигацией [8]. Основные алгоритмы для внесения целевых искажений будут работать с преобразованиями перспективы на видеоизображениях [4].

На базе лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики им. А.Ю.Ишлинского в настоящее время начата разработка тестового варианта программного обеспечения, позволяющего оператору в реальном времени преобразовывать перспективу на изображении. За основу для разработок взята библиотека OpenCV для работы с системами технического зрения и библиотека PyGame для реализации человеко-машинного взаимодействия с оператором.

Данная программа реализует математическую модель на основе конверсионной формулы преобразования перспективы. В общем случае конверсионная формула преобразования перспективы изображения выглядит следующим образом [5]:

$$[x' \ y' \ w'] = [u \ v \ w] \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь u и v – координаты крайней точки преобразованного изображения; w определяет тип перспективного преобразования; C_{ij} – параметры перспективного преобразования, из которых следует выделить:

$C_{00}, C_{01}, C_{10}, C_{11}$ – осуществляют масштабирование, вращение и сдвиг;

C_{20}, C_{21} – определяют панорамирование;

C_{02}, C_{12} – генерируют перспективное преобразование.

В OpenCV на основе формулы 1 реализованы вычисления матриц перспективного преобразования, представленные на рис. 5.

$u_i =$	$\frac{c_{00} * x_i + c_{01} * y_i + c_{02}}{c_{20} * x_i + c_{21} * y_i + c_{22}}$	$\frac{x_0 \ y_0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -x_0 * u_0 \ -y_0 * u_0 \ \backslash \ /c_{00} \ /u_0 \backslash}{x_1 \ y_1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -x_1 * u_1 \ -y_1 * u_1 \ \ c_{01} \ u_1 }$
$v_i =$	$\frac{c_{10} * x_i + c_{11} * y_i + c_{12}}{c_{20} * x_i + c_{21} * y_i + c_{22}}$	$\frac{x_2 \ y_2 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -x_2 * u_2 \ -y_2 * u_2 \ \ c_{02} \ u_2 }{x_3 \ y_3 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -x_3 * u_3 \ -y_3 * u_3 \ \ c_{10} \ u_3 }$
		$\frac{0 \ 0 \ 0 \ x_0 \ y_0 \ 1 \ -x_0 * v_0 \ -y_0 * v_0 \ \ c_{11} \ v_0 }{0 \ 0 \ 0 \ x_1 \ y_1 \ 1 \ -x_1 * v_1 \ -y_1 * v_1 \ \ c_{12} \ v_1 }$
		$\frac{0 \ 0 \ 0 \ x_2 \ y_2 \ 1 \ -x_2 * v_2 \ -y_2 * v_2 \ \ c_{20} \ v_2 }{0 \ 0 \ 0 \ x_3 \ y_3 \ 1 \ -x_3 * v_3 \ -y_3 * v_3 \ / \ /c_{21} \ /v_3 \backslash}$

Рис.5. Матрица перспективного преобразования библиотеки OpenCV

Разработан прототип программного обеспечения для пультов управления оператора. Основу данной программы составляют пять модулей (рис. 6):

1. Модуль инициализации видеокamеры.

2. Обработчик, осуществляющий получение информации с видеокamеры и проводящий первичную обработку видеоизображения.

3. Модуль обработки сигналов от компьютерной мыши/джойстика, обеспечивающий выбор угловых точек

4. Модуль изменения перспективы на изображении.

5. Модуль обработки сигналов от клавиатуры/джойстика, для обеспечения ручного преобразования перспективы.

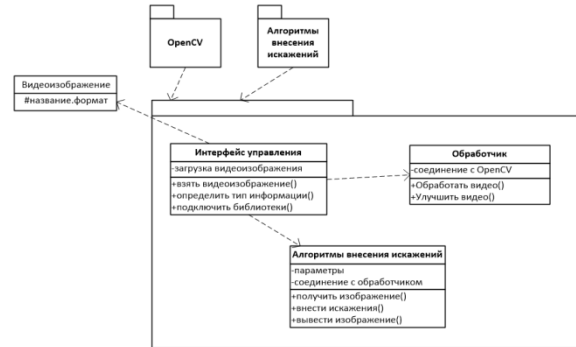


Рис. 6 Статическая модель разрабатываемого программного обеспечения системы телеметрии.

Модуль инициализации видеокamеры стандартный блок в библиотеке OpenCV производящий инициализацию оборудования и настройку матрицы камеры [6].

Обработчик, осуществляющий получение информации с видеокamеры и проводящий первичную обработку видеоизображения, производит генерацию изображения в памяти ЭВМ и ее дальнейшее преобразование в формат, воспринимаемый модулем PyGame[7].

Модуль обработки сигналов от компьютерной мыши/джойстика, обеспечивающий выбор угловых точек производит выбор интересующей нас области от рисовки этой области на изображении.

Модуль изменения перспективы на изображении сначала производит передачу координат угловых точек и расчета размера результирующего изображения.

3. Проблемы восприятия видеоизображения оператором.

Также необходимо затронуть проблему восприятия изображений зрительными органами человека. Визуальное восприятие изображения связано как со специфическими особенностями физиологии зрения, так и с системными ограничениями, заложенными в используемых стандартах хранения и представления видеоинформации.

Ошибки и искажения в изображениях заметны глазу, если они превышают порог заметности. Заметность изображений зависит от ряда факторов объективного и субъективного характера[8]:

1. Оптической неидеальности зрения.
2. произвольных движений глаза (смещения точки внимания каждые 0,3-0,7 секунды) при восприятии неподвижных изображений.
3. Средней яркости фона.
4. Временных и пространственных вариаций яркости в окрестности рассматриваемого элемента;

5. Пространственной и временной формы сигнала изображения и др.

В целом высокие пороги заметности имеют место в очень темных или очень ярких участках изображения. На среднеярких, серых участках заметность изменений яркости наибольшая.

Еще одной проблемой является субъективное восприятие цвета зрительными органами человека, так как пока не предложены алгоритмы оценки визуально воспринимаемого цвета.

Экспериментальные исследования показывают, что на визуально воспринимаемый цвет влияют следующие факторы:

1. Спектральный состав света, который излучается источником.

2. Спектральное распределение излучения, падающего в глаз наблюдателя от всех объектов находящихся в поле зрения;

3. Пространственное распределение и форма объекта.

4. Наличие цветовой памяти глаза (хроматическая адаптация) и др.

Количественная оценка всех этих факторов является невыполнимой задачей. Экспериментально показано, что восприятие цвета обычно можно характеризовать тремя факторами: для источников света – светимостью, цветовым тоном и насыщенностью, для объектов – освещенностью, цветовым тоном и насыщенностью.

Светимость характеризуется интенсивностью излучаемого источником светового потока, а освещенность определяет долю отраженного или пропущенного объектом падающего света. Эти два понятия отражают одну и ту же характеристику цветового восприятия объекта – яркость.

Цветовой тон – субъективно воспринимаемый признак цвета. Который позволяет отнести его по сходству к тому или иному спектральному цвету. Численно это параметр можно определить по доминирующей длине волны, т.е. длины волны монохромного излучения, которое в смеси с белым

дает данный цвет. Насыщенность - признак цвета, выражающий степень его отличия от белого той же яркости.

Поскольку не существует теории, поясняющей условия восприятия цветов, изменяющихся в пространстве и во времени, для оценки свойств зрения проводился ряд экспериментов. В результате которых были получены данные по временному восприятию цвета и известно, что вариации цвета менее заметны чем вариации яркости. Наиболее заметны изменения зеленого цвета, затем красного, и наименее всего синего. Для получения подводных изображений это существенный фактор так как красный и зеленый цвета наиболее сильно повержены рассеиванию под водой.

Заключение

В настоящее время в лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики им. А.Ю.Ишлинского проводятся исследования для совершенствования разрабатываемого модуля обработки изображений.

Модуль способен работать с видеопотоком, обеспечивая частоту обработки изображений 30 к/сек.

В дальнейшем на базе библиотеки PyGame планируется реализация программной оболочки для пульта управления на базе носимого электронного устройства, обеспечивающей работу с различными методами обработки изображений совместно с технологией преобразования видеоперспективы.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 123021700055-6) и в рамках НИР "«Поисковые исследования для создания компонентов РТК для очистки корпусов судов от обрастаний» для реализации стратегического проекта 4 «Морская робототехника» в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»

Литература

1. Раушенбах Б.В. Геометрия картины и зрительное восприятие. СПб.: Азбука-классика, 2002. 320 с.
2. Шепелев, Д. А. О точности цветопередачи при поканальном моделировании подводных изображений [текст] / Д. А. Шепелев // Информационные процессы. — 2020. — т. 20, № 3. — с. 254—268.
3. Garsia G., Suares O., Aranda G., Tersero S., Grasoas O., Enano N. Learning Image Processing with OpenCV. USA, Publisher Packt, 2015. 232 p.
4. Бельченко Ф. М., Ермолов И. Л., Остриков П. П. Разработка программного модуля преобразования перспективы на видеоизображении для выбора и анализа элементов изображения // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2023. – № 9(280). – С. 11-15.
5. Бельченко, Ф. М. Разработка системы видеонаблюдения с возможностью внесения целевых искажений отображаемого пространства совместно с алгоритмами сегментации / Ф. М. Бельченко, И. Л. Ермолов, П. П. Остриков // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2023. – № 4(275). – С. 18-22.
6. Бельченко, Ф. М., Ермолов И.Л., Остриков П. П. Анализ эффекта преобразования прямой и обратной перспективы на изображениях, полученных от БПЛА, // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : Материалы мультиконференции. В 4-х томах, Волгоград, 11–15 сентября 2023 года / Редколлегия: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. Том 1. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 119-121.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610449 Российская Федерация. Программа внесения целевых искажений для системы телеметрии : № 2022686286 : заявл. 21.12.2022 : опубл. 11.01.2023 / Ф. М. Бельченко, И. Л. Ермолов, П. П. Остриков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского.
8. Дворкович В.П., Дворкович А.В., Цифровые информационные системы (теория и практика) Москва: Техносфера, 2012. – 1008с.

References

1. Rauschenbach B.V. Geometry of the picture and visual perception. St. Petersburg: ABC-classics, 2002. 320 p.
2. Shepelev, D. A. On the accuracy of color rendering in channel-by-channel modeling of underwater images [text] / D. A. Shepelev // Information processes. - 2020. - vol. 20, no. 3. - p. 254-268.2.
3. Garsia G., Suarez O., Aranda G., Tersero S., Graso O., Enano N. Learning Image Processing with OpenCV. USA, Publisher Packt, 2015. 232 p.
4. Belchenko F. M., Ermolov I. L., Ostrikov P. P. Development of a software module for converting perspective on a video image for selecting and analyzing image elements // News of the Volgograd State Technical University. – 2023. – No. 9(280). – pp. 11-15.
5. Belchenko, F. M. Development of a video surveillance system with the ability to introduce targeted distortions of the displayed space together with segmentation algorithms / F. M. Belchenko, I. L. Ermolov, P. P. Ostrikov // News of the Volgograd State Technical University. – 2023. – No. 4(275). – P. 18-22.
6. Belchenko, F. M., Ermolov I. L., Ostrikov P. P. Analysis of the effect of converting direct and reverse perspective on images received from UAVs, // XVI All-Russian Multi-Conference on Control Problems (MKPU-2023): Proceedings of the multi-conference. In 4 volumes, Volgograd, September 11–15, 2023 / Editorial Board: I.A. Kalyaev, V.G. Peshekhonov, S.Yu. Zheltov [and others]. Volume 1. – Volgograd: Volgograd State Technical University, 2023. – P. 119-121.
7. Certificate of state registration of a computer program No. 2023610449 Russian Federation. Program for introducing target distortions for the telemetry system: No. 2022686286: application. 12/21/2022: publ. 01/11/2023 / F. M. Belchenko, I. L. Ermolov, P. P. Ostrikov; applicant Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Problems of Mechanics named after. A.Yu. Ishlinsky.
8. Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V., Digital information systems (theory and practice). Moscow: Tekhnosphere, 2012. – 1008 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бельченко Филипп Михайлович, младший научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: philepp@mail.ru

Ермолов Иван Леонидович, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: ermolov@ipmnet.ru

Нагайцев Георгий Николаевич, программист, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: georgijnagajcev@gmail.com

Остриков Павел Павлович, ведущий программист, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: ostricov93@yandex.ru

Filipp M. Belchenko, Junior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: philepp@mail.ru

Ivan L. Ermolov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Deputy Director for Science, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: ermolov@ipmnet.ru

Georgij N. Nagajcev, Programmer, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: georgijnagajcev@gmail.com

Pavel P. Ostrikov, Lead Programmer, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: ostricov93@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 09.12.2023.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

Научная статья

УДК 531.8

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.067>

Моделирование перемещения мобильного робототехнического комплекса для проведения регламентных операций по диагностике внешних поверхностей объектов морского базирования.

Ермолов И.Л.¹ ermolov@ipmnet.ru, Князьков М.М.¹ ipm_labrobotics@mail.ru,
Семенов Е.А.^{1,2} sim1165@mail.ru, Суханов А.Н.¹ sukhanov-artyom@yandex.ru

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,

²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье исследуются модели перемещения мобильного робототехнического комплекса (МРК), предназначенного для проведения регламентных операций по диагностике внешних поверхностей объектов морского базирования. Для моделирования использовалась программная среда САПР «SolidWorks», где была создана модель МРК и поверхностей, по которым он будет перемещаться. Были промоделированы сложные поверхности произвольного наклона, по которым перемещается МРК, переходя с поверхности на поверхность. Конструкция МРК позволяет осуществлять перемещение по горизонтальным и наклонным поверхностям и преодолевать углы до $\pm 90^\circ$.

Также были промоделированы ситуации, когда МРК подвергается воздействию течения воды. Были построены модели, имитирующие погружение МРК до глубины в 10 метров, при этом задавались различные температурные режимы и скорости течения подводных потоков.

По результатам моделирования сделаны рекомендации для проектирования МРК, способных перемещаться по поверхностям произвольного наклона, переходя из воздушной среды в водную и проводить регламентные инспекционные работы на объектах морского базирования.

Ключевые слова: мобильный робот, корпуса объектов морского базирования, регламентные работы, вакуумные захваты, компьютерное моделирование, транспортная система, алгоритм перемещения, переход с поверхности на поверхность.

Для цитирования: Ермолов И.Л., Князьков М.М., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Моделирование перемещения мобильного робототехнического комплекса для проведения регламентных операций по диагностике внешних поверхностей объектов морского базирования, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 68—75. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.067

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.067>

Simulation of the movement of a mobile robotic complex for routine operations to diagnose the external surfaces of sea-based facilities

Ivan L. Ermolov¹ ermolov@ipmnet.ru, Maxim M. Knyazkov¹ ipm_labrobotics@mail.ru,
Evgeniy A. Semenov^{1,2} sim1165@mail.ru, Artem N. Sukhanov¹ sukhanov-artyom@yandex.ru

¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation,

²St.Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation

Annotation. The article examines the models of motion of a mobile robotic complex (MRC) designed for diagnostic operations of sea-based facilities external surfaces. The CAD software environment "SolidWorks" was used for simulation, where a model of the MRC and the surfaces on which it will move was created. Complex surfaces of arbitrary inclination were modeled, along which the MRC moves, moving from surface to surface. The design of the MRC allows you to move along horizontal and inclined surfaces and overcome angles up to $\pm 90^\circ$.

Also, situations were modeled when the MRC moves in the water environment. Models were built simulating the immersion of the MRC to a depth of 10 meters, while different temperature regimes and the flow rates of underwater streams were set.

Based on the results of the simulation, recommendations were made for the design of MRCS capable of moving along surfaces of arbitrary inclination, moving from an air environment to a water environment and carrying out routine inspection work at sea-based facilities.

Key words: mobile robot, hulls of sea-based facilities, routine maintenance, vacuum grippers, computer modeling, transport system, movement algorithm, transition from surface to surface.

For citation: Ivan L. Ermolov, Maxim M. Knyazkov, Evgeniy A. Semenov, Artem N. Sukhanov. Simulation of the movement of a mobile robotic complex for routine operations to diagnose the external surfaces of sea-based facilities, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 68—75. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.067

Введение

В настоящее время широко ведется освоение морских недр, в том числе в рамках добычи нефти и газа. Возможность использования стандартных средств диагностики внешней поверхности газо и нефтедобывающей инфраструктуры часто бывает ограничена из-за сложных климатических условий. Наиболее характерно это проявляется при добыче полезных ископаемых в арктических широтах, когда климатические условия сильно ограничивают использование ручного труда водолазов для проведения регламентных операций по диагностике внешних поверхностей. Одним из таких примеров может служить Морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная» (см. Рис. 1). Длина и ширина МЛСП составляет 126 метров, а вес без балласта - 117 тысяч тонн, специально разработанная нижняя часть платформы (кессон) способна успешно противостоять арктическому климату [1]. Кессон предназначен для обеспечения устойчивости платформы на грунте, хранения нефти, забортной морской воды, размещения верхнего строения. Данная платформа функционирует в условиях сурового климата, с большой скоростью морских течений и температурой воды, которая в летние месяцы редко превышает 10°C. В таких условиях необходимо по возможности максимально использовать робототехнические средства, чтобы не подвергать риску жизнь обслуживающего персонала.



Рис. 1 Буровая платформа МЛСП «Приразломная».

1. Разработка транспортной платформы для перспективной МРК

Для создания модели перспективной МРК был взят за основу ранее изготовленный робот вертикального перемещения. В Институте проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского (ИПМех РАН) был разработан многофункциональный инспекционный робот вертикального перемещения с измерительной технологической платформой, спроектированной по принципу модульной системы. На базе транспортного робота вертикального перемещения, использующего для закрепления на поверхности вакуумные захватные устройства эжекторного типа, устанавливаются модули технологической оснастки, в состав которых входят измерительное и инспекционное оборудование и подсистемы управления движением и измерениями

(см. Рис. 2). Данный МРК использует пневматические приводы для перемещения и подъема опускания захватных устройств, длина шага 0,4 м., а скорость перемещения робота 1,5 м/мин. Управление робота осуществляется в супервизорном режиме и позволяет роботу выполнять технические операции в полуавтоматическом режиме, пока не возникнет внештатная ситуация, или не потребуется вмешательство оператора.



Рис. 2 Внешний вид многофункционального инспекционного робота.

Однако данная конструкция [2-4] не способна на самостоятельный переход с поверхности на поверхность, что необходимо для обеспечения непрерывного процесса работы по диагностике поверхности. Поэтому было необходимо спроектировать новый транспортный модуль.

Транспортный модуль МРК предназначен для перемещения робота и объектов среды в пространстве, а также придания им требуемой ориентации [5]. С учётом того, что на пути движения роботов могут возникать препятствия, которые они должны преодолевать, целесообразно рассматривать роботы шагающего типа в виде двух взаимосвязанных мобильных платформ и оснащать их комбинированной системой удержания на поверхности в составе вакуумных присосок и магнитных колес.

Для осуществления устойчивого движения робота система управления должна быть адаптивной и автоматически компенсировать случайное изменение уровня разряжения в захватных устройствах в условиях, когда нет возможности использовать магнитные захватные устройства. При выполнении очередного шага движения одна из платформ надежно фиксируется на поверхности посредством захватных устройств, а другая платформа перемещается в заданном направлении на один шаг [6].

Разрабатываемый транспортный модуль МРК может состоять из рамной конструкции, изготовленной из алюминиевых сплавов с последующим анодированием элементов конструкции рамы. Элементы конструкции могут быть сварены между собой. На рамах будут расположены исполнительные механизмы и

технологическое оборудование, способные перемещать МРК в требуемую зону на корпусе кессона.

Приводная система разрабатываемой МРК (см. Рис. 3) содержит две подвижные платформы (1), соединенные между собой поворотным механизмом (2) ориентации к плоскости перемещения. Каждая платформа имеет свой поворотный механизм (3), который скреплен с транспортными двигателями (4) (пневмоприводами), штоки поршней, которые связаны с пневматическими цилиндрами приводных механизмов внешней группы захватов (присосок) (7) (см. Рис. 4).

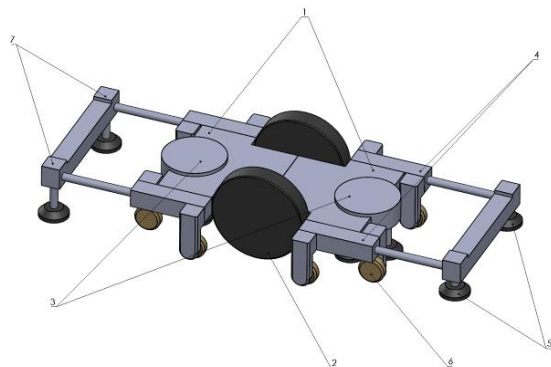


Рис. 3 Внешний облик транспортного модуля МРК вид сверху.

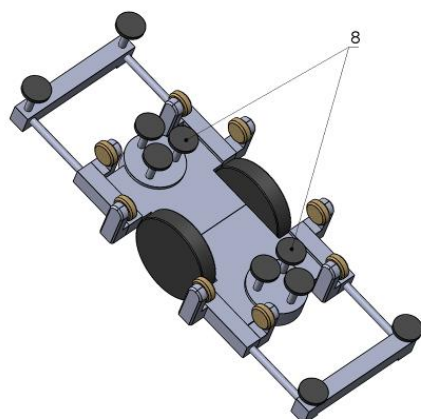


Рис. 4 Внешний облик транспортного модуля МРК вид снизу.

Во время движения по металлическим поверхностям для удержания на ней помимо вакуумных присосок (5) могут использоваться и постоянные магниты в виде колес (6). Использование магнитных колёс [7-11] обусловлено исключительно необходимостью дополнительного удержания при перемещении по отвесным поверхностям с отрицательным наклоном. При движении по немагнитным поверхностям могут использоваться только вакуумные захваты. Эти захваты крепятся на опорах, соединенных со штоками поршней пневмоцилиндров выдвижения захватных устройств платформы. К подвижной платформе крепятся пневматические цилиндры центральной группы захватов (8), также удерживающих платформу на вертикальной и горизонтальной поверхности. Эти захваты крепятся на опорах, соединенных со

штоками поршней пневмоцилиндров выдвижения захватных устройств центральной группы платформы. Перемещение транспортного модуля МРК осуществляется за счет последовательного сцепления с поверхностью центральной и внешней группы захватных устройств. Захваты обеспечивают сцепление с вертикальной и горизонтальной поверхностью, как в воздушной среде, так и в водной среде (см. Рис. 5).

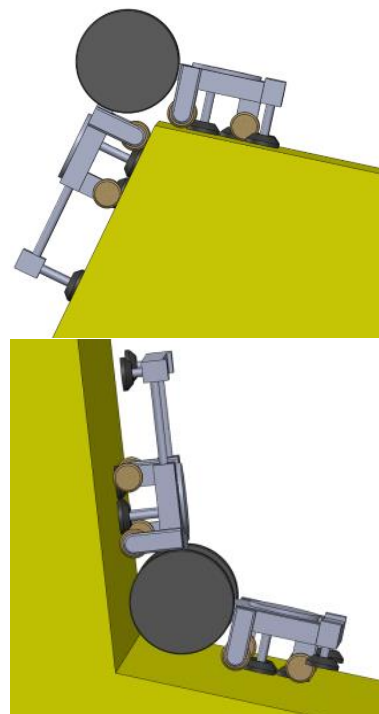


Рис. 5 Перемещение транспортного модуля МРК по поверхностям произвольного наклона.

Сцепление при движении по немагнитным поверхностям осуществляется за счет создания достаточного уровня разряжения в захвате (присоске). Поворот МРК может осуществляться на дискретную величину за счет пневмоцилиндров поворотного узла (вправо или влево), который входит в состав транспортного модуля МРК.

На Рисунке 6 изображен внешний облик МРК с диагностическим оборудованием.

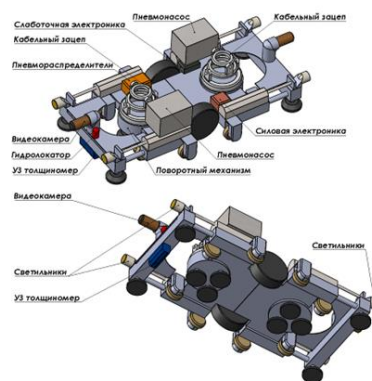


Рис. 6 МРК с диагностическим оборудованием.

2. Симуляция оценки влияния внешних силовых возмущений на МРК со стороны внешней среды

Для численного моделирования влияния волнения воды на элементы конструкции РА необходимо определить траектории движения частиц волн при параметрах, определённых задачей. Учтём, что моделируемая жидкость – вода – находится не в экстремальных условиях, поэтому она несжимаема. Для моделирования будем руководствоваться условием неразрывности и законом сохранения массы, а также моделью сплошной среды. Модель сплошной среды описывается несколькими непрерывными полевыми величинами: плотностью, скоростью (определяемой через суммарный импульс молекул в заданном элементе объёма) и давлением. Модель сплошной среды предполагает, что в любом бесконечно малом объёме содержится ещё достаточно много частиц. Таким образом, модель ограничена снизу дискретностью молекулярной структуры жидкости, что в задачах типичных пространственных масштабов совершенно несущественно.

Пусть существует какой-то совершенно произвольный, но макроскопический объём жидкости V , ограниченный поверхностью F (см. рис.1). Масса жидкости внутри него определяется интегралом плотности: $m = \int_V \rho dV$.

Примем в расчёт то, что в рассматриваемом объёме не происходит никаких экзотермических или эндотермических реакций. Таким образом, в данном объёме будет происходить исключительно Броуновское движение частиц с относительно малыми скоростями. Пусть сам объём и его границы неподвижны. Тогда единственное, что может изменить массу жидкости в данном объёме — это её перетекание через границу объёма:

$$-\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \oint_F \vec{w} \cdot d\vec{F} \quad (1)$$

Здесь \vec{w} – вектор, описывающий поток жидкости через границу (сток). Так как границы объёма неподвижны, то производную по времени можно внести под интеграл, а правую часть можно преобразовать к такому же, как слева, интегралу по объёму по теореме Гаусса-Остроградского. В итоге, в обеих частях равенства получается интеграл по одному и тому же совершенно произвольному объёму, что позволяет приравнять подинтегральные выражения и перейти к дифференциальной форме уравнения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{w} = 0 \quad (2)$$

где ∇ - векторный оператор Гамильтона (оператор набла), компоненты которого являются частными производными по координатам. Для трёхмерного евклидова пространства в прямоугольной декартовой системе координат оператор Гамильтона определяется следующим образом:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial t} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{k} \quad (3)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — единичные векторы по осям x, y, z , соответственно. Поток вещества равен массе, переносимой через единичную площадку за единицу времени:

$$\vec{w} = \rho \vec{V} \quad (4)$$

Таким образом, закон сохранения массы, называемый также уравнением неразрывности для сплошной среды, таков:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (5)$$

Это выражение наиболее общее, для среды, обладающей переменной плотностью. В реальности, эксперименты свидетельствуют о крайне слабой сжимаемости жидкости и практически постоянном значении плотности, что с высокой точностью позволяет применять закон сохранения массы в виде условия несжимаемости:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (6)$$

Точно такие же преобразования позволяют выразить законы сохранения импульса и энергии. Это позволяет получить уравнения для скорости жидкости и для переноса тепла в ней. Рассмотрим модель с полным отсутствием вязкости (для несжимаемой жидкости). Рассмотрим полный импульс жидкости в том же самом объёме V :

$$p = \int_V \rho \vec{V} dV \quad (7)$$

При тех же самых начальных условиях импульс в объёме может меняться только благодаря конвективному переносу, давлению окружающих элементов жидкости, а также благодаря внешним силам (силе тяжести, например).

$$-\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{V} dV = \oint_S \vec{V}(\rho \vec{V}) \cdot d\vec{S} + \oint_S P d\vec{S} - \int_V \rho \vec{g} dV \quad (8)$$

К первому и второму интегралам применяем теорему Гаусса-Остроградского в обобщённой форме и переходим к дифференциальной форме уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla P + \rho \vec{g} \quad (9)$$

где \otimes - знак тензорного произведения векторов. Данное выражение является уравнением Эйлера для закона сохранения импульса. Учитывая закон сохранения массы, можем раскрыть скобки и привести его к следующему виду:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\nabla \cdot \vec{V}) \vec{V} = -\nabla P + \rho \vec{g} \quad (10)$$

В данном уравнении отсутствует влияние вязкости жидкости на своё течение. Поэтому можно его дополнить. Обобщённое уравнение движения вязкой жидкости в векторном виде будет иметь вид:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} + \nu \Delta \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f} \quad (11)$$

Здесь Δ – векторный лапласиан, ν – коэффициент кинематической вязкости, p – давление, \vec{V} – векторное поле скорости, \vec{f} – векторное поле инерциальных сил. В сочетании с уравнением несжимаемости $\nabla \cdot \vec{V} = 0$ данное выражение называется уравнением Навье-Стокса – векторным уравнением движения. При его решении необходимо задаваться краевыми условиями $\vec{V}|_{\partial\Omega} = 0$ и начальными условиями $\vec{V}|_{t=0} = \vec{V}_0$.

Для численной оценки влияния внешних силовых возмущений на МРК со стороны внешней среды была проведена симуляция, в которой модель МРК подвержена воздействию движения потока частиц, моделирующего течение [12-17]. Для этого в программной среде САПР «SolidWorks» была создана модель МРК и поверхности (см. Рис. 7).

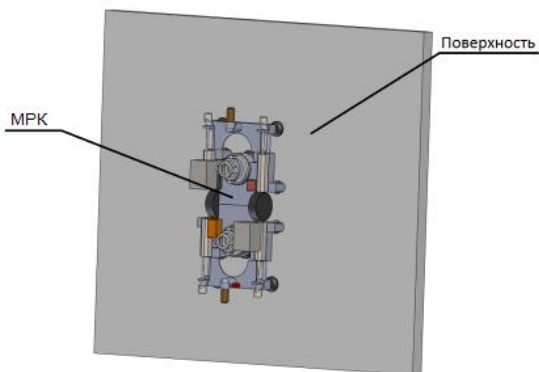


Рис. 7 Расчётная модель в САПР в натуральную величину.

Будем моделировать ситуацию бокового течения, чтобы определить парусность модели и найти силы и моменты, действующие на модель со стороны внешних факторов.

Моделирование проведено по типу внешней задачи. Настройка типа задачи представлена на Рисунке 8.

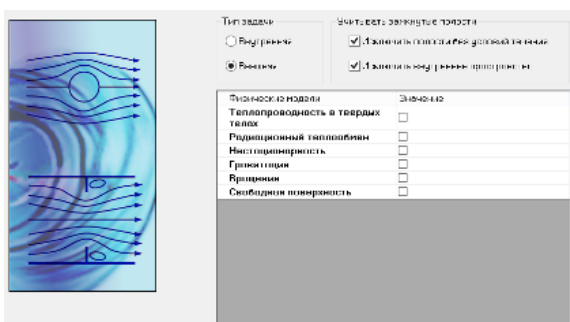


Рис. 8 Настройка типа задачи.

В данном случае граничными условиями будет определена заранее область, внутри которой будет размещена исследуемая модель. Для экономии ресурсов исключим из расчёта движение частиц внутри модели. Таким образом, расчёт будет вестись относительно внешних границ модели МРК.

Из базы данных среды выбираем модель частиц, имитирующих молекулы воды. Задание параметров среды представлено на Рисунке 9.

Расчёт будет использовать параметры, определённые для данного типа частиц – плотность, динамическую вязкость, удельную теплоёмкость, коэффициент теплопроводности и эффекты кавитации. Будем рассматривать комплексную задачу, которая учитывает как ламинарный поток, так и возможный турбулентный эффект. Для учёта

турбулентности необходимо внести значение параметра шероховатости поверхности.

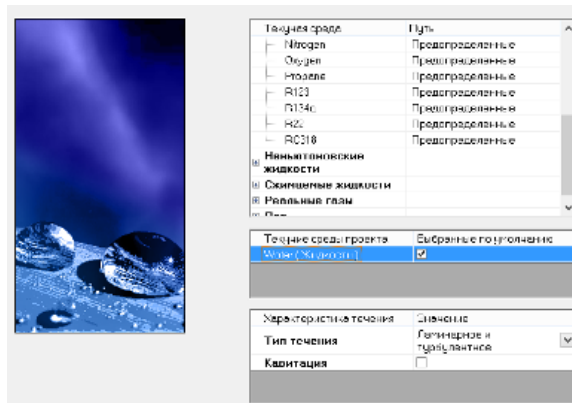


Рис. 9 Задание параметров среды.

Зададим параметры шероховатости по умолчанию для поверхностей в 20 микрон (см. Рис. 10).

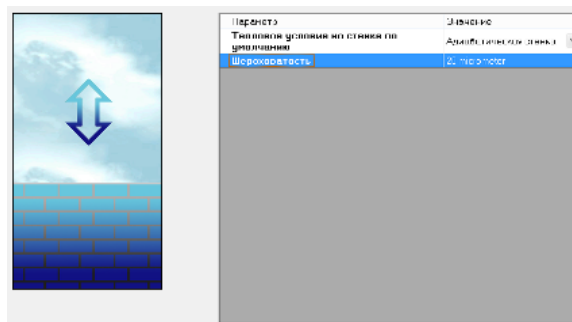


Рис. 10 Параметры поверхностей.

Будем считать, что МРК находится под водой на глубине 10 метров, где давление столба воды составляет 2 атмосферы. Зададимся окружающей температурой в диапазоне 10-50°C. Из Приложения с указанными гидрологическими условиями найдём максимальную скорость течения воды. Она составляет 116 см/с. Задание начальных условий представлено на Рисунке 11.

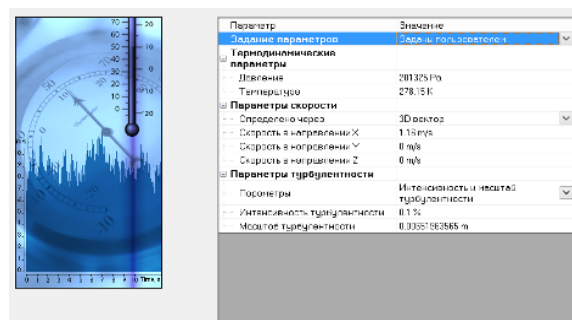


Рис. 11 Начальные условия для решения численной задачи.

Скорректируем расчётную зону, определив границы глобальной расчётной сетки (см. Рис. 12).

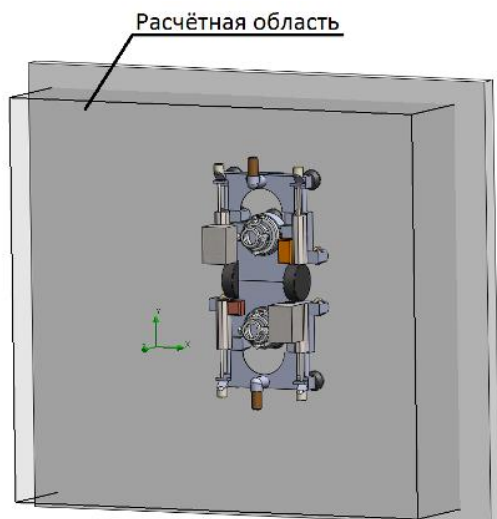


Рис. 12 Расчётная область

Зададим цель расчёта, сформировав задание на определение сил и моментов взаимодействия потока частиц воды при заданных параметрах с моделью МРК (см. Рис. 13).

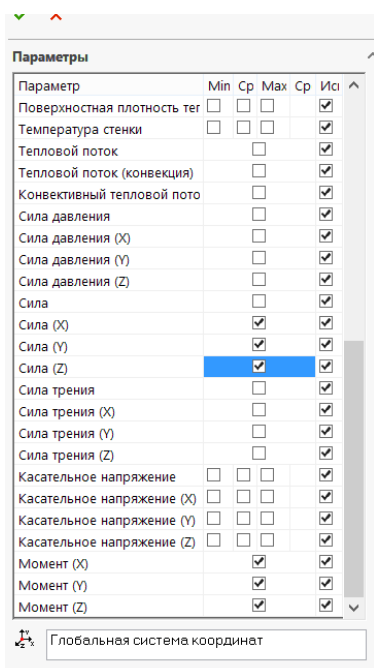


Рис. 13 Задание целевых параметров расчёта.

На Рисунке 14 изображены траектории движения частиц при взаимодействии с моделью ПА.

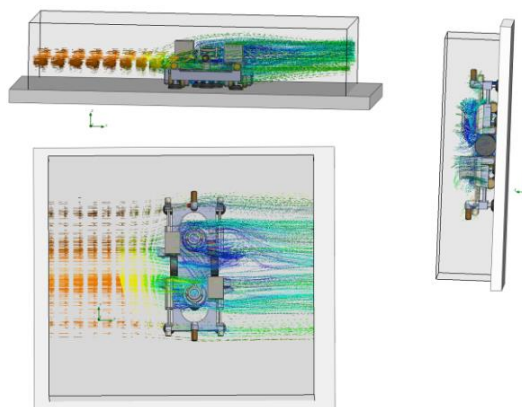


Рис. 14 Траектории частиц.

Видно, что создаётся несколько областей с завихрениями. Можно заметить существенное падение скорости частиц, что говорит о создании значительного усилия на элементы конструкции.

Заключение

По результатам моделирования может быть спроектирована транспортная платформа МРК, в состав которой входят, две несущие платформы, соединённые между собой узлом вращения одной платформы относительно другой. На каждой из платформ закреплены маршевые пневмоприводы, на штоках которых закреплены пневмоприводы подъёма-опускания вакуумных захватов. Также каждая из платформ содержит узел поворота, с помощью которого осуществляется вращение одной из платформ вокруг своей оси. На платформах закреплены пассивные вращающиеся магнитные колёса, создающие дополнительные удерживающие усилия на поверхности кессона.

В результате численного моделирования были рассчитаны максимальные силы и моменты приложенные к конструкции ПА в результате воздействия на неё факторов внешней среды (течение воды с заданными параметрами). Максимальная сила, действующая на сдвиг ПА по плоскости (по оси X), будет составлять 297 Н. Создаваемое турбулентное течение воды будет прижимать робот к поверхности кессона с дополнительным усилием в 20 Н.

Литература

1. <https://spec.tass.ru/first-in-the-arctic/mlsp-prirazlomnaya>
2. Ермолов И.Л., Князьков М.М., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Перспективный мобильный робототехнический комплекс для проведения регламентных операций по очистке корпусов судов от обрастаний // Морские интеллектуальные технологии, 2023 г., том 1, № 2, с. 53-59
3. Балашов В., Громов Б., Ермолов И., Роскилли А. Мобильный робот для очистки корпусов судов от обрастаний, "Морской флот", № 3, 2009 г.
4. Balashov V. S., Gromov B. A., I Ermolov. L., Roskilly A. P., Cleaning by means of the HISMAR autonomous robot, Journal Russian Engineering Research, June 2011, Volume 31, Issue 6, pp 589-592.
5. Hull Identification System for Marine Autonomous Robotics [Электронный ресурс]. – URL: https://cordis.europa.eu/docs/results/12/12585/121600841-6_en.pdf
6. Ермолов И.Л., Князьков М.М., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Адаптация технологического оборудования для использования на мобильном робототехническом комплексе вертикального перемещения (МРК),

- спроектированного для работы на вертикальных и горизонтальных поверхностях нефте- и газохранилищ/ Журнал Станкоинструмент, (3)028, стр. 58-64, 2022
7. Bykanova A. Yu., Kostenko V.V., Tolstonogov A. Yu. Development of the underwater robotics complex for laser cleaning of ship from biofouling: experimental results // Proceedings of the International science and technology conference "EarthScience", doi:10.1088/1755-1315/459/3/032061, 2020.
 8. Daniel Souto, Andreas Faina, Fernando Lopez-Pena et .all Morphologically intelligent underactuated robot for underwater hull cleaning // Proceedings of the The 8th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. 2015. P. 879-886, 2015.
 9. Houssam Albitar, Anani Ananiev and Ivan Kalaykov In-water surface cleaning robot: concept, locomotion and stability // International Journal of Mechatronics and Automation , Vol. 4, no. 2, p. 104-115, 2014.
 10. Tiwari, Avinash&Persson, Bo. (2019). Physics of suction cups.SoftMatter. 15. DOI: 10.1039/C9SM01679A.
 11. Jessica A Sandoval, Saurabh Jadhav, HaochengQuan, Dimitri D Deheyn and Michael T Tolley, Reversible adhesion to rough surfaces both in and out of water, inspired by the clingfish suction disc, Bioinspiration&Biomimetics, 2019, 14(6) 066016https://doi.org/10.1088/1748-3190/ab47d1.
 12. R. Chen, Q. Fu, Z. Liu, X. Hu, M. Liu and R. Song, "Design and experimental research of an underwater vibration suction module inspired by octopus suckers," 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Macau, 2017, pp. 1002-1007, doi: 10.1109/ROBIO.2017.8324548.
 13. Q. Hong, R. Liu and Y. Qu, "Principle and application of Underwater Vibration Suction Method," 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Guilin, 2009, pp. 1609-1614, doi: 10.1109/ROBIO.2009.5420389.
 14. X. Liu, R. Chen, Z. Xue, Y. Lei and J. Tian, "Design and Optimization of a Novel Swirling Sucker for Underwater Wall-Climbing Robots," 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Munich, 2018, pp. 1000-1005, doi: 10.1109/COASE.2018.8560524.
 15. Park Y.S., Park G.Y., Yoon J., Lee B.J., Oh W.Z. (1998) Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor. In: Zelinsky A. (eds) Field and Service Robotics. Springer, London.https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38
 16. F. Bach, H. Haferkamp, J. Lindemaier and M. Rachkov, "Underwater climbing robot for contact arc metal drilling and cutting," Proceedings of the 1996 IEEE IECON. 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Taipei, Taiwan, 1996, pp. 1560-1565 vol.3, doi: 10.1109/IECON.1996.570623.
 17. Yuan, F., Guo, L., Meng, Q. et al. The design of underwater hull-cleaning robot. J. Marine. Sci. Appl. 3, 41–45 (2004).https://doi.org/10.1007/BF02918646

References

1. https://spec.tass.ru/first-in-the-arctic/mlsp-prirazlomnaya
2. Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N. A promising mobile robotic complex for routine operations for cleaning ship hulls from fouling // Marine intelligent technologies, 2023, volume 1, No. 2, pp. 53-59
3. Balashov V., Gromov B., Ermolov I., Roskilde A., Mobile robot for cleaning ship hulls from fouling, "Marine Fleet", № 3, 2009 г.
4. Balashov V. S., Gromov B. A., I Ermolov. L., Roskilly A. P., Cleaning by means of the HISMAR autonomous robot, Journal Russian Engineering Research, June 2011, Volume 31, Issue 6, pp 589-592..
5. Hull Identification System for Marine Autonomous Robotics URL: https://cordis.europa.eu/docs/results/12/12585/121600841-6_en.pdf
6. Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N. Adaptation of technological equipment for use on a mobile robotic vertical displacement complex (MRC) designed to work on vertical and horizontal surfaces of oil and gas storage facilities/ Stankoinstrument Journal, (3)028, pp. 58-64, 2022
7. Bykanova A. Yu., Kostenko V.V., Tolstonogov A. Yu. Development of the underwater robotics complex for laser cleaning of ship from biofouling: experimental results // Proceedings of the International science and technology conference "EarthScience", doi:10.1088/1755-1315/459/3/032061, 2020.
8. Daniel Souto, Andreas Faina, Fernando Lopez-Pena et .all Morphologically intelligent underactuated robot for underwater hull cleaning // Proceedings of the The 8th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. 2015. P. 879-886, 2015.
9. Houssam Albitar, Anani Ananiev and Ivan Kalaykov In-water surface cleaning robot: concept, locomotion and stability // International Journal of Mechatronics and Automation , Vol. 4, no. 2, p. 104-115, 2014.
10. Tiwari, Avinash&Persson, Bo. (2019). Physics of suction cups.SoftMatter. 15. DOI: 10.1039/C9SM01679A.
11. Jessica A Sandoval, Saurabh Jadhav, HaochengQuan, Dimitri D Deheyn and Michael T Tolley, Reversible adhesion to rough surfaces both in and out of water, inspired by the clingfish suction disc, Bioinspiration&Biomimetics, 2019, 14(6) 066016https://doi.org/10.1088/1748-3190/ab47d1.
12. R. Chen, Q. Fu, Z. Liu, X. Hu, M. Liu and R. Song, "Design and experimental research of an underwater vibration suction module inspired by octopus suckers," 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Macau, 2017, pp. 1002-1007, doi: 10.1109/ROBIO.2017.8324548.
13. Q. Hong, R. Liu and Y. Qu, "Principle and application of Underwater Vibration Suction Method," 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Guilin, 2009, pp. 1609-1614, doi: 10.1109/ROBIO.2009.5420389.
14. X. Liu, R. Chen, Z. Xue, Y. Lei and J. Tian, "Design and Optimization of a Novel Swirling Sucker for Underwater Wall-Climbing Robots," 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Munich, 2018, pp. 1000-1005, doi: 10.1109/COASE.2018.8560524.

15. Park Y.S., Park G.Y., Yoon J., Lee B.J., Oh W.Z. (1998) Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor. In: Zelinsky A. (eds) Field and Service Robotics. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38
16. F. - Bach, H. Haferkamp, J. Lindemaier and M. Rachkov, "Underwater climbing robot for contact arc metal drilling and cutting," Proceedings of the 1996 IEEE IECON. 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Taipei, Taiwan, 1996, pp. 1560-1565 vol.3, doi: 10.1109/IECON.1996.570623.
17. Yuan, F., Guo, L., Meng, Q. et al. The design of underwater hull-cleaning robot. J. Marine. Sci. Appl. 3, 41–45 (2004). <https://doi.org/10.1007/BF02918646>

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ермолов Иван Леонидович, доктор технических наук, профессор РАН, заместитель директора по науке, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: ermolov@ipmnet.ru

Князьков Максим Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: ipm_labrobotics@mail.ru

Семенов Евгений Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: sim1165@mail.ru

Суханов Артем Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатории робототехники и мехатроники, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: sukhanov-artyom@yandex.ru

Ivan L. Ermolov, Dr. Sci. (Eng), Professor RAS, Deputy Director for Science, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: ermolov@ipmnet.ru

Maxim M. Knyazkov, Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: ipm_labrobotics@mail.ru

Evgeniy A. Semenov, Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: sim1165@mail.ru

Artem N. Sukhanov, Ph.D. (Eng), Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: sukhanov-artyom@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2023.

Научная статья

УДК 004.94:656.61.052

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.068>

Разработка алгоритма и программы для моделирования расхождения автономных судов

Артемьев А.В.¹ artemyev@msun.ru, Яковенко Е.А.¹ yakovenkoea@yandex.ru,

Оськин Д.А.¹ osykinda@msun.ru

¹Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Владивосток, Россия

Аннотация. Увеличение интенсивности судоходства приводит к трудностям у судоводителей при принятии оптимальных решений для предотвращения развития опасных ситуаций. Благодаря развитию средств связи и навигации возможно создание единого морского информационного пространства для всех судов, или групп судов, находящихся в ситуации неблагоприятного сближения. Разработка программного приложения для моделирования алгоритмов расхождения судов является важной задачей, связанной с тем, что, судовождение - это сложный процесс, требующий принятия быстрых и точных решений для предотвращения столкновений и обеспечения безопасности судоходства. В статье рассмотрен процесс проектирования приложения, реализующего процесс расхождения судов по трем основным ситуациям (обгон, ход встречными курсами, ход пересекающимися курсами). Также рассмотрены алгоритм расхождения, использованный в приложении и структуры данных и модель приложения. Рассмотрены перспективы развития приложения в области использования единого информационного пространства и применения методов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: судовождение, расхождение судов, разработка программного обеспечения.

Для цитирования: Артемьев А.В., Яковенко Е.А., Оськин Д.А. Разработка алгоритма и программы для моделирования расхождения автономных судов, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 76—85. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.068

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.068>

Development algorithm and program for modeling the divergence of autonomous ships

Andrei V. Artemiev¹ artemyev@msun.ru, Elena A. Yakovenko¹ yakovenkoea@yandex.ru,

Dmitry A. Oskin¹ osykinda@msun.ru

¹Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The increase in the intensity of shipping leads to difficulties for navigators in making optimal decisions to prevent the development of dangerous situations. Thanks to the development of communication and navigation means, it is possible to create a single maritime information space for all ships, or groups of ships, in a situation of unfavorable proximity. The development of a software application for modeling vessel divergence algorithms is an important task due to the fact that navigation is a complex process that requires making quick and accurate decisions to prevent collisions and ensure navigation safety. The article discusses the process of designing an application that implements the process of diverging ships in three main situations (overtaking, moving on opposite courses, moving on intersecting courses). The divergence algorithm used in the application and the data structures and model of the application are also discussed. The prospects for the development of the application in the field of using a single information space and the use of artificial intelligence methods are considered.

Key words: navigation, vessel divergence, software development.

For citation: Andrei V. Artemiev, Elena A. Yakovenko, Dmitry A. Oskin, Development algorithm and program for modeling the divergence of autonomous ships, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 76—85. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.068

Введение

Проблема расхождения судов в море является весьма актуальной. Анализ причин последних происшествий показывает, что в большинстве случаев человеческий фактор лежит в основе череды действий, ведущих к развитию неблагоприятной ситуации сближений судов. Для судоводителя становится все труднее принять оптимальное решение для предотвращения опасной ситуации в условиях интенсивного движения судов. Влияние человеческого фактора может быть уменьшено с помощью технических средств

судовождения, снабженных высокотехнологичными компьютерными системами.

Развитие морских автономных надводных судов (МАНС) в судовождении получили широкий интерес с ускорением развития технологий, появлением роботов и искусственного интеллекта.

Существует множество публикаций, связанных с разработкой алгоритмов расхождения судов, обзор существующих методов расхождения безэкипажных судов подробно рассмотрен в [1].

Разработке алгоритмов для реализации в программных решениях расхождения судов, в том числе МАНС посвящено множество работ. Среди них можно выделить работу, предлагающую

использовать компьютерные решения для предотвращения столкновений судов с использованием общего морского информационного пространства [2], разработку программного симулятора движения и расхождения безкипажного судна [3], имитационному моделированию безопасного расхождения групп морских судов [4], численному исследованию задачи безопасного расхождения групп морских автономных надводных судов [5].

Для имитации движения МАНС и их расхождения в соответствии с правилами, предусмотренными МППСС-72 существует немного патентов и программных решений, например, «Тренажерный комплекс для подготовки судоводителей» [9], «Программа для планирования маршрутов судов на морских акваториях» [10], «Программа для имитационного моделирования движения судов на морских акваториях» [11].

Целью статьи является развитие программных решений, предназначенных для моделирования расхождения судов, в том числе МАНС. Рассмотрена логическая структура программы, схема программы и алгоритм расхождения.

Логическая структура программы. Схема данных

Интерфейс программы с выделенными элементами приведен на рис.2. в структуре интерфейса выделено восемь областей. Их назначение приведено ниже:

1. Выбор судна. Представлен списком судов для выбора для его отображения в центре координат в относительной системе координат.
2. Расчет дистанций. Отображение рассчитанных CPA, ТСРА в табличном представлении.
3. Поле с координатной сеткой для отображения траекторий.
4. Входные данные. Отображение количества маневрирующих объектов, начального центрального или произвольного расположения первого судна, возможности ранжирования по скорости для разных типов судов, возможность включения режима диверсанта (судна, движущегося в нарушении правил МППСС).
5. Сценарий расхождения. Варианты выбора сценария движения судов: обгон, встречные курсы, пересечение, случайный.
6. Настройка временных интервалов. Задание общего времени моделирования, длительности такта перерасчета.
7. Задание системы координат. Отображение системы координат при истинном или относительном движении.
8. Расчет и прокрутка сценария.

Схема данных, отображающая путь данных и определяющая этапы обработки, представлена на рисунке 1.

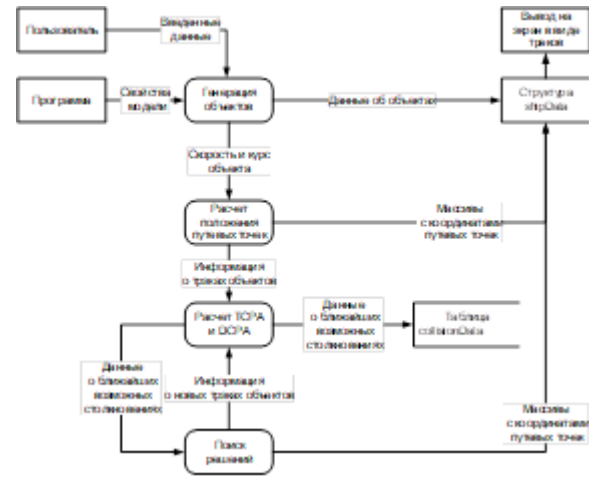


Рис. 1 – Схема данных

Основные потоки данных в программе:

- введенные данные;
- свойства модели;
- данные об объектах;
- данные о ближайших возможных столкновениях.

Введенные данные, то есть данные, получаемые от пользователя.

Свойства модели включены в текст программы и перечислены в таблице 1. Под объектами имеются в виду МАНС.

Данных об МАНС представляют собой массив, каждый столбец которого соответствует какому-либо параметру МАНС. Все параметры и их значения, хранящиеся в marinevessels, представлены в таблице 1.

Данные об объектах хранятся в виде массива структур shipData со следующими полями:

- поле «Type» – цифровое значение типа МАНС, см. табл. 2;
- поле «N» – длина МАНС;
- поле «W» – ширина МАНС;
- поле «V» – скорость МАНС в узлах;
- поле «K» – курс МАНС в градусах;
- поля «X» и «Y» – координаты начальных позиций МАНС;
- поле «Color» – цвет МАНС на схеме в формате RGB;
- поле «Name» – имя МАНС, текстовая строка;
- поле «isOwn» – признак того, что положение АС соответствует началу координат при выборе относительной системы координат;
- поля «TrackX» и «TrackY» – координаты путевых точек АС.

Данные о ближайших возможных столкновениях хранятся в виде таблицы collisionData со следующими полями:

- поле «Такт» – номер временного отсчета, который соответствует ТСРА;
- поля «Объект 1» и «Объект 2» – номера объектов столкновения;
- поле «CPA» – расстояние между объектами в момент времени, соответствующий номеру в поле «Такт»;

- поле «ТСРА» – время, соответствующее номеру в поле «Такт» в секундах;
 - поле «Угол м/у курсами» – угол между курсами в градусах;

- поле «Ситуация» – тип ситуации сближения, может принимать значения «Head-In», «Overtaking» или «Crossing», то есть встречное движение, обгон и пересечение курсов соответственно.

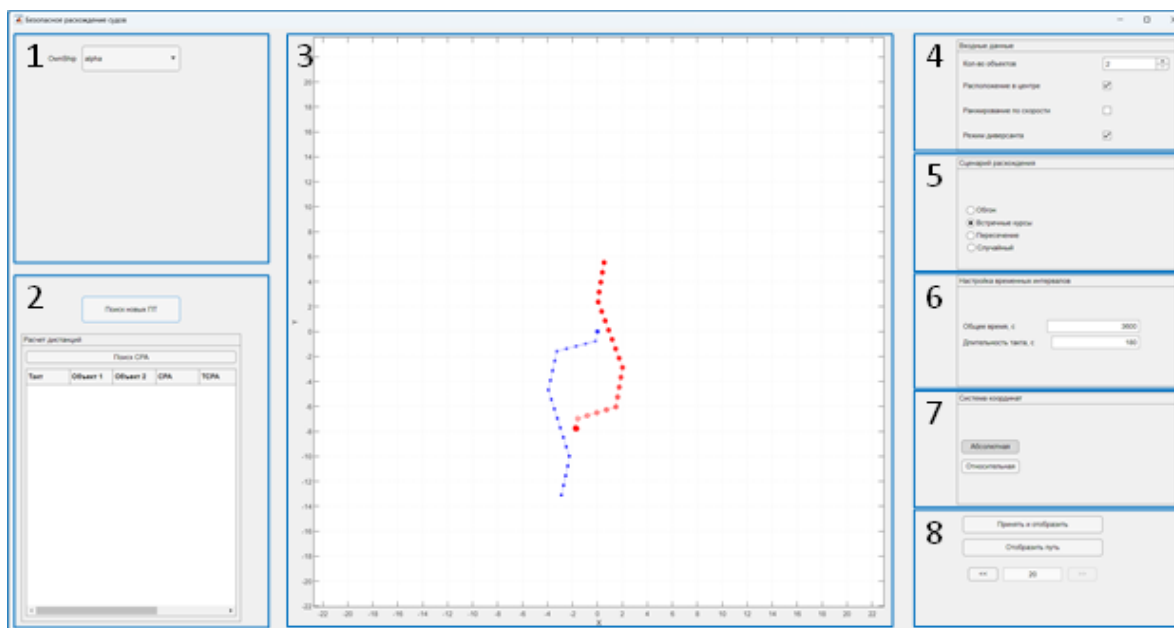


Рис. 2 – Интерфейс программы с выделенными элементами

Таблица 1.

Свойства модели

Наименование в тексте	Описание	Значение
Rmax	Радиус постановки объектов, соответствующий зоне захвата и оценке ситуации	12 миль
Rmin	Радиус зоны непосредственной близости	2 мили
marinevessels	Данные об АС	См. табл. 4
minAllowableDistance	Минимально допустимое расстояние между объектами	2 мили
zones	Массив значений радиусов зон для расхождения	[12 7 5 2 0], мили
sectorOvertake	Сектор сближения объектов, соответствующий ситуации «Обгон»	[247,5 112,5], град
sectorHeadIn	Сектор сближения объектов, соответствующий ситуации «Встречное движение»	[15 345], град
sectorCrossing	Сектор сближения объектов, соответствующий ситуации «Пересечение курсов»	[15 112,5] и [247,5 345], град
sourceChangingTime	Временная отметка, на которой начинает формироваться новый путь для объекта	180 с

Таблица 2.

Данные о МАНС

Тип судна	Длина (м)	Ширина (м)	Средняя скорость (уз)	Вероятность выбора
1 Супертанкер Эссо Осака	325,0	53,0	16	0,0
2 Танкер	179,9	31,0	15,9	0,2
3 Транспортный рефрижератор	107,8	18,2	20,0	0,4
4 Траулер	85,0	15,9	16	0,5
5 Пассажирское судно	185,0	25,0	26,2	0,6
6 Пассажирское судно прибрежного плавания	35,5	7,2	10	0,8

Схема программы

Схема программы, отображающая последовательность операций, представлена на рисунке 3.

Ввод данных пользователем заключается в заполнении полей и флажков в областях 4, 5 и 6 (рисунок 2).

После заполнения полей и указания опций моделирования пользователь должен подтвердить ввод, нажав кнопку «Принять и отобразить» из области 8 (рисунок 2). Программа очищает внутренние переменные и область отображения (если требуется) и запускает формирование объектов.

Формирование объектов включает в себя следующие пункты:

1. генерация начальных позиций объектов. Позиции формируются случайным образом в заданных пределах. Этап включает в себя проверку расстояний между объектами. Алгоритм формирования начальных позиций приведен на рисунке 4.
2. присвоение типа каждому объекту в зависимости от вероятности выбора (см. табл. 2) Выбор средней скорости и габаритов в зависимости от типа.
3. генерация курса случайным образом.
4. расчет координат путевых точек в соответствии с курсом, скоростью и начальным положением.
5. если флажок «Режим диверсанта» включен, то для второго объекта ищутся новые положение и курс, гарантирующие столкновение с первым объектом на 5-7 тактах.

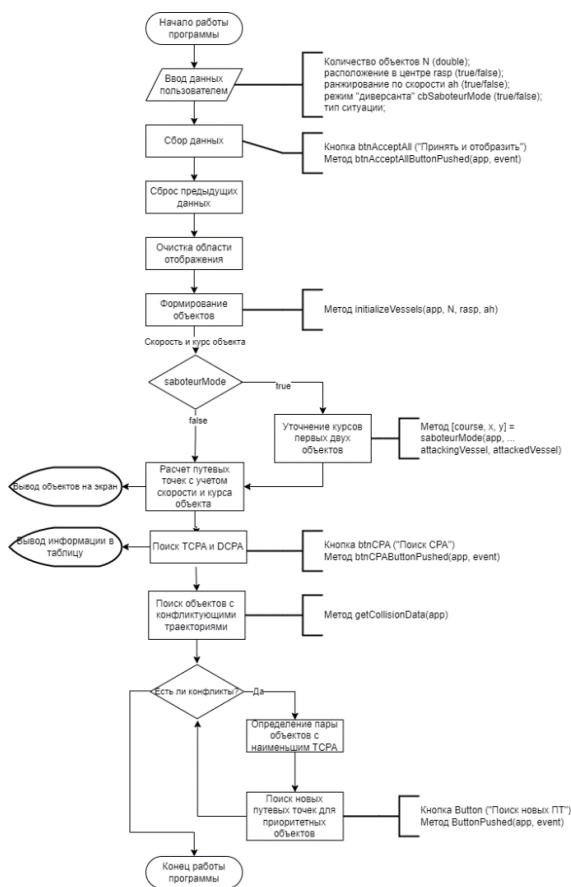


Рис. 3 – Схема программы

После формирования объектов и данных о них пользователю становится доступна кнопка «Отобразить путь», а также кнопки «<<» и «>>», позволяющие изменять количество отображаемых тактов на единицу.

По нажатию кнопки «Поиск CPA» (см. рис. 2 область 2) происходит расчет данных о ближайших возможных столкновениях.

Алгоритм расчета следующий:

1. Расчет дистанций D_i между всеми объектами в момент времени t_i :

$$t_i = i \cdot \Delta t, i = 0 \tag{1}$$

$$D_i = \text{dist}(X_i(\cdot), Y_i(\cdot))'$$

где $X_i(\cdot)$ и $Y_i(\cdot)$ - координаты объектов в момент времени t_i ,

$\text{dist}(X_i(\cdot), Y_i(\cdot))$ - функция расчета дистанций между каждой парой объектов.

D_i – матрица дистанций размеров RC, где каждые значения d_{rc} – дистанция между г-м и с-м объектами.

2. Поиск значений дистанции в D_i , соответствующих условию (2):

$$d_{rc} \leq \text{minAllowableDistance} \tag{2}$$

и определение пары объектов с номерами r и c , для которых удовлетворяется условие 2.

3. Поиск угла φ между курсами объектов с номерами r и c по формуле (3):

$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{a \times b}{a \cdot b}\right), \tag{3}$$

где a и b – векторы, соответствующие траекториям r -го и c -го объектов.

4. Определение ситуации сближения в зависимости от угла φ . Может принимать значения «Head-In», «Overtaking» или «Crossing».

5. Повторение пунктов 1-4 при $i = i + 1$ пока $i \cdot \Delta t$ не станет равным времени моделирования.

6. Заполнение и отображение таблицы collisionData.

После появления данных в таблице необходимо запустить поиск новых путевых точек, нажав кнопку «Поиск новых ПТ» в области 2. Для решения задачи поиска путевых точек используется алгоритм расхождения – главный объект исследования и основная цель для данного пакета моделирования.

Алгоритм расхождения

Разработанный алгоритм обеспечивает построение В-маневра вокруг минимально допустимой окружности опасной зоны для встречного движения автономных судов. Алгоритм основан на итерационном подходе (одно- или двухитерационное выполнение алгоритма приводит к решению задачи построения траекторий расхождения для двух объектов). К недостаткам алгоритма на данной стадии относятся:

1. Неспособность обрабатывать случаи, где точка начала маневра уже находится в пределах окружности опасной зоны. В этом случае выводится сообщение об ошибке.
2. Не предусмотрен выход из цикла поиска решений, который при неблагоприятном исходе может оказаться бесконечным.
3. Неспособность осуществлять поиск нового пути для случаев с пересечением курсов или обгона. Решением для этих сценариев расхождения является дальнейшее уточнение алгоритма или поиск другого подхода.

Общая схема алгоритма представлена на рисунке 5, а и б. Подпроцесс поиска приоритетной пары объектов (первой пары в очереди на обработку) основан на поиске в таблице строк, отвечающим заданным условиям и в общем виде приведен на рисунке 5, в.

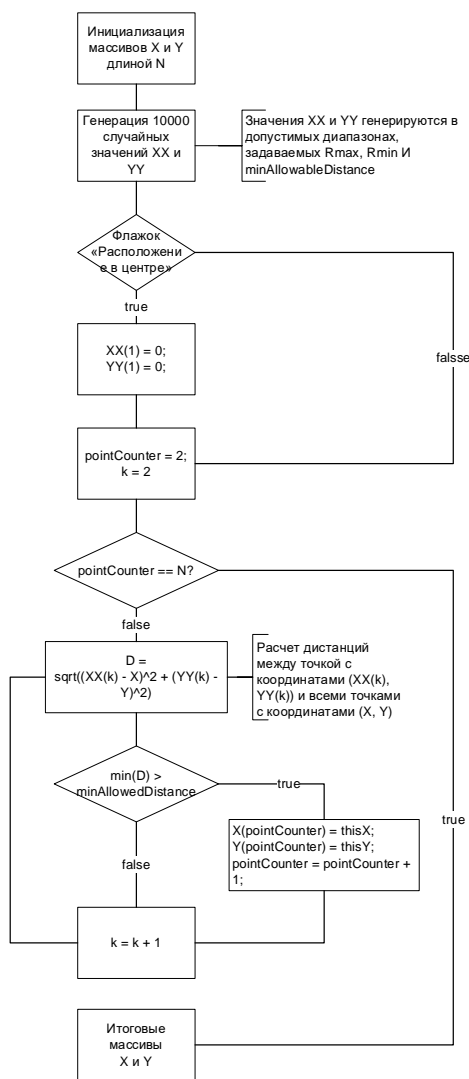


Рис. 4 – Схема алгоритма формирования начальных позиций

Возможны два подхода к формированию алгоритма расхождения.

Алгоритм 1 предполагает итерационный перебор строк таблицы с последующим удалением обработанной строки (рисунок 5, а):

1. поиск всех возможных столкновений (формирование таблицы collisionData);
2. поиск приоритетной пары объектов (строки с этой парой выделяются в подтаблицу);
3. обработка приоритетной пары объектов;
4. запись новых путевых точек в структуру хранения данных об объектах (поля trackX и trackY в shipData);
5. удаление из таблицы, хранящей данные о столкновениях, обработанной подтаблицы, полученной на этапе 2;
6. повторение пунктов 2-4 до полного очищения таблицы столкновений;
7. переход в пункт 1 уже с новыми данными о траекториях.

Алгоритм будет считаться успешно выполненным, если после пункта 6 не будет найдено столкновений.

Алгоритм 2 предполагает полный поиск столкновений и формирование новой таблицы collisionData после обработки каждой записи (рисунок 5, б).

1. поиск всех возможных столкновений (формирование таблицы collisionData);
2. поиск приоритетной пары объектов (строки с этой парой выделяются в подтаблицу);
3. обработка приоритетной пары объектов;
4. запись новых путевых точек в структуру хранения данных об объектах (поля trackX и trackY в shipData);
5. переход в пункт 1 уже с новыми данными о траекториях.

Алгоритм будет считаться успешно выполненным, если после нескольких итераций не будет найдено столкновений.

В разрабатываемом приложении реализован алгоритм 1.

Алгоритм поиска новых путевых точек для пары объектов со встречными курсами

При наличии определяющих точек маневра положение путевых точек определяется делением отрезков между определяющими точками на сегменты, длина которых определяется выражением 4:

$$s = V \cdot \Delta t, \quad (4)$$

где V – скорость объекта;

Δt – время пересчета (длительность такта).

Следовательно, задачу нахождения путевых точек можно свести к поиску определяющих точек маневра.

Рассмотрим задачу поиска определяющих точек маневра только для одного из объектов в паре. Далее объект, для которого ищутся точки, будет называться «судно оператора», а его пара, которую нужно обойти – «судно-цель». Для обработки пары объектов приведенный ниже алгоритм следует повторить, поменяв судно оператора и судно-цель местами.

Этапы алгоритма поиска определяющих точек приведены в блок-схеме на рисунке 6.

Геометрические построения и обозначения, используемые далее, приведены на рисунке 7.

Алгоритм начинается с поиска точки смены маневра (рисунок 6, блок 1). Принято считать, что планировать маневр следует на 180-й секунде, сразу после оценки обстановки и обнаружения столкновений. Следовательно, необходимо найти номер такта, соответствующего заданному времени. Найденная точка – положение судна оператора на 180-й секунде и далее обозначается как P .

Затем для объекта необходимо определить направление смены курса (рисунок 6, блок 2). Согласно МППСС-72, для избегания столкновений необходимо маневрировать вправо, что не всегда является оптимальным путем. Направление смены курса в программе определяется подсчетом путевых точек судна-цели, расположенных справа и слева от траектории судна оператора: маневр будет совершаться по стороне, где меньше путевых точек судна-цели.

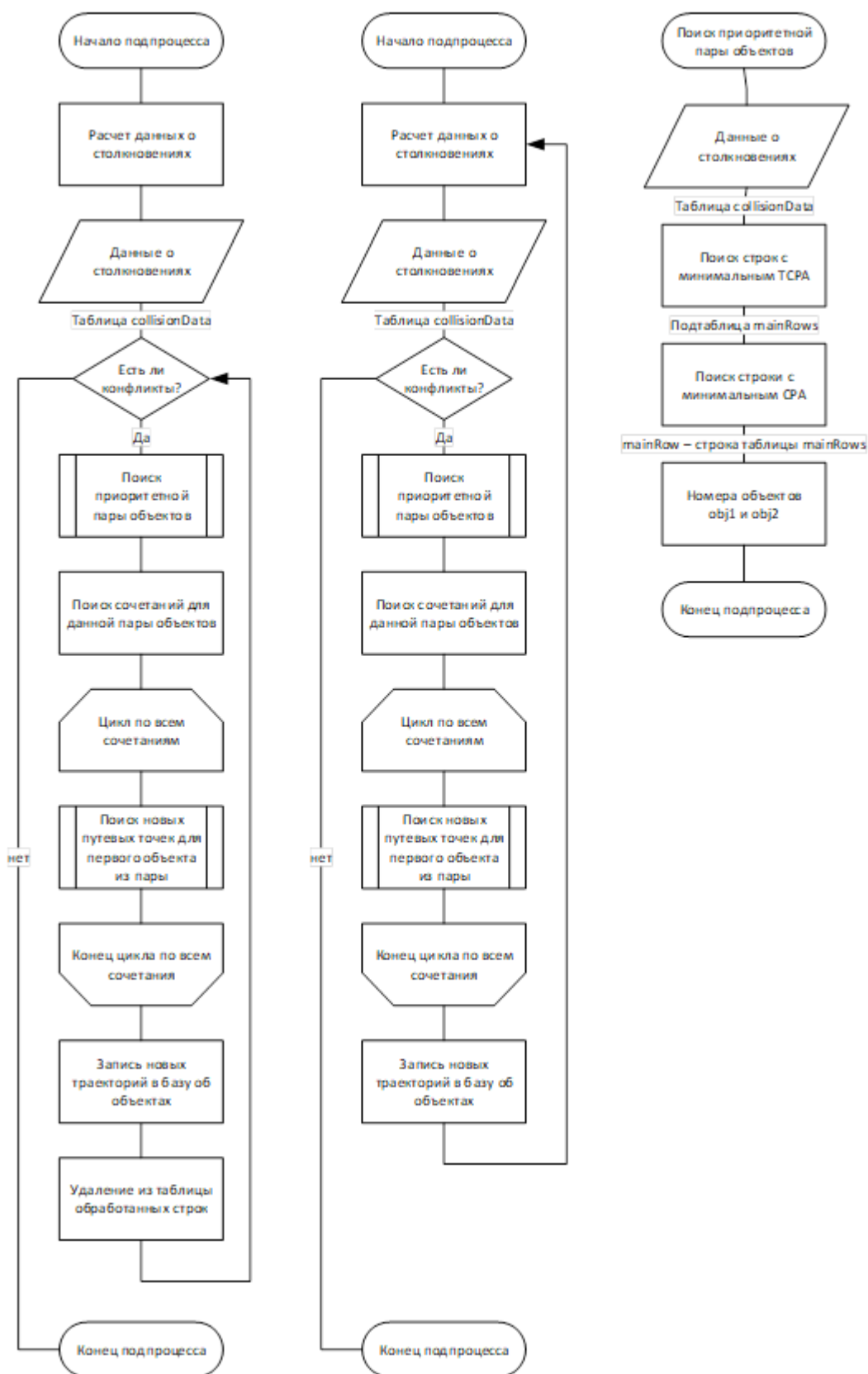


Рис. 5 – Схема алгоритма расхождения

Следующий этап – определение параметров окружности опасной зоны, вокруг которой строится маневр (рисунок 6, блок 3). За её центр S принимается путевая точка судна-цели,

соответствующая максимальному сближению. Её радиус R равен $\text{minAllowableDistance}$.

Для нахождения углового отклонения от текущего курса необходимо найти точки касания прямых,

выпущенных из P к окружности с центром C и радиусом R (рисунок 6, блок 4). Точки обозначаются как Q_1 и Q_2 .

В блоке 5 из Q_1 и Q_2 выбирается только одна точка касания Q в соответствии с направлением, полученным в блоке 2 (см. рис. 6).

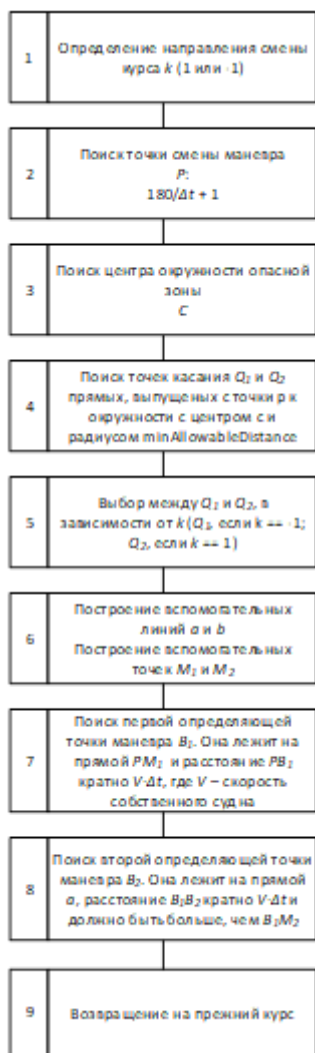


Рис. 6 – Этапы построения определяющих точек В-маневра

В блоке 6 строятся вспомогательные прямые a и b , а также точки M_1 и M_2 . Прямая a удовлетворяет условиям:

- она параллельна начальной траектории судна оператора;
- она касается окружности опасной зоны со стороны Q .

Прямая b удовлетворяет условиям:

- она перпендикулярна начальной траектории судна оператора;
- она касается окружности опасной зоны в самой дальней от P точке.

Опорная точка M_1 представляет собой пересечение прямых PQ и a .

Опорная точка M_2 представляет собой пересечение прямых a и b .

В блоке 7 осуществляется поиск первой определяющей точки В-маневра B_1 , удовлетворяющей условиям:

- она лежит на прямой PM_1 ;
- длина PB_1 должна быть кратна $V \cdot \Delta t$;
- длина PB_1 должна быть больше PM_1 .

В блоке 8 осуществляется поиск второй определяющей точки В-маневра B_2 , удовлетворяющей условиям:

- она лежит на прямой a ;
- длина B_1B_2 должна быть кратна $V \cdot \Delta t$;
- длина B_1B_2 должна быть больше B_1M_2 .

В блоке 9 осуществляется возвращение на прежнюю траекторию отклонением от текущего курса на 30° .

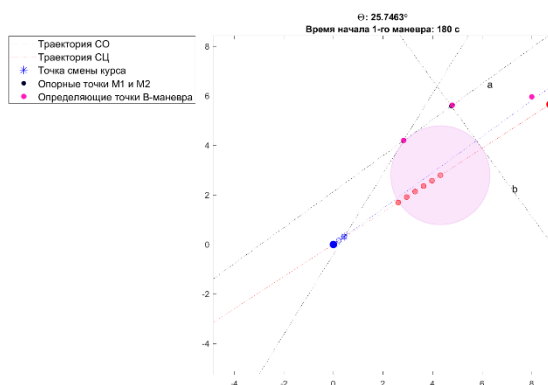


Рис. 7 – Геометрические построения для поиска определяющих точек В-маневра

Следующим шагом развитием приложения должен стать автоматический обмен данными между всеми участниками информационного обмена, так, чтобы информация была общедоступной и одинаковой [6]. В этих условиях одинаковое судовое программное обеспечение, установленное на всех судах, выдаст одно и то же оптимальное решение по маневрированию.

Также дальнейшее развитие программы связано с использованием уточненных моделей с набором параметров, получаемых при идентификации по маневренным характеристикам [12] или параметрической идентификации в процессе эксплуатации.

Использование искусственного интеллекта может значительно улучшить прогнозирование поведения судов и предупреждение возможных конфликтных ситуаций.

Заключение

В данной работе была выполнена задача разработки приложения, имитирующего расхождение судов, в том числе МАНС, согласно МППСС-72 для трех возможных ситуаций взаимодействия судов.

Литература

1. Триполец О.Ю. Обзор существующих методов расхождения безэкипажных судов. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2021;13(4):480-495. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495>Петров, В. А. Оценка времени упреждения начала маневра для расхождения при опасном сближении судов / В. А. Петров // Транспортное дело России. – 2006. – № 11-1. – С. 9-12. – EDN KVTNYH.
2. Петров В.А. Компьютерные решения для предотвращения столкновений судов с использованием общего морского информационного пространства/ Петров В.А. // Мореходство и морские науки – 2012: избранные доклады Четвертой Сахалинской региональной морской научно-технической конференции (5-7 сентября 2012 г. и 12 февраля 2013 г.) / Под ред. В. Н. Храмушина. – Южно-Сахалинск: Сахалинская областная типография, 2013. – 300 с.
3. Дыда, А. А. Разработка программного симулятора движения и расхождения безэкипажного судна / А. А. Дыда, И. И. Пушкарев, А. Ф. Красавина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2023. – Т. 31, № 2(78). – С. 43-55. – DOI 10.14498/tech.2023.2.4. – EDN PUOQOM.
4. Имитационное моделирование безопасного расхождения групп морских судов / А. В. Артемьев, В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, В. А. Петров // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, № 3(42). – С. 25-26. – DOI 10.26102/2310-6018/2023.42.3.011. – EDN NNTJWE.
5. Артемьев, А. В. Численное исследование задачи безопасного расхождения групп морских автономных надводных судов / А. В. Артемьев, В. А. Петров, В. М. Гриняк // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета. – 2023. – Т. 15, № 3(67). – С. 104-119. – DOI 10.24866/VVSU/2949-1258/2023-3/104-119. – EDN RMMZNL.
6. Автоматическая система сбора и подготовки данных для предотвращения опасного сближения судов, использующая локальное морское информационное пространство / Е. М. Пшенников, А. В. Сушинская, Д. А. Оськин, А. В. Артемьев // Молодежь. Наука. Инновации. – 2022. – Т. 1. – С. 47-53. – EDN VIMQHP.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661077 Российская Федерация. Тренажерный комплекс в локальной компьютерной сети для предтренажерной подготовки судоводителей в соответствии с модельным курсом IMO 1.07 (RADAR Navigation, Radar Plotting and use of ARPA Model Course): № 2016618387: заявл.. 01.08.2016: опубл.. 28.09.2016 / В. А. Петров, Г. Н. Шарлай; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского». – EDN WSZVQC.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617678 Российская Федерация. Контрольно-обучающая программа визуального моделирования перемещения и маневрирования судов при различной освещенности в соответствии с выбранным временем суток. № 2018614739: заявл.. 14.05.2018: опубл.. 28.06.2018 / В. А. Петров; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского». – EDN GRBGTD.
9. Патент № 2657708 С1 Российская Федерация, МПК G09B 9/00. Тренажерный комплекс для подготовки судоводителей: № 2017113181: заявл.. 17.04.2017: опубл. 14.06.2018 / В. А. Петров, Г. Н. Шарлай, А. Н. Пузачев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского". – EDN ZENEYN.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023667782 Российская Федерация. Программа для планирования маршрутов судов на морских акваториях: № 2023666856: заявл. 10.08.2023: опубл. 18.08.2023 / В. М. Гриняк, Д. О. Дудко, М. Д. Сазонтова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владивостокский государственный университет». – EDN YCPBQN.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680994 Российская Федерация. Программа для имитационного моделирования движения судов на морских акваториях: № 2022680102: заявл. 26.10.2022: опубл. 09.11.2022 / В. М. Гриняк, А. В. Шуленина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владивостокский государственный университет». – EDN QWGTWZ.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666796 Российская Федерация. Программа для идентификации параметров модели судна по маневренным характеристикам: № 2022665815: заявл. 29.08.2022: опубл. 06.09.2022 / Д. А. Оськин, Е. Б. Осокина, В. В. Бочарова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского". – EDN SFJUPT.

References

1. Tripolets O.Y. Overview of existing methods of autonomous vessels collision avoidance. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2021;13(4):480-495. (In Russ.) <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495>Petrov, V. A. Otsenka vremeni uprezhdeniya nachala manevra dlya raskhozhdeniya pri opasnom sblizhenii sudov / V. A. Petrov // Transportnoe delo Rossii. – 2006. – № 11-1. – S. 9-12. – EDN KVTNYH.
2. Petrov V.A. Komp'yuternye resheniya dlya predotvrashcheniya stolknoveniy sudov s ispol'zovaniem obshchego morskogo informatsionnogo prostranstva/ Petrov V.A. // Morekhodstvo i morskije nauki – 2012: izbrannye doklady Chetvertoy(2) Sakhalskoy regional'noy morskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (5-7 sentyabrya 2012 g. i 12

- fevralya 2013 g.) / Pod red. V. N. Khramushina. – Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalinskaya oblastnaya tipografiya, 2013. – 300 s.
3. Dyda, A. A. Razrabotka programmnoy simulyatora dvizheniya i raskhozhdeniya bezekipazhnogo sudna / A. A. Dyda, I. I. Pushkarev, A. F. Krasavina // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. – 2023. – T. 31, № 2(78). – S. 43-55. – DOI 10.14498/tech.2023.2.4. – EDN PUOQOM.
 4. Imitatsionnoe modelirovanie bezopasnogo raskhozhdeniya grupp morskikh sudov / A. V. Artem'ev, V. M. Grinyak, A. S. Devyatisil'nyy, V. A. Petrov // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. – 2023. – T. 11, № 3(42). – S. 25-26. – DOI 10.26102/2310-6018/2023.42.3.011. – EDN NNTJWE.
 5. Artem'ev, A. V. Chislennoe issledovanie zadachi bezopasnogo raskhozhdeniya grupp morskikh avtonomnykh nadvodnykh sudov / A. V. Artem'ev, V. A. Petrov, V. M. Grinyak // Territoriya novykh vozmozhnostey. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2023. – T. 15, № 3(67). – S. 104-119. – DOI 10.24866/VVSU/2949-1258/2023-3/104-119. – EDN RMMZNL.
 6. Avtomaticheskaya sistema sbora i podgotovki dannykh dlya predotvrashcheniya opasnogo sblizheniya sudov, ispol'zuyushchaya lokal'noe morskoe informatsionnoe prostranstvo / E. M. Pshennikov, A. V. Sushinskaya, D. A. Os'kin, A. V. Artem'ev // Molodezh'. Nauka. Innovatsii. – 2022. – T. 1. – S. 47-53. – EDN VIMQHP.
 7. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2016661077 Rossiyskaya Federatsiya. Trenazhernyy kompleks v lokal'noy komp'yuternoy seti dlya predtrenazhernoy podgotovki sudovoditeley v sootvetstviy s model'nym kursom IMO 1.07 (RADAR Navigation, Radar Plotting and use of ARPA Model Course): № 2016618387: zayavl. 01.08.2016: opubl. 28.09.2016 / V. A. Petrov, G. N. Sharlay ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Morskoy gosudarstvennyy universitet imeni admirala G.I. Nevel'skogo». – EDN WSZVQC.
 8. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018617678 Rossiyskaya Federatsiya. Kontrol'no-obuchayushchaya programma vizual'nogo modelirovaniya peremeshcheniya i manevrirovaniya sudov pri razlichnoy osveshchennosti v sootvetstviy s vybrannym vremenem sutok : № 2018614739 : zayavl. 14.05.2018: opubl. 28.06.2018 / V. A. Petrov ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Morskoy gosudarstvennyy universitet imeni admirala G.I. Nevel'skogo». – EDN GRBGTO.
 9. Patent № 2657708 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G09B 9/00. Trenazhernyy kompleks dlya podgotovki sudovoditeley : № 2017113181 : zayavl. 17.04.2017: opubl. 14.06.2018 / V. A. Petrov, G. N. Sharlay, A. N. Puzachev ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Morskoy gosudarstvennyy universitet imeni admirala G.I. Nevel'skogo". – EDN ZEHEYH.
 10. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2023667782 Rossiyskaya Federatsiya. Programma dlya planirovaniya marshrutov sudov na morskikh akvatoriyakh : № 2023666856 : zayavl. 10.08.2023: opubl. 18.08.2023 / V. M. Grinyak, D. O. Dudko, M. D. Sazontova ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Vladivostokskiy gosudarstvennyy universitet». – EDN YCPBQN.
 11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022680994 Rossiyskaya Federatsiya. Programma dlya imitatsionnogo modelirovaniya dvizheniya sudov na morskikh akvatoriyakh : № 2022680102 : zayavl. 26.10.2022: opubl. 09.11.2022 / V. M. Grinyak, A. V. Shulenina ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Vladivostokskiy gosudarstvennyy universitet». – EDN QWGTWZ.
 12. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022666796 Rossiyskaya Federatsiya. Programma dlya identifikatsii parametrov modeli sudna po manevrennym kharakteristikam : № 2022665815 : zayavl. 29.08.2022: opubl. 06.09.2022 / D. A. Os'kin, E. B. Osokina, V. V. Bocharova ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Morskoy gosudarstvennyy universitet imeni admirala G.I. Nevel'skogo". – EDN SFJUPT..

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Артемьев Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий научной лабораторией автономного судовождения, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: artemyev@msun.ru

Яковенко Елена Анатольевна, инженер научной лаборатории автономного судовождения, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: yackovenkoea@yandex.ru

Оськин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электронной и микропроцессорной техники, старший научный сотрудник научной лаборатории автономного судовождения, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: osykinda@msun.ru

Andrei V. Artemiev, Ph.D. (Eng), assistant professor, head of scientific laboratory of autonomous navigation, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 690003, Vladivostok, Verkhneportovaya str., 50a, Russia, e-mail: artemyev@msun.ru

Elena A. Yakovenko, engineer of scientific laboratory of autonomous navigation, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 690003, Vladivostok, Verkhneportovaya str., 50a, Russia, e-mail: yackovenkoea@yandex.ru

Dmitry A. Oskin, Ph.D. (Eng), assistant professor, head of department of electronic and microprocessor engineering, senior researcher of scientific laboratory of autonomous navigation, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 690003, Vladivostok, Verkhneportovaya str., 50a, Russia, e-mail: osykinda@msun.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 03.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2023.

Научная статья

УДК 531.8

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.069>

Моделирование воздействия морского течения на мобильный робототехнический комплекс вблизи опорной поверхности

Сиваков Н.С.¹ sivakov@ipmnet.ru, Усанов В.А.¹ usanov@ipmnet.ru¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Аннотация. В статье путем трехмерного численного моделирования рассматривается воздействие морского течения на мобильный робототехнический комплекс (МРК), предназначенный для проведения регламентных операций по диагностике внешних поверхностей объектов морского базирования. Моделирование проводилось в программном пакете *OpenFOAM*, построены упрощенные модели МРК, на основе которых создавались сеточные модели расчетной области. Рассматривалось воздействие течений со скоростями от 0.5 до 2 м/с на 3 геометрические конфигурации, соответствующие различным положениям МРК в пространстве. Воздействие определялось действующими на поверхность МРК силами и моментами. Для скорости течения 1.5 м/с при помощи расширенных расчетных моделей были уточнены значения действующих сил и моментов на МРК, полностью погруженный в воду, и получены значения нагрузок, действующих при частичном погружении МРК в воду. Отдельно рассмотрена нагрузка на кабель управления МРК. По полученным величинам нагрузок сделаны выводы о возможности эксплуатации МРК при определенных скоростях течения, на основе которых выдвинуты предложения по модернизации конструкции МРК.

Ключевые слова: мобильный робот, корпуса объектов морского базирования, вакуумные захваты, компьютерное моделирование, *OpenFOAM*.

Для цитирования: Сиваков Н.С., Усанов В.А. Моделирование воздействия морского течения на мобильный робототехнический комплекс вблизи опорной поверхности., Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 86—92. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.069

Original articleDOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.069>

Modeling the effect of sea currents on a mobile robotic complex near a bearing surface

Nikita S. Sivakov¹ sivakov@ipmnet.ru, Vladislav A. Usanov¹ usanov@ipmnet.ru¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Annotation. Using three-dimensional numerical modeling, the article examines the effect of sea currents on a mobile robotic complex (MRC) designed to carry out routine operations to diagnose the external surfaces of sea-based objects. The simulation was carried out in the *OpenFOAM* software package, simplified models of the MRC were built, on the basis of which grid models of the computational domain were created. The effect of currents with velocities from 0.5 to 2 m/s on 3 geometric configurations corresponding to different positions of the MRC in space was considered. The effect was determined by the forces and moments acting on the surface of the MRC. For a flow velocity of 1.5 m/s, using advanced calculation models, the values of the acting forces and moments on the MRC, completely immersed in water, were clarified, and the values of the loads acting when the MRC was partially immersed in water were obtained. The load on the MRC control cable is considered separately. Based on the obtained load values, conclusions were drawn about the possibility of operating MRC at certain flow velocities, on the basis of which proposals were put forward for modernizing the design of MRC.

Key words: mobile robot, hulls of sea-based facilities, vacuum grippers, computer modeling, *OpenFOAM*.

For citation: Nikita S. Sivakov, Vladislav A. Usanov. Modeling the influence of sea currents on a mobile robotic complex near a bearing surface, *Marine intellectual technologies*. 2023. № 4 part 3, P. 86—92. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.069

Введение

Область использования робототехнических комплексов (РК) расширяется из года в год. Часто выбор в пользу РК возникает по причине агрессивной внешней среды, в которой человеческий труд ограничен или невозможен. Добыча полезных ископаемых в арктических широтах является одной из тех областей деятельности человека, которая сопряжена с большим риском для человека. Так, работающая в таких жестких условиях, МЛСП «Приразломная» (см. Рис. 1) сталкивается с необходимостью обследования наружной

поверхности кессона, который предназначен для обеспечения устойчивости платформы на грунте, хранения нефти, забортной морской воды, размещения верхнего строения. Так как скорости морского течения в Печорском море составляют до 1.2 м/с [1], а температура воды даже в летние месяцы редко достигает 10°C, использование РК позволит минимизировать риск жизни и здоровью обслуживающего персонала, а также сократит время обследования кессона.



Рис. 1 Буровая платформа МЛСП «Приразломная».

1. Подготовка к проведению моделирования РК вблизи опорной поверхности

Проектирование РК трудоемкий процесс, включающий в себя множество стадий. При разработке конструкции робота необходимо учитывать множество факторов, влияющих на работу РК. Одним из таких факторов является течение воды, и чтобы оценить с какой силой оно влияет на РК, проводится моделирование воздействия течения на РК вблизи опорной поверхности (наружной поверхности стены кессона). В качестве объекта исследования был выбран, разработанный на основе робота для очистки корпусов кораблей [2-4] лабораторией робототехники и мехатроники Института проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского (ИПМех РАН), шагающий инспекционный РК (см. Рис. 2). Данный мобильный роботизированный комплекс – МРК, разработан для вертикального перемещения с целью обследования наружной поверхности стенки кессона МЛСП «Приразломная». МРК состоит из двух платформ, соединённых поворотным механизмом, для обеспечения маневренности. На каждой из платформ находятся пневматические приводы, которые обеспечивают передвижение МРК. Фиксация МРК на поверхности осуществляется за счет вакуумных присосок, работающих от насоса, находящегося на борту МРК, а также магнитных колес. Так как основное предназначение данного МРК – осуществление диагностики состояния стенок кессона, то на платформах установлено измерительное и инспекционное оборудование, а также подсистемы управления движением и измерениями.

Моделирование воздействия течения на МРК позволяет определить силы и моменты, действующие на робота, для того чтобы выбрать окончательную компоновку робота, а также вакуумных присосок. Компоновка оборудования на платформах МРК (см. Рис. 2) является предварительной, чтобы оценить нагрузки. Трёхмерная модель МРК, подготовленная для численных расчетов, (см. Рис. 3) является упрощенной моделью с присоединенным кабелем управления. Это было сделано, чтобы уменьшить размерность сеточной модели и обеспечить приемлемое время проведения численных расчетов. Такое упрощение модели приводит к тому, что увеличивается площадь боковой проекции, поэтому полученные результаты являются завышенными. Таким образом, в сравнение с не упрощенной моделью, расчеты будут взяты с запасом.

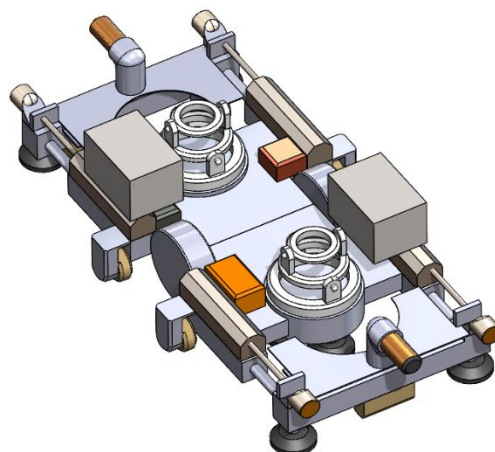


Рис. 2 3D модель МРК с диагностическим оборудованием.

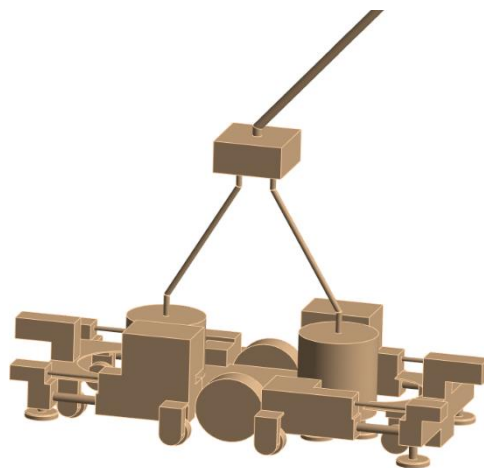


Рис. 3 3D модель МРК с диагностическая оборудованием.

После подготовки геометрии была построена расчетная область (РО), на которой в дальнейшем построена сеточная модель. Для получения оптимальных результатов, помимо анализа сеточной модели, также несколькими итерациями изменений подверглась расчетная область. Результатом этой работы стала расчетная область размером ДхШхВ 9720х6300х3600 мм. На данной РО построена сеточная модель (см. Рис. 4) размерностью 30 млн ячеек с локальным сгущением в районах модели МРК и его управляющего кабеля для лучшего разрешения турбулентных вихрей.

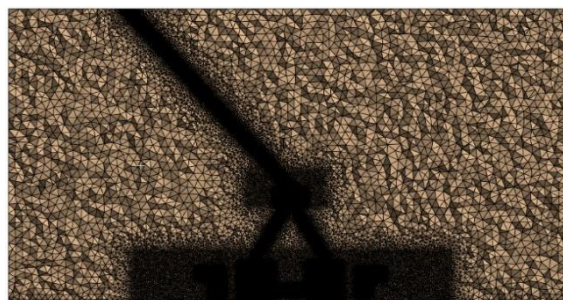
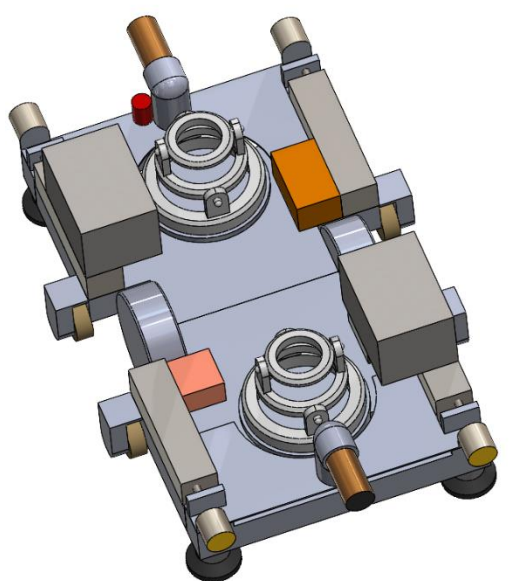
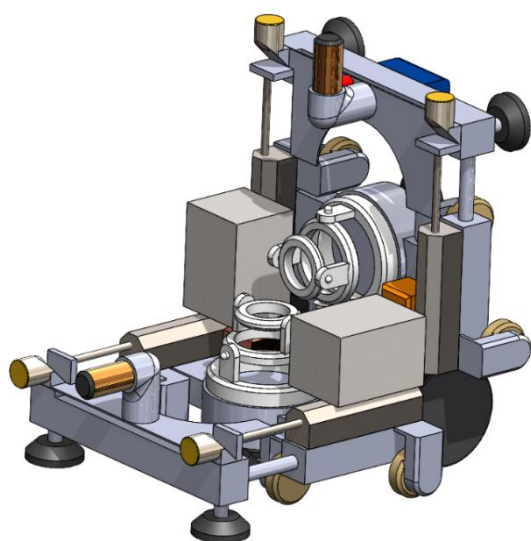


Рис. 4 Сеточная модель РО МРК.

После обработки методологии построения сеточной модели на одном варианте геометрии МРК, также были созданы сеточные модели для двух дополнительных случаев положения МРК, так как его работа сопровождается изменением положения в пространстве. На рис. 5 представлена геометрия МРК для двух случаев: а – полностью сложенный, то есть случай, когда пневмоцилиндры, предназначенные для перемещения МРК, полностью убраны; б – МРК сложенный под углом 90 градусов. 3D модели (см. Рис.5) были упрощены схожим с моделью (см. Рис.3) образом. Для МРК с полностью убранными пневмоцилиндрами размерность сеточной модели составила 21 млн ячеек. Для случая со сложенным под 90 градусов МРК количество ячеек в сетке составило 26 млн. Сгущением сетки в обоих дополнительных случаях было сделано аналогично первому.



(а)



(б)

Рис.5 3D модель МРК для двух дополнительных случаев.

2. Моделирование воздействия течения на МРК вблизи опорной поверхности

Решение задачи по обтеканию МРК осуществлялось в программном пакете *OpenFOAM* [5-7] при помощи расчетного модуля *simpleFoam*. Данный модуль позволяет проводить расчет стационарных задач для несжимаемых, турбулентных потоков путем решения уравнений неразрывности и сохранения импульса. При решении задачи по обтеканию вблизи опорной поверхности важно учитывать турбулентность потока, для этого в расчетах будет использоваться модель турбулентности *k-omega SST* [8], которая в настоящее время является стандартной для множества инженерных приложений, включая обтекание сложных тел.

На Рисунке 6 представлен конечный вид расчетной области задачи. Задавались следующие граничные условия для скорости: на входе (*Inlet*) задавалась начальная скорость обтекания, выход потока из области обеспечивался через границу *Outlet*. На самой поверхности робота и опорной поверхности задавалось условие *noSlip*, которое соответствует нулевой скорости обтекания на поверхности. Стандартное условие проскальзывания *slip* принято для оставшихся границ, соответствующих поверхностям воды в реальной задаче.

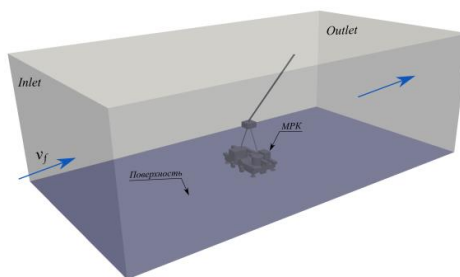


Рис. 6 Расчётная область задачи

При обтекании МРК полная сила, действующая на его поверхность, состоит из 2 компонент: силы нормального давления $F_n = \int (p \cdot \vec{n}) dS$ и силы вязкого трения (она зависит от турбулентной и динамической вязкостей). В ходе оценок сил было установлено, что силы вязкого трения составляют порядка 1-2% от сил нормального давления, поэтому при оценке общей действующей силы ими пренебрегается.

Вычисление и запись действующих сил и моментов осуществляется через пакет *OpenFOAM*, для каждой итерации расчета производится вывод значений сил и моментов в формате, представленном на Рисунке 7.

```
forces forces write:
Sum of forces
Total      : (-0.01078648 0.79291764 0.2522608)
Pressure   : (-0.01055476 0.78859259 0.25202976)
Viscous    : (-0.00023172036 0.0043250564 0.00023104835)
Sum of moments
Total      : (-0.36199912 0.0041392248 0.065094112)
Pressure   : (-0.3584433 0.0037254419 0.063546946)
Viscous    : (-0.0035558218 0.00041378299 0.0015471659)
writing force and moment files.
```

Рис. 7 Мониторинг значений сил и моментов в log-файле выдачи *OpenFOAM*.

Изначально, как уже было сказано выше, нами была использована расчетная область, отличающаяся от представленной на Рисунке 6 габаритными размерами (область была меньше в 2,5 раза по всем направлениям). Для нее была проведена серия расчетов сил, действующих на поверхность МРК при различных скоростях течения для различных конфигураций МРК.

На рисунке 8 представлены линии тока при обтекании сложного МРК потоком со скоростью $v_f = 2$ м/с. Хорошо видно образование вихревых зон и отрывных течений.

Результаты всех расчетов, сделанных на уменьшенной РО, представлены в Таблице 1. Видно, что при скоростях течения 2 м/с на поверхность МРК при полностью сложной конфигурации действует нагрузка порядка 2000 Н или 200 кг, что ставит под вопрос возможность эксплуатации МРК в таких условиях. Эта нагрузка в основном представлена силой сдвига F_y . В целом, зависимость максимальной нагрузки от скорости течения близка к квадратичной. Проведение расчетов для данной расчетной области позволило сделать вывод, что эксплуатировать МРК не стоит при скоростях течения воды выше 1,5 м/с.

Далее при помощи расширенной расчетной области (см. Рис.6) мы уточнили полученные значения сил, а также произвели расчет моментов и частичного обтекания МРК.

Для получения значений сил и моментов при частичном обтекании использовался открытый графический кросс-платформенный пакет для интерактивной визуализации *ParaView*. В нем, при помощи наложения специальных фильтров, модель обрезается произвольной плоскостью (см. Рисунок 9а,б) и можно произвести интегрирование давления по оставшейся поверхности, полученные при этом силы как раз будут соответствовать силам, действующим при частичном обтекании МРК (силой давления от ветра пренебрегаем). По полученным силам также считаются моменты.

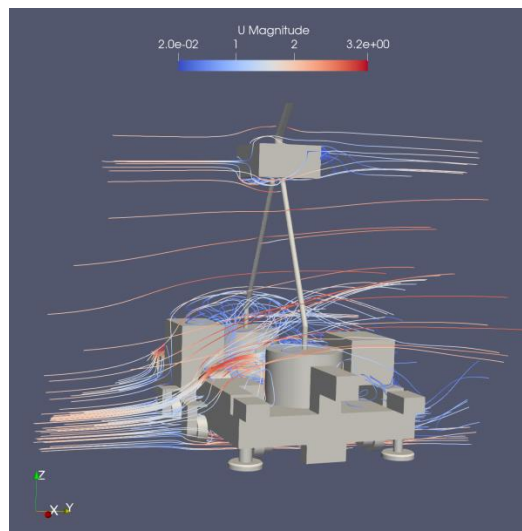


Рис. 8 Линии тока при обтекании сложного МРК потоком со скоростью $v_f = 2$ м/с

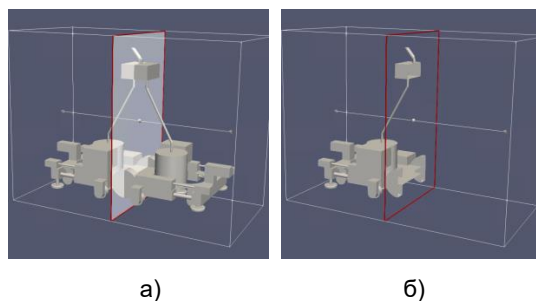


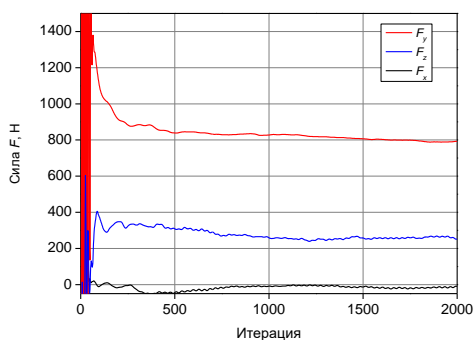
Рис. 9 Обрезка модели произвольной плоскостью в пакете *ParaView*: а) модель до обрезки; б) модель после обрезки

На Рисунке 10а,б,в приведены графики изменения сил в зависимости от итераций, наблюдается сходимость значений сил. Стоит отметить, что данные значения получены из программного пакета *OpenFOAM* и представляют собой нагрузку на МРК и часть кабеля управления, которые находится в расчетной области.

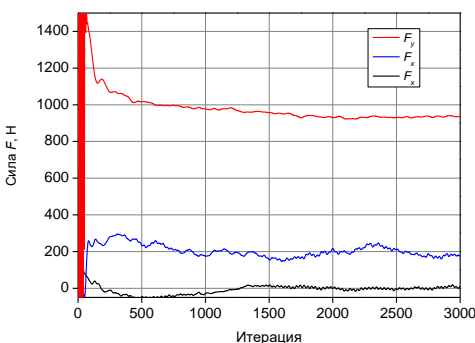
Таблица 1

Силы, действующие на МРК при различных скоростях течения

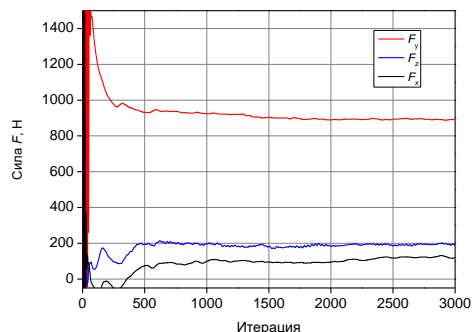
Скорость потока v_f , м/с	Полностью сложенный МРК		Полностью разложенный МРК		Сложенный под 90° МРК	
	F_y , Н	F_z , Н	F_y , Н	F_z , Н	F_y , Н	F_z , Н
0.5	131	41	195	42	189	38
1	530	180	780	190	755	150
1.5	1180	385	1720	390	1690	328
2	2100	700	-	-	-	-



а)



б)



в)

Рис. 10 Расчёт действующих сил для различных геометрий МРК: а) полностью сложенный МРК; б) полностью разложенный МРК; в) МРК, сложенный под углом 90°

Расчет сил и моментов, действующих только на поверхность МРК, был произведен в пакете *ParaView*, в нем была обрезана область с кабелями управления. Расчет моментов проводился относительно геометрического центра модели (через него проходит ось складывания МРК) для скорости потока 1.5 м/с. Возникающие силы и моменты при полном и частичном обтекании для трех конфигураций МРК представлены в следующих Таблицах 2 – 4.

Все полученные значения сил меньше, чем полученные при обтекании полностью погруженного МРК, однако, степень погружения должна

значительно влиять на моменты, действующие на МРК вблизи опорной поверхности. Действительно, максимальные моменты для полностью сложенной и разложенной конфигурации наблюдаются при степени погружения МРК равной 50% (тогда плоскость погружения проходит через ось складывания), а для сложенного под углом 90 градусов МРК максимальный момент наблюдается при полном погружении.

Максимальная нагрузка наблюдается при полном обтекании полностью разложенного МРК и составляет 724 Н, что составляет большую нагрузку и, вследствие чего, возможно, задуматься о модернизации конструкции МРК. В частности, рассматривается вариант установки на корпус МРК дефлекторов, прижимающими его к стенке кессона или накрытия МРК специальным чехлом, уменьшающим воздействующую на него силу.

Таблица 2

Силы и моменты, действующие на полностью сложенный МРК

Степень погружения МРК, %	F_y , Н	F_z , Н	M_x , Н·м	M_y , Н·м	M_z , Н·м
25	140	53	-12	16	-89
50	333	126	-26	43	-128
75	475	200	-39	17	-88
100	588	246	-45	2.6	-29

Таблица 3

Силы и моменты, действующие на полностью разложенный МРК

Степень погружения МРК, %	F_y , Н	F_z , Н	M_x , Н·м	M_y , Н·м	M_z , Н·м
25	186	12	10	14	-142
50	366	28	-5	28	-181
75	538	148	19	15	-131
100	724	157	-58	1	0

Таблица 4

Силы и моменты, действующие на сложенный под углом 90° МРК

Степень погружения МРК, %	F_y , Н	F_z , Н	M_x , Н·м	M_y , Н·м	M_z , Н·м
25	142	28	-51	-77	-16
50	508	82	-173	1	68
75	582	116	-180	-5	98
100	701	174	-185	-53	202

Отдельно произведена оценка сил и моментов, действующих на кабель управления в состоянии натяжения при погружении МРК на глубину 19 метров (см. Таблицу 5). Оценка производилась как теоретически, так и была подтверждена значениями нагрузки из пакета *ParaView* для части кабеля. Возникающие моменты намного превосходят моменты, действующие отдельно на корпус МРК,

поэтому управляющий кабель будет соединен со страховочным тросом, который скомпенсирует часть нагрузки.

Таблица 5

Силы и моменты, действующие на кабель управления

Конфигурация МРК	$F_y, Н$	$F_z, Н$	$M_x, Н·м$	$M_y, Н·м$	$M_z, Н·м$
Полностью сложенный	660	<10	655	<20	1540
Полностью разложенный					
Сложенный под углом 90°	712	<10	443	<20	1900

Заключение

В ходе работы были проведены численные расчеты обтекания МРК течениями с различными скоростями вблизи опорной поверхности при полном и частичном погружении в воду для различных конфигураций МРК. Показано, что течения со скоростью более 2 м/с являются нежелательными условиями эксплуатации МРК ввиду возникновения нагрузок более 100 кг. Полученные нагрузки заставляют задуматься о модернизации конструкции РА.

Работа выполнена в рамках НИР "Эксплуатация ПА для МЛСП «Приразломная» в условиях сурового воздействия течения и волнения морской среды" совместно ИПМех РАН и СПбГМТУ для ПАО "Газпромнефть".

Литература

1. Сухих Н.А., Зубакин, Г.К., Иванов, Н.Е., Нестеров, А.В. Структура течений и дрейфа льда в печорском море // VIII международная научно-практическая конференция «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей», секция «Динамика рек, озер и водохранилищ», Москва, РУДН, 2014 г.
2. Ермолов И.Л., Князьков М.М., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Перспективный мобильный робототехнический комплекс для проведения регламентных операций по очистке корпусов судов от обрастаний // Морские интеллектуальные технологии, 2023 г., том 1, № 2, с. 53-59
3. Балашов В., Громов Б., Ермолов И., Роскилли А. Мобильный робот для очистки корпусов судов от обрастаний, "Морской флот", № 3, 2009 г.
4. Balashov V. S., Gromov B. A., I Ermolov. L., Roskilly A. P., Cleaning by means of the HISMAR autonomous robot, Journal Russian Engineering Research, June 2011, Volume 31, Issue 6, pp 589-592.
5. OpenFOAM – the free, open source CFD software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.openfoam.com>
6. Zhandong Li, Jianguo Tao, Hao Sun, Yang Luo, Liang Ding, Zongquan Deng. Hydrodynamic calculation and analysis of a complex-shaped underwater robot based on computational fluid dynamics and prototype test. Advances in Mechanical Engineering. 9(11), 1-10, 2017, doi:10.1177/1687814017734500
7. Park Y.S., Park G.Y., Yoon J., Lee B.J., Oh W.Z. (1998) Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor. In: Zelinsky A. (eds) Field and Service Robotics. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38
8. Menter, Florian R.. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal, 32, 598-1605, 1994.

References

1. Sukhoi N.A., Zubakin, G.K., Ivanov, N.E., Nesterov, A.V. The structure of currents and ice drift in the Pechora Sea. VIII International scientific and practical conference "Dynamics and thermics of rivers, reservoirs and the coastal zone of the seas", section "Dynamics of rivers, lakes and reservoirs", Moscow, RUDN, 2014
2. Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N. A promising mobile robotic complex for routine operations for cleaning ship hulls from fouling // Marine intelligent technologies, 2023, volume 1, No. 2, pp. 53-59
3. Balashov V., Gromov B., Ermolov I., Roskilde A., Mobile robot for cleaning ship hulls from fouling, "Marine Fleet", № 3, 2009 г.
4. Balashov V. S., Gromov B. A., I Ermolov. L., Roskilly A. P., Cleaning by means of the HISMAR autonomous robot, Journal Russian Engineering Research, June 2011, Volume 31, Issue 6, pp 589-592.
5. OpenFOAM – the free, open source CFD software URL: <https://www.openfoam.com>
6. Zhandong Li, Jianguo Tao, Hao Sun, Yang Luo, Liang Ding, Zongquan Deng. Hydrodynamic calculation and analysis of a complex-shaped underwater robot based on computational fluid dynamics and prototype test. Advances in Mechanical Engineering. 9(11), 1-10, 2017, doi:10.1177/1687814017734500
7. Park Y.S., Park G.Y., Yoon J., Lee B.J., Oh W.Z. (1998) Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor. In: Zelinsky A. (eds) Field and Service Robotics. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38
8. Menter, Florian R.. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal, 32, 598-1605, 1994.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сиваков Никита Сергеевич, аспирант 2 курса, младший научный сотрудник лаборатории термогазодинамики и горения Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: sivakov@ipmnet.ru

Nikita S. Sivakov, 2nd year graduate student, Junior researcher at the Laboratory of Thermogasodynamics and Combustion of the Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: sivakov@ipmnet.ru

Усанов Владислав Александрович, аспирант 4 курса, младший научный сотрудник лаборатории термогазодинамики и горения Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: usanov@ipmnet.ru

Vladislav A. Usanov, 4nd year graduate student, Junior researcher at the Laboratory of Thermogasodynamics and Combustion of the Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: usanov@ipmnet.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2023.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 531.8

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.070>

Исследование модели взаимодействия ветровых волн с морским течением

Зарубин Н.А.¹ nik98zarubin@gmail.com, Шамаев А.С.² sham@rambler.ru

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

² Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Аннотация. Данная работа посвящена построению математической модели влияния вышедших из глубины течений на поле поверхностных ветровых волн. По аналогии с работой [1] выводится интегро-дифференциальное уравнение на величину отклонения свободной поверхности воды от положения равновесия. Далее осуществляется асимптотический анализ данного интегро-дифференциального уравнения на основе предположения о малости величины скорости возмущения поля течения по сравнению со скоростью движущегося потока, который взаимодействуя с неровностями дна вызывает возмущение потока. Асимптотический анализ с применением преобразования Фурье приводит к явной формуле для деформации спектра ветровой волны вышедшим на поверхность возмущенным течением. Спектр поверхностного волнения деформируется в широком диапазоне от миллиметровых волн до метровых, зона деформации принимает стабильную форму, в зоне деформации можно увидеть признаки неровностей морского дна.

Ключевые слова: Поверхностные волны, преобразование Фурье, оператор Лапласа нецелой степени.

Для цитирования: Зарубин Н.А., Шамаев А.С. Исследование модели взаимодействия ветровых волн с морским течением, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 93—98. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.070

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.070>

Investigation of the model of interaction of wind waves with the sea current

Nikolay A. Zarubin¹ nik98zarubin@gmail.com, Alexey S. Shamaev² sham@rambler.ru

¹ Lomonosov Moscow State University, Russian Federation,

² Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Annotation. This work is devoted to the construction of a mathematical model of the influence of currents emerging from the depths on the field of surface wind waves. By analogy with the work [1], an integro-differential equation is derived for the amount of deviation of the free surface of water from the equilibrium position. Next, an asymptotic analysis of this integro-differential equation is carried out based on the assumption that the velocity of the disturbance of the flow field is small compared to the velocity of the moving stream, which, interacting with the irregularities of the bottom, causes a disturbance of the flow. Asymptotic analysis using the Fourier transform leads to an explicit formula for deforming the spectrum of a wind wave by a perturbed flow that has surfaced. The spectrum of surface waves is deformed in a wide range from millimeter waves to meter waves, the deformation zone takes a stable shape, and signs of seabed irregularities can be seen in the deformation zone.

Key words: Surface waves, Fourier transform, Laplace operator of non-integer degree.

For citation: Zarubin N.A., Shamaev A.S. Investigation of the model of interaction of wind waves with the sea current, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 93—98. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.070

Введение

Ранее задача о деформации поверхности океана под действием течений, набегających на неровности морского дна рассматривались во многих работах российских и зарубежных авторов (например монография [2] и приведенную в ней литературу). В настоящей работе излагается новый асимптотический подход к определению возмущения ветровой волны на поверхности океана под действием течения, вышедшего из глубины. Получена явная формула для деформации спектра поверхности через преобразование Фурье от поля скоростей течения, вышедшего на поверхность.

1. Постановка задачи

Приведем в этом разделе для полноты изложения вывод основного уравнения, следуя [1].

Будем рассматривать невязкую жидкость с безвихревым движением. Введем потенциал скорости Φ ; из условия не сжимаемости следует, что $\nabla^2 \Phi = 0$. Обозначим свободную поверхность $z = \zeta(x, y, t)$. Пусть $\nabla_{xy} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ – оператор горизонтального градиента. Кинематическое условие для рассматриваемого движения на свободной поверхности имеет вид:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} - \left(\nabla_{xy} \Phi \Big|_{z=\zeta}, \nabla_{xy} \zeta \right).$$

Динамическое условие на поверхности обусловлено требованием, чтобы перепад давления по обе стороны определялся только поверхностным натяжением. Учитывая известное уравнение Бернулли для движения, получим на поверхности следующее уравнение:

$$\frac{p}{\rho} + g\zeta + \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla_{xy}\Phi)^2 \Big|_{z=\zeta} = 0$$

где p – плотность воды, а ρ – давление. Пусть рассматривается модель жидкости бесконечной глубины, тогда, пренебрегая влиянием атмосферы, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \Delta\Phi = Q, \\ \frac{\partial\zeta}{\partial t} = \frac{\partial\Phi}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} - (\nabla_{xy}\Phi \Big|_{z=\zeta}, \nabla_{xy}\zeta), \\ g\zeta + \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}|\nabla_{xy}\Phi \Big|_{z=\zeta}|^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial z} \Big|_{z=\zeta}\right)^2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где Q – мощность источников течения. Представим потенциал Φ в виде суммы компоненты F , отвечающей за неоднородное течение, и компоненты Ψ , связанной с поверхностным течением. Смещение поверхности ζ также разделим на смещение η для неоднородного и ξ для течения на поверхности.

Разложим компоненту F в ряд Тейлора в точке $z = \eta$:

$$F = F \Big|_{z=\eta} + \frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{z=\eta} \xi + \dots$$

Учитывая, что для F система (1) выполнена, получим, что первое уравнение системы переходит в $\Delta\Psi = 0$.

Рассмотрим подробнее третье уравнение системы. Подставляя в него $\Phi = F + \Psi$, получим:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial\Psi}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial^2 F}{\partial t \partial z} \Big|_{z=\eta} \xi + g\xi + g\eta + \\ & + \frac{1}{2} \left| \nabla_{xy} \left(\Psi + F + \frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{z=\eta} \right) \right|^2 + \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial\Psi}{\partial z} + \frac{\partial F}{\partial z} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \Big|_{z=\eta} \xi \right)^2 = 0. \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left| \nabla_{xy} \left(\Psi + F + \frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{z=\eta} \right) \right|^2 = \\ & = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial z} \Big|_{z=\eta} \xi \right)^2 + \left(\frac{\partial\Psi}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ & + 2 \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial\Psi}{\partial x} + 2 \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial z} \Big|_{z=\eta} \xi + \\ & + 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial z} \Big|_{z=\eta} \frac{\partial\Psi}{\partial x} \xi + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\Psi}{\partial y} \right)^2 + \\ & \left. + \left(\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial z} \Big|_{z=\eta} \xi \right)^2 + 2 \frac{\partial F}{\partial y} \frac{\partial\Psi}{\partial y} + \right. \end{aligned}$$

$$\left. + 2 \frac{\partial F}{\partial y} \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial z} \Big|_{z=\eta} \xi + 2 \frac{\partial\Psi}{\partial y} \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial z} \Big|_{z=\eta} \right),$$

будем считать амплитуду поверхностных волн малой, поэтому можно пренебречь квадратичными членами по Ψ и ξ , тогда получим

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left| \nabla_{xy} \left(\Psi + F + \frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{z=\eta} \right) \right|^2 = \\ & = \frac{1}{2} (\nabla_{xy} F)^2 + \left(\nabla_{xy} F \frac{\partial \nabla_{xy} F}{\partial z} \Big|_{z=\eta} \right) \xi + \\ & + (\nabla_{xy} F \nabla_{xy} \Psi) \Big|_{z=\eta}. \end{aligned}$$

Аналогично распишем для последнего слагаемого равенство:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{z=\eta} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \Big|_{z=\eta} \xi + \frac{\partial\Psi}{\partial z} \right)^2 = \\ & = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{z=\eta} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \Big|_{z=\eta} \xi \right)^2 + \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial\Psi}{\partial z} \Big|_{z=\eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z} \frac{\partial\Psi}{\partial z} \right) \Big|_{z=\eta} + \\ & + \frac{\partial F}{\partial z} \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \Big|_{z=\eta} \xi + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \frac{\partial\Psi}{\partial z} \xi. \end{aligned}$$

Учитывая, что F – стационарный поток, для которого система приобретает вид (1), получим следующий вид третьего уравнения в (1) относительно потенциала Ψ :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial\Psi}{\partial t} \Big|_{z=\eta} + g\xi + \left(\nabla_{xy} F \frac{\partial \nabla_{xy} F}{\partial z} \right) \xi + \\ & + (\nabla_{xy} F \nabla_{xy} \Psi) \Big|_{z=\eta} + \\ & + \left(\frac{\partial F}{\partial z} \frac{\partial\Psi}{\partial z} \right) \Big|_{z=\eta} + \frac{\partial F}{\partial z} \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \Big|_{z=\eta} \xi = 0. \end{aligned}$$

Аналогично, расписав второе уравнение системы (1) через F , Ψ , ξ , η , получим уравнение:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial\xi}{\partial t} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \Big|_{z=h} \xi + \frac{\partial\Psi}{\partial z} \Big|_{z=\eta} - \\ & - (\nabla_{xy} F \nabla_{xy} \xi) - (\nabla_{xy} \Psi \nabla_{xy} \eta) = 0. \end{aligned}$$

Тогда система (1) переходит в систему:

$$\begin{cases} \Delta\Psi = 0 \\ \frac{\partial\Psi}{\partial t} \Big|_{z=\eta} + g\xi + \left(\nabla_{xy} F \frac{\partial \nabla_{xy} F}{\partial z} \right) \xi + \\ + (\nabla_{xy} F \nabla_{xy} \Psi) \Big|_{z=\eta} + \\ + \left(\frac{\partial F}{\partial z} \frac{\partial\Psi}{\partial z} \right) \Big|_{z=\eta} + \frac{\partial F}{\partial z} \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \Big|_{z=\eta} \xi = 0, \\ \frac{\partial\xi}{\partial t} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \Big|_{z=h} \xi + \frac{\partial\Psi}{\partial z} \Big|_{z=\eta} - \\ - (\nabla_{xy} F \nabla_{xy} \xi) - (\nabla_{xy} \Psi \nabla_{xy} \eta) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Теперь предположим, что наклон поверхности жидкости мал, т.е. $|\nabla_{xy}\eta| \ll 1$ и, обозначив $\nabla_{xy}F$ через U , запишем систему (2) в виде:

$$\begin{cases} \Delta\Psi = 0 \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} + (U, \nabla_{xy})\right)\Psi|_{z=\eta} + g\xi = 0 \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} + (U, \nabla_{xy})\right)\xi - \frac{\partial\Psi}{\partial z}|_{z=h} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

С помощью преобразования Фурье по x и y решим первое уравнение системы (3) с учётом краевого условия, в качестве которого выступает третье уравнение. Избавляясь от Ψ , подставим решение во второе уравнение и получим уравнение для поверхностного смещения $\xi(x, y, t)$:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + (U, \nabla_{xy})\right)A\left(\frac{\partial}{\partial t} + (U, \nabla_{xy})\right)\xi + g\xi = 0, \quad (4)$$

где $A = (-\Delta_{xy})^{-1/2}$, $t > 0, x \in (-\infty, +\infty), y \in (-\infty, +\infty)$. Степень оператора Лапласа определяется по формуле:

$$\begin{aligned} & (-\Delta_{xy})^{-1/2}f(x, y) = \\ & = \frac{1}{4\pi^2} \int \exp(ik_1x) \exp(ik_2y) \frac{\hat{f}(k_1, k_2)}{|\vec{k}|} dk_1 dk_2, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \hat{f}(k_1, k_2) & = \\ & = \int \exp(-ik_1x) \exp(-ik_2y) f(x, y) dx dy, \\ |\vec{k}| & = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}. \end{aligned}$$

2. Асимптотический анализ уравнения

Пусть вышедшее на поверхность течение имеет вид

$$U = \varepsilon \vec{u}(x, y, t) + U_0 \vec{e}_1,$$

где $U_0 \vec{e}_1$ – вектор скорости основного потока, $\vec{u}(x, y, t) = (u_1(x, t), u_2(y, t))$ – вектор скорости возмущения основного потока, соразмерный по модулю со скоростью основного потока, ε – малый параметр. Будем считать, что при $t < 0$ возмущение u основного потока отсутствует, далее при $t > 0$ оно возникает, развиваясь от нуля до некоторого стационарного состояния $u^*(x, y) = (u_1(x), u_2(y))$.

Будем искать решение задачи (4) в виде

$$\xi = \xi_0 + \varepsilon \xi_1 + \dots$$

Подставим ξ в исходное уравнение (4) и приравняем коэффициенты при одинаковых степенях ε , получим уравнения для ξ_0 и ξ_1 , нулевого и первого приближений соответственно.

3. Нулевое приближение

Имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \xi_0}{\partial t^2} + 2U_0 \frac{\partial^2 \xi_0}{\partial t \partial x} + U_0^2 \frac{\partial^2 \xi_0}{\partial x^2} & = \\ & = -gA^{-1}\xi_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} A^{-1}\xi(x, y, t) & = \sqrt{-\Delta}\xi(x, y, t) = \\ & = \frac{1}{4\pi^2} \exp \int (ik_1x) \exp(ik_2y) \hat{\xi}(k_1, k_2, t) |\vec{k}| dk_1 dk_2. \end{aligned}$$

Пусть решение уравнения (5) имеет вид

$$\xi_0 = e^{i\Omega x} e^{i\gamma_1 x} e^{i\gamma_2 y} \quad (6).$$

Подставим (6) в (5) и получим, что решение в виде (6)

существует при $\Omega = -U_0\gamma_1 \pm \sqrt{g\sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}}$.

4. Первое приближение

Для первого приближения получаем уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} + 2U_0 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t \partial x} + U_0^2 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2} & = \\ & = -gA^{-1}\xi_1 + F(x, y, t). \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} F & = \Omega\gamma_1 A(u_1 \xi_0) + \Omega\gamma_2 A(u_2 \xi_0) + \Omega\gamma_1 u_1 A \xi_0 + \\ & + \Omega\gamma_2 u_2 A \xi_0 + U_0\gamma_1^2 u_1 A \xi_0 + U_0\gamma_1\gamma_2 u_2 A \xi_0 - \\ & - iU_0\gamma_1 A \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} \cdot \xi_0 + u_1 \frac{\partial \xi_0}{\partial x} \right) - \\ & - iU_0\gamma_2 A \left(\frac{\partial u_2}{\partial x} \xi_0 + u_2 \frac{\partial \xi_0}{\partial x} \right). \end{aligned}$$

Пусть нам известно Фурье преобразование компонент вектора скорости, то есть $\hat{u}_1 = v_1$ и $\hat{u}_2 = v_2$. Тогда возьмем Фурье преобразование от правой и левой частей уравнения (7) и будем искать его решение в виде $\hat{\xi}_1 = \hat{\eta}(k_1, k_2) e^{i\Omega t}$.

Итак,

$$\begin{aligned} \hat{F} & = \frac{\Omega\gamma_1(u_1 \xi_0)^\wedge + \Omega\gamma_2(u_2 \xi_0)^\wedge}{|\vec{k}|} + \\ & + \frac{1}{|\vec{\gamma}|} (\Omega\gamma_1 v_1 * \delta(k_1 - \gamma_1, k_2 - \gamma_2) + \\ & + \Omega\gamma_2 v_2 * \delta(k_1 - \gamma_1, k_2 - \gamma_2)) e^{i\Omega t} + \\ & + \frac{1}{|\vec{\gamma}|} (U_0\gamma_1^2 v_1 * \delta(k_1 - \gamma_1, k_2 - \gamma_2) + \\ & + U_0\gamma_1\gamma_2 v_2 * \delta(k_1 - \gamma_1, k_2 - \gamma_2)) e^{i\Omega t} - \\ & - iU_0\gamma_1 \frac{ik_1 v_1 * \hat{\xi}_0 + i\gamma_1 v_1 * \hat{\xi}_0}{4\pi^2 |\vec{k}|} - \\ & - U_0\gamma_2 \frac{ik_1 v_2 * \hat{\xi}_0 + i\gamma_1 v_2 * \hat{\xi}_0}{4\pi^2 \cdot |\vec{k}|}, \end{aligned}$$

где «*» - оператор свертки двух функций.

Обозначим $\vec{v}_{1,2} = v_{1,2}(k_1 - \gamma_1, k_2 - \gamma_2)$. Следовательно,

$$\begin{aligned} e^{-i\Omega t} (A^{-1}F)^\wedge & = e^{-i\Omega t} \cdot \hat{F} \cdot |\vec{k}| = \\ & = \Omega\gamma_1 \vec{v}_1 + \Omega\gamma_2 \vec{v}_2 + \\ & + \frac{|\vec{k}|}{|\vec{\gamma}|} (\Omega\gamma_1 \vec{v}_1 + \Omega\gamma_2 \vec{v}_2 + U_0\gamma_1^2 \vec{v}_1 + \\ & + U_0\gamma_1\gamma_2 \vec{v}_2) + U_0\gamma_1(k_1 - \gamma_1) \vec{v}_1 + U_0\gamma_1^2 \vec{v}_1 + \\ & + U_0\gamma_2(k_1 - \gamma_1) \vec{v}_2 + U_0\gamma_1\gamma_2 \vec{v}_2 = \\ & = \left(\Omega\gamma_1 \left(1 + \frac{|\vec{k}|}{|\vec{\gamma}|} \right) + U_0\gamma_1(k_1 + \gamma_1) \right) \vec{v}_1 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(\Omega \gamma_2 \left(1 + \frac{|\vec{k}|}{|\vec{\gamma}|} \right) + U_0 \gamma_2 (k_1 + \gamma_1) \right) \vec{v}_2. \\
 & \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} + 2U_0 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t \partial x} + U_0^2 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2} = \\
 & = -g|\vec{k}|\xi_1 + (A^{-1}F)^\wedge. \quad (8)
 \end{aligned}$$

Далее, подставляем $\xi_1 = \hat{\eta}(k_1, k_2)e^{i\Omega t}$ в уравнение (8) и находим

$$\begin{aligned}
 & \hat{\eta} = \frac{1}{|\vec{k}| - (\Omega + k_1 U_0)^2} \times \\
 & \times \left(\left(\Omega \gamma_1 \left(1 + \frac{|\vec{k}|}{|\vec{\gamma}|} \right) + U_0 \gamma_1 (k_1 + \gamma_1) \right) \vec{v}_1 + \right. \\
 & \left. + \left(\Omega \gamma_2 \left(1 + \frac{|\vec{k}|}{|\vec{\gamma}|} \right) + U_0 \gamma_2 (k_1 + \gamma_1) \right) \vec{v}_2 \right). \quad (9)
 \end{aligned}$$

5. Итоговое решение задачи и выводы

Общее решение задачи имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \xi &= \xi_0 + \varepsilon \xi_1 = \\
 &= 4\pi^2 \delta(k_1 - \gamma_1, k_2 - \gamma_2) e^{i\Omega t} + \varepsilon \hat{\eta} e^{i\Omega t}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

формула (10) позволяет просто вычислить спектр возмущенной течением поверхностной ветровой волны, если известно двумерное преобразование Фурье проекции на горизонтальную плоскость поля течения, вышедшего из глубины. Возмущение поверхности в спектральном представлении может быть получено из спектрального представления для плоской компоненты поля течений путем сдвига и умножения на некоторую "передаточную функцию".

При этом знаменатель в формуле (9) обращается в ноль на некоторой линии в плоскости k_1, k_2 . Для этих значений формула (9) теряет смысл. Связано это с тем, что в принятой линейной модели данные значения k_1 и k_2 являются резонансными значениями, при которых амплитуда соответствующей компоненты спектра возмущенной волны неограниченно возрастает при стремлении времени к бесконечности. Но при больших амплитудах не будет выполнено предположение о малости градиентов поверхности, которое лежит в основе вывода уравнений рассматриваемой модели. Поэтому деформации спектров будут достоверными только в некоторой окрестности кривой, на которой знаменатель в формуле (9) не обращается в ноль.

Для исследования возможности наблюдения деформации поверхности моря с помощью неконтактных измерительных приборов удобно именно представление деформированной поверхности в спектральной форме, так как для моделирования флуктуаций сигналов, полученных от радиометров и радиолокаторов удобно именно такое представление. Формулы для расчетов возмущений сигналов от радиометров и радиолокаторов приведены, например, в [2]. Имеется также большой экспериментальный материал, подтверждающий связь возмущений океанских течений за счет неоднородности дна с радиолокационными и радиометрическими изображениями поверхности.

Таким образом, мы получили Фурье преобразование уравнения (7):

См., например рис 2, на котором изображена батиметрическая карта участка морской поверхности и соответствующее радиолокационное изображение. Очевидно, между двумя изображениями существует связь, но ведь электромагнитные волны в соленую воду не проникают! Это явление давно вызывало большой интерес и несомненно требовало теоретического объяснения. В данной работе мы указываем на связь вышедших на поверхность течений и деформаций поверхностного волнового поля в спектральных представлениях. При этом локализованное в некоторой области поверхности течение порождает также локализованную в некоторой другой области флуктуацию поверхностного волнения, что вытекает из свойств преобразования Фурье и наблюдается также в эксперименте.

Кроме того, спектр возмущения поверхности может содержать более широкий набор частот, чем спектр вышедшего на поверхность поля скоростей течения, поскольку в формуле (9) присутствует сдвиг спектра. Подобный эффект также наблюдается в эксперименте, когда крупномасштабное течение вызывает изменение по всему спектру деформаций поверхности.

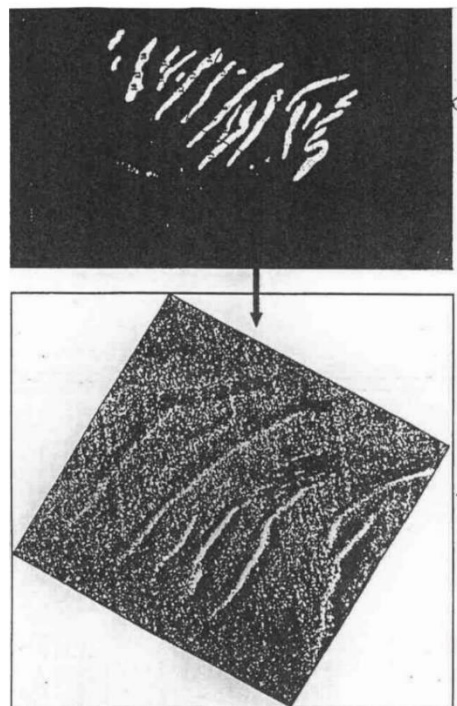


Рис. 2 Вид рельефа морского дна по радиолокационным изображениям морской поверхности.

- а) радиолокационное изображение, полученное с помощью космического аппарата "Алмаз-1"
 б) батиметрическая схема участка съёмки.

Литература

1. Баханов В. В., Таланов В. М. Преобразование нелинейных поверхностных волн в поле неоднородных течений / В. В., Баханов, В. М. Таланов // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование. – Н. Новгород, IPF RAS 1999. том. 2. стр. 81 – 107.

2. Нестеров С.В., Шамаев А.С., Шамаев С.И. Алгоритмы, методы и средства компьютерной радиотомографии приповерхностного слоя Земли, Москва, Научный мир, 1996 год, 296 стр.
3. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 375 с.
4. Басович А.Я., Баханов В.В., Браво-Животовский Д.М. и др. О корреляции изменений спектральной плотности сантиметровых и дециметровых поверхностных волн в поле внутренней волны. Препринт №153. Горький: ИПФ АН СССР, 1986. 9 с.
5. Басович А.Я., Баханов В.В., Таланов В.И. Влияние интенсивных внутренних волн на ветровое волнение (кинематическая модель) // Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность. Горький: Изд. во ИПФ АН СССР, 1982. С. 8–30.
6. Басович А.Я., Баханов В.В., Таланов В.И. Влияние интенсивных внутренних волн на ветровое волнение (кинематическая модель) // Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность / Ред. Е.Н. Пелиновский. Горький: ИПФ, 1982. С. 8–30.
7. Л. Н. Сретенский. Теория волновых движений жидкости, 2-е издание, изд. Наука, главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1977.
8. Baydulov V.G., Knyazkov D., Shamaev A.S. Motion of mass source in stratified fluid // J. Phys.: Conf. Ser. V. 2224. 2021 2nd International Symposium on Automation, Information and Computing (ISAIC 2021) 03/12/2021 - 06/12/2021 Online. P. 012038-1--8. 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2224/1/012038.
9. Князьков Д.Ю., Байдулов В.Г., Савин А.С., Шамаев А.С. Прямые и обратные задачи динамики поверхностного волнения, вызванного обтеканием подводного препятствия // ПММ. 2023. Т. 87. Вып. 3. С. 442-453. DOI: 10.31857/S0032823523030074 <https://pmm.ipmnet.ru/ru/Issues/2023/87-3/442>
10. Knyazkov D., Shamaev A. Rectilinear motion of mass source in non-uniformly stratified fluid // AIP Conf. Proc. 2023. (in print).
11. Bass F. G. and Fuks I. M. Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces (Pergamon), 1979, p 540.
12. Гершензон В.Е., Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С. Критические явления в радиотепловом излучении неровной водной по поверхности при произвольных углах наблюдения // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1987. Т. 30. № 9. С. 1159–1183.
13. Irisov V.G. Azimuthal variation of the microwave radiation from a slightly nonGaussian surface // Radio Science. 2000. V. 35. No. 1. P. 65–82.
14. Лаврова О.Ю., Серебряный А.Н., Митягина М.И., Боcharова Т.Ю. Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. No 4. С. 308–322.

References

1. Bakhanov V. V., Talanov V. M. Transformation of nonlinear surface waves in the field of inhomogeneous currents / V. V., Bakhanov, V. M. Talanov // Near-surface layer of the ocean. Physical processes and remote sensing. – N. Novgorod, IPF RAS 1999. vol. 2. pp. 81-107.
2. Nesterov S.V., Shamaev A.S., Shamaev S.I. Algorithms, methods and means of computer radiotomography of the near-surface layer of the Earth, Moscow, Scientific World, 1996, 296 p.
3. Monin A.S., Krasitsky V.P. Phenomena on the ocean surface. L.: Hydrometeoizdat, 1986. 375 p.
4. Basovich A.Ya., Bakhanov V.V., Bravo-Zhivotovsky D.M., etc. On the correlation of changes in the spectral density of centimeter and decimeter surface waves in the internal wave field. Preprint No.153. Gorky: IPF of the USSR Academy of Sciences, 1986. 9 p
5. Basovich A.Ya., Bakhanov V.V., Talanov V.I. The influence of intense internal waves on wind waves (kinematic model) // The impact of large-scale internal waves on the sea surface. Gorky: Izd. vo IPF of the USSR Academy of Sciences, 1982. pp. 8-30.
6. Basovich A.Ya., Bakhanov V.V., Talanov V.I. The effect of intense internal waves on wind waves (kinematic model) // The impact of large-scale internal waves on the sea surface / Ed. E.N. Pelinovsky. Gorky: IPF, 1982. pp. 8-30.
7. L. N. Sretensky. Theory of wave motions of a liquid, 2nd edition, ed. Nauka, the main editorial office of the physical and mathematical literature, Moscow, 1977.
8. Baydulov V.G., Knyazkov D., Shamaev A.S. Motion of mass source in stratified fluid // J. Phys.: Conf. Ser. V. 2224. 2021 2nd International Symposium on Automation, Information and Computing (ISAIC 2021) 03/12/2021 - 06/12/2021 Online. P. 012038-1--8. 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2224/1/012038.
9. Knyazkov D.Yu., Baidulov V.G., Savin A.S., Shamaev A.S. Direct and inverse problems of the dynamics of surface waves caused by the flow around an underwater obstacle // PMM. 2023. Vol. 87. Issue 3. pp. 442-453. DOI: 10.31857/S0032823523030074 <https://pmm.ipmnet.ru/ru/Issues/2023/87-3/442>
10. Knyazkov D., Shamaev A. Rectilinear motion of mass source in non-uniformly stratified fluid // AIP Conf. Proc. 2023. (in print).
11. Bass F.G. and Fuks I. M. Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces (Pergamon), 1979, p 540.
12. Gershenson V.E., Irisov V.G., Trokhimovsky Yu.G., Etkin V.S. Critical phenomena in radiothermal radiation of uneven water surface at arbitrary viewing angles // Izv. Universities. Radiophysics. 1987. Vol. 30. No. 9. pp. 1159-1183.
13. Irisov V.G. Azimuthal variation of the microwave radiation from a slightly nonGaussian surface // Radio Science. 2000. V. 35. No. 1. P. 65-82.
14. Lavrova O.Yu., Serebryany A.N., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu. Subsatellite observations of small-scale hydrodynamic processes in the northeastern part of the Black Sea // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2013. Vol. 10. No. 4. pp. 308-322.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Зарубин Николай Александрович, аспирант кафедры дифференциальных уравнений, механико-математического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, e-mail: nik98zarubin@gmail.com

Nikolay A. Zarubin, Postgraduate student of the Department of Differential Equations, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, e-mail: nik98zarubin@gmail.com

Шамаев Алексей Станиславович, доктор физико-математических наук, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова, главный научный сотрудник Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, РФ, 119526 г. Москва, Проспект Вернадского 101-1, e-mail: sham@rambler.ru

Alexey S. Shamaev, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor at Lomonosov Moscow State University, Chief Researcher at the Institute of Problems of Mechanics named after A.Y. Ishlinsky of the Russian Academy of Sciences, 119526 Moscow, Vernadsky Avenue 101-1, e-mail: sham@rambler.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 09.12.2023.

Научная статья

УДК 623.98: 534.222: 004.93:1

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.071>

Критерии аппроксимации выборок нейромоделями в интеллектуальных системах классификации морских целей

Пятакович В.А.¹ pva.877com@mail.ru, Пурденко А.П.¹ app.59@mail.ru,
Рычкова В.Ф.² rychkova@msun.ru

¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, ²Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. На практике возникает задача сравнения и выбора лучшей нейромодели, которая в процессе синтеза структуры сети достигла максимально возможных размеров и связности элементов с наименьшей ошибкой в процессе обучения. Существующие критерии, позволяющие оценить сложность, интерпретируемость и вариативность нейромоделей в полном объеме данную задачу не решают, поскольку нейромодели могут на выходе определять значения не одной, а нескольких переменных, а порог ошибки для экземпляра выборки на практике не всегда может быть задан. В работе предложен новый комплекс критериев, характеризующих такие свойства сетей, как разнообразие, переобученность, эластичность и другие, что позволяет автоматизировать выполнение задачи анализа свойств и сравнения нейросетевых и нейронечетких моделей при классификации морских целей в интеллектуальных системах Военно-Морского Флота в условиях неполной и нечеткой входной информации об идентифицируемом объекте.

Ключевые слова: классификация, распознавание морских целей, выборка, отбор экземпляров, редукция данных, сокращение размерности данных

Для цитирования: Пятакович В.А., Пурденко А.П., Рычкова В.Ф. Критерии аппроксимации выборок нейромоделями в интеллектуальных системах классификации морских целей, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 99—104. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.071

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.071>

Criteria for approximating samples by neural models in intelligent systems for classifying marine targets

Valeriy A. Pyatakovich¹ pva.877com@mail.ru, Alexander P. Purdenko¹ app.59@mail.ru,
Victoria F. Rychkova² rychkova@msun.ru

¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Vladivostok. Russian Federation, ²Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi, Vladivostok. Russian Federation

Annotation. In practice, the task arises of comparing and selecting the best neural model, which, in the process of synthesizing the network structure, has achieved the maximum possible size and connectivity of elements with the smallest error in the learning process. Existing criteria that allow one to assess the complexity, interpretability and variability of neural models do not fully solve this problem, since neural models can determine the output values of not one, but several variables, and the error threshold for a sample instance cannot always be set in practice. The work proposes a new set of criteria characterizing such properties of networks as diversity, retraining, elasticity and others, which allows you to automate the task of analyzing the properties and comparing neural network and neuro-fuzzy models when classifying naval targets in intelligent systems of the Navy in conditions of incomplete and fuzzy input information about the identified object.

Keywords: classification, recognition of maritime targets, sampling, selection of specimens, data reduction, data dimensionality reduction

For citation: Pyatakovich V.A., Purdenko A.P., Rychkova V.F. Criteria for approximating samples by neural models in intelligent systems for classifying marine targets, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 99—104. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.071

Введение

В настоящее время достаточно широко применяемым на практике классом инструментальных средств при решении задач распознавания и классификации морских целей являются искусственные нейронные и нейронечеткие сети, представляющие собой однородные параллельные иерархические вычислительные структуры. Известно много различных видов нейромоделей и методов их обучения [1–4]. Поэтому на практике возникает

задача сравнения и выбора лучшей нейромодели из имеющихся. Эта задача, как правило, решается путем сравнения таких характеристик, как достигнутая точность (ошибки) вычислений, а также скорость обучения и работы нейромоделей [1]. Ранее авторами в работах [5–7] были предложены критерии, позволяющие оценить сложность, логическую прозрачность (интерпретируемость), избыточность и вариативность нейромоделей. В работе [8] предложены некоторые критерии сложности аппроксимации выборок нейромоделями.

Однако данный перечень критериев отражает лишь малую часть свойств, которыми обладают нейромодели. Поэтому представляется целесообразным расширить перечень рассматриваемых свойств нейромоделей.

Постановка задачи

Пусть задана обучающая выборка $\langle x, y \rangle$, где $x = \{x^s\}$, $x^s = \{x_j^s\}$, $y = \{y^s\}$, $s = 1, 2, \dots, S$, $j = 1, 2, \dots, N$; x^s – s -й экземпляр выборки; x_j^s – значение j -го признака s -го экземпляра; S – число экземпляров выборки; N – число признаков; y^s – значение выходного признака, сопоставленное s -му экземпляру выборки, на основе которой синтезирована нейронная или нейронечеткая сеть. Поскольку наиболее широко используемым типом сетей являются слоистые сети прямого распространения, будем характеризовать сети кортежем: $\langle M, \{N_\eta\}, \{ \langle \{w_j^{(\eta,i)}\}, \varphi^{(\eta,i)}, \psi^{(\eta,i)} \rangle \} \rangle$,

где M – число слоев сети; N_η – количество нейронов в m -м слое сети; $w_j^{(\eta,i)}$ – весовой коэффициент j -го входа i -го нейрона η -го слоя; $\varphi^{(\eta,i)}$ – дискриминантная функция i -го нейрона η -го слоя; $\psi^{(\eta,i)}$ – функция активации i -го нейрона η -го слоя.

Также обозначим: N_n – число нейронов в сети; $\varphi(i), \psi(i)$ – дискриминантная и активационная функции i -го нейрона соответственно; $w_{i,j}$ – вес связи между i -м и j -м нейронами сети, если связь отсутствует, примем $w_{i,j} = 0$, где $i, j = 1, 2, \dots, N_n$.

Для автоматизации сравнительного анализа нейромоделей необходимо разработать набор показателей, а также методы их расчета, отражающие важнейшие свойства нейромоделей. Задачами данной работы является создание критериев для оценивания таких свойств нейромоделей, как разнообразие, переобученность, эластичность, эквивиальность, устойчивость к шуму, эмерджентность, а также монотонность выборок, используемых для построения нейромоделей.

Свойства, определяемые обучающей выборкой

Монотонность выборки согласно работе [8] определяется как свойство выборки, соответствующее условию

$$\forall s, p = 1, 2, \dots, S: x^s \leq x^p \rightarrow y^s < y^p.$$

Определим показатель монотонности i -го выхода по j -му входу для обучающей выборки $\langle x, y \rangle$

как

$$I_{mon}^{i,j} = \frac{1}{S(S-1)} \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^S \{1|x_j^s \leq x_j^p, y_i^s \leq y_i^p, s \neq p\}.$$

Показатель монотонности выборки запишем в следующем виде

$$I_{mon} = \frac{1}{N_M N S (S-1)} \sum_{i=1}^{N_M} \sum_{j=1}^N \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^S \{1|x_j^s \leq x_j^p, y_i^s < y_i^p, s \neq p\}.$$

Показатель монотонности выборки будет равен

единице для монотонной выборки, и нулю для немонотонной выборки.

Очевидно, что чем выше уровень монотонности выборки, тем проще осуществить разделение выборки на классы и тем более простую нейросеть можно выбрать для решения задачи.

Разнообразие является одной из важнейших характеристик систем и определяется числом различных состояний системы.

В соответствии с законом «необходимого разнообразия» У. Р. Эшби [9], создавая систему, способную справиться с решением проблемы, обладающей определенным известным разнообразием (сложностью), нужно обеспечить, чтобы система имела еще большее разнообразие (знания методов решения), чем разнообразие решаемой проблемы.

Для генеральной совокупности при неизвестных распределениях признаков условно оценим предельное разнообразие как

$$I_{div}(X, Y) = \left(\prod_{i=1}^{N_M} \frac{(y_i^{\max*} - y_i^{\min*})}{\lambda_i^*} \right) \left(\prod_{j=1}^N \frac{(x_j^{\max*} - x_j^{\min*})}{\lambda_j^*} \right),$$

где λ_j – максимальное количество десятичных разрядов, которое может быть использовано для фиксации значений j -го признака (определяется возможностями измерительной аппаратуры и особенностями задачи); $y_i^{\max*}, y_i^{\min*}$ – соответственно максимальное и минимальное возможные значения i -го выходного признака; $x_j^{\max*}, x_j^{\min*}$ – соответственно максимальное и минимальное возможные значения j -го входного признака.

Для обучающей выборки будем определять абсолютное разнообразие как

$$I_{div}(x, y) = (N_M + N)$$

$$\sum_{s=1}^S (1 | \prod_{p=s+1}^S (1 | \sum_{j=1}^N |x_j^s - x_j^p| == 0) = 0),$$

$$x \subset X, y \subset Y,$$

где $\langle X, Y \rangle$ – генеральная совокупность, из которой извлекается выборка $\langle x, y \rangle$, λ_j – количество десятичных разрядов, используемое для представления значений j -го признака в ЭВМ (на практике определяется типом данных и разрядной сеткой ЭВМ).

Для синтезируемой нейросетевой модели net (для общего случая полносвязной сети с внешним входом и собственными обратными связями нейронов) определим показатель предельного разнообразия

$$I_{div}(net) = \frac{N N_H^{\max} \sum_{i=1}^{N_H^{\max}} \vartheta_{np}(\varphi(i)) \vartheta_{np}(\psi(i))}{\text{round} \left(\frac{w^{\max} - w^{\min}}{\Delta w} \right)},$$

где N_H^{\max} – максимально возможное количество нейронов в сети net; $\vartheta_{np}(element)$ – характеристика пластичности функционального элемента нейрона (будем полагать $\vartheta_{np}(element)$ равным числу возможных состояний элемента $element$: для дискриминантной функции i -го нейрона $\vartheta_{np}(\varphi(i))$ будет равняться числу возможных видов дискриминантных функций, которые могут быть

заданы для данного нейрона; для функции активации i -го нейрона $\vartheta_{np}(\psi(i))$ будет равняться числу возможных видов функций активации, которые могут быть заданы для данного нейрона; $\vartheta_{np}^{\max}(\varphi), \vartheta_{np}^{\min}(\psi)$ – соответственно максимальные характеристики пластичности дискриминантных и активационных функций среди всех нейронов сети; w^{\max}, w^{\min} – соответственно максимальное и минимальное возможные значения весов сети; Δw – минимально возможное изменение веса с учетом разрядности вычислительной сетки ЭВМ; $round$ – функция округления к ближайшему целому числу.

На основе введенных абсолютных показателей предельного разнообразия определим относительные показатели.

Для обучающей выборки определим показатель разнообразия по отношению к генеральной совокупности как

$$I_{div}(x, X, y, Y) = \frac{I_{div}(x, y)}{I_{div}^*(X, Y)}$$

Для нейронной сети net определим показатель разнообразия по отношению к обучающей выборке как

$$I_{div}(net, < x, y >) = \frac{I_{div}(net)}{I_{div}(x, y)}$$

Для нейронной сети net определим показатель разнообразия по отношению к генеральной совокупности как

$$I_{div}(net, X, Y) = \frac{I_{div}(net)}{I_{div}^*(X, Y)}$$

Переобученность распознающей модели net на обучающей выборке x для тестовой выборки $x_{\text{тест}}, x_{\text{тест}} \neq x$, в работе [11] определяют следующим образом

$$\delta_{net}(x, x_{\text{тест}}) = v(net, x_{\text{тест}}) - v(net, x),$$

$$n(net, x) = \frac{1}{S} \sum_{x=1}^S E(net, x^s),$$

где $n(net, x)$ – частота ошибок модели net на выборке x (в задачах классификации):

$$E(net, x^s) = \{1 | net(x^s) \neq y^s\},$$

в задачах оценивания:

$$E(net, x^s) = \{1 | \delta \leq |net(x^s) - y^s|\},$$

где δ – порог ошибки.

Поскольку нейромодели могут на выходе определять значения не одной, а нескольких переменных, и порог ошибки для экземпляра на практике не всегда может быть задан, тогда для большей универсальности и единообразия при решении различных задач определим:

$$E(net, x^s) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} \left(\frac{\psi^{(n,i)}(x^s) - y_i^s}{\max_{s=1,2,\dots,S}(y_i^s) - \min_{s=1,2,\dots,S}(y_i^s)}\right)^2\right)$$

Эластичность функции $y(x)$ по переменной x_j , согласно работе [11], запишем

$$E_{x_j}(y) = \lim_{\Delta x_j \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta x_j}{x_j}} = \left(\lim_{\Delta x_j \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x_j}\right) \frac{x_j}{y},$$

где $\Delta y = \frac{y(x_j + \Delta x_j) - y(x_j)}{y(x_j)}, x_j > 0, y > 0$.

Определим относительную оценку эластичности обучающей выборки $< x, y >$ с нормированием для выходной переменной y_i по входной переменной x_j :

$$E_{x_j, y_i}(< x, y >) = \frac{\sum_{s=1}^S \frac{\tilde{x}_j^s}{\tilde{y}_i^s}}{2S} \times \max_{\substack{s=1,2,\dots,S \\ p=s+1,\dots,S}} \left\{ \frac{\max(\tilde{y}_i^s, \tilde{y}_i^p) - \min(\tilde{y}_i^s, \tilde{y}_i^p)}{\min(\tilde{y}_i^s, \tilde{y}_i^p)} \left| \tilde{x}_j^s - \tilde{x}_j^p \right| > 0 \right\},$$

где

$$\tilde{x}_j^s = 1 + \frac{x_j^s - \min_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p)}{\max_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p)},$$

$$\tilde{y}_i^s = 1 + \frac{y_i^s - \min_{p=1,2,\dots,S}(y_i^p)}{\max_{p=1,2,\dots,S}(y_i^p) - \min_{p=1,2,\dots,S}(y_i^p)}$$

Относительную эластичность по переменной x_j аппроксимирующей функции $y_i = net(x)$, реализуемой нейросетью net на j -м выходе y_i , обученной на основе выборки $< x, y >$, определим следующим образом

$$E_{x_j}(net, y_i) = \frac{1}{2S} \sum_{s=1}^S \left(\frac{\tilde{x}_j^s (\tilde{\Psi}_{(\tilde{x}_j^s + \Delta x_j)}^{(N_M, i)} - \tilde{\Psi}_{(\tilde{x}_j^s)}^{(N_M, i)})}{\Delta x_j (\tilde{\Psi}_{(\tilde{x}_j^s)}^{(N_M, i)})^2} \right),$$

где $\tilde{\Psi}_{(\tilde{x}_j^s)}^{(N_M, i)}$ – расчетное значение на j -м выходе нейросети net при подаче на ее сети нормированных значений признаков i -го экземпляра; $\tilde{\Psi}_{(\tilde{x}_j^s + \Delta x_j)}^{(N_M, i)}$ – расчетное значение на i -м выходе нейросети net при подаче на ее входы нормированных значений признаков s -го экземпляра, а на j -й вход – скорректированного нормированного на Δx_j значения j -го признака s -го экземпляра.

Устойчивость к шуму – свойство нейросетей обеспечивать правильную реакцию на входной сигнал, содержащий шум.

Определим показатель устойчивости обученной нейросети к аддитивному шуму во входном сигнале по j -му входу:

$$I_{tolj}^l = \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{s=1}^S \left((net(x^s) - net_{(j+)}(x^s))^2 + (net(x_j^s) - net_{(j-)}(x^s))^2 \right)\right),$$

$$\begin{aligned}
 (j^+)x_g^s &= \begin{cases} x_g^s, & g \neq j, g = 1, 2, \dots, N; \\ x_g^s + l \left(\max_{p=1,2,\dots,S} (x_g^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_g^p) \right), & g = j, \end{cases} \\
 (j^-)x_g^s &= \begin{cases} x_g^s, & g \neq j, g = 1, 2, \dots, N; \\ x_g^s - l \left(\max_{p=1,2,\dots,S} (x_g^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_g^p) \right), & g = j, \end{cases} \\
 x_j^s &= x_j^s - l \left(\max_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) \right),
 \end{aligned}$$

где l – заданный уровень шума при $0 < l < 1$. Показатель устойчивости обученной нейросети к случайному аддитивному шуму во входном сигнале определим как

$$I_{tot}^l = \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{s=1}^S ((net(x^s) - net(x^s))^2 + (net(x_j^s) - net(x^s))^2) \right),$$

$$x_j^s = x_j^s + l \left(\max_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) \right),$$

$$x_j^s = x_j^s - l \left(\max_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) \right),$$

$$j = 1, 2, \dots, N,$$

где l – заданный уровень шума при $0 < l < 1$. Для автоматизации процесса задания l предлагается использовать выражение

$$l = \min_{j=1,2,\dots,N} \left\{ \frac{\min_{\substack{s=1,2,\dots,S \\ p=s+1,\dots,S}} \{ |x_j^s - x_j^p| |y^s \neq y^p| \}}{\left| \max_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) \right|} \right\}.$$

Системные свойства нейромоделей

К свойствам архитектуры нейромодели следует отнести: пластичность, однородность, параллелизм, иерархичность, предорганизацию в обучении и функциональную блочность.

Пластичность обуславливает сложность поведения нейронной сети (НС), которая рассматривается как результат взаимодействия многих элементов. Каждый из них ограничивает действие других и сам ограничивается другими на пути к формированию глобального наблюдаемого поведения.

Различают нейронную пластичность (в качестве пластических элементов рассматриваются нейроны), а также синаптическую пластичность (модификация силы синаптической связи между нейронами).

Параллельная архитектура и распределенность вычислений – обработка информации в НС, которая выполняется несколькими процессорными элементами, в то время как в обычных компьютерах, имеющих только один центральный процессор, информация обрабатывается последовательно, по шагам.

Иерархическая организация структуры (целостность и дробимость элементов) НС – использование иерархических структур, которое позволяет строить модели сложных объектов из более простых. Работа иерархической структуры требует, чтобы

информационный элемент в каждом иерархическом уровне вел себя как единое целое, но при переходе с уровня на уровень допускал дробление, причем при переходе с верхнего иерархического уровня на нижний это дробление соответствует выделению составляющих его элементов, а при переходе с нижнего уровня на верхний оно соответствует включению определенной части этого элемента в более сложный объект.

Функциональная блочность – свойство построения архитектуры сети из стандартизированных функциональных блоков, внутренняя организация и свойства которых определены заранее и известны разработчику. Если уровень функциональной блочности равен нулю, это означает, что разработчику сети понятны только преобразования на уровне конкретных нейронов, однако нет таких групп нейронов, функции которых были бы ему понятны.

Если же уровень функциональной блочности равен единице, то все нейроны сети объединены в систему блоков, функционирование которых понятно на более высоком уровне, чем уровень конкретного нейрона.

Эквифинальность – закономерность функционирования и развития системы, характеризующая её предельные возможности [10]. Определим относительную эквифинальность нейромодели net как

$$I_{ef}(net, \langle x, y \rangle) = \frac{NN_w}{N_{H.}^{\max}(N_{H.}^{\max^2} + N)} \times$$

$$\times \exp \left(-\frac{1}{SN} \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{N_M} (\Psi_{(x^s)}^{(i)} - y_i^s)^2 \right),$$

где $\Psi_{(x^s)}^{(i)}$ – расчетное значение на j -м выходе сети при подаче на ее входы экземпляра x^s .

Относительная эквифинальность будет принимать наибольшее значение для тех сетей, которые достигли максимально возможных размеров и связности в процессе синтеза структуры, а также наименьшей ошибки в процессе обучения.

Эмерджентность – наличие у системы новых (особых) свойств, не присущих ее элементам и не связанных системообразующими связями. Свойство связано с целью, для выполнения которой создается система.

Степень целостности системы в соответствии с работой [9] определяется как

$$I_{\alpha} = \frac{C_v}{C_0},$$

где C_0 – собственная сложность, представляющая собой суммарную сложность (содержание) элементов системы вне связи их между собой (в случае прагматической информации – суммарная сложность элементов, влияющая на достижение цели); C_v – взаимная сложность, характеризующая степень взаимосвязи элементов в системе (т.е. сложность ее устройства, схемы, структуры).

Применительно к нейросетевой модели определим эмерджентность:

$$I_{\alpha} = - \frac{\sum_{i=1}^{N_n} \sum_{j=1}^{N_n} \vartheta_{\alpha v}(i, j)}{\sum_{j=1}^{N_n} \vartheta_{\alpha o}(j)},$$

где $\vartheta_{\alpha v}(i, j)$ – характеризует наличие связи между i -м и j -м нейронами сети ($\vartheta_{\alpha v}(i, j) = 1$, если связь имеется, в противном случае функция $\vartheta_{\alpha v}(i, j) = 0$), $\vartheta_{\alpha o}(j)$ – сложность j -го нейрона, которая может быть определена в единицах элементарных операций сложения и умножения.

Заключение

В статье для решения задачи автоматизации анализа свойств и сравнения нейросетевых моделей, используемых в интеллектуальных системах [11] при классификации подводных лодок и надводных кораблей, предложен комплекс моделей критериев, характеризующих такие свойства указанных сетей, как разнообразие, переобученность, эластичность, эквивалентность, устойчивость к шуму, эмерджентность, что позволяет автоматизировать выполнение задачи анализа свойств и сравнения нейросетевых и нейронечетких моделей при решении задач распознавания морских целей в интеллектуальных системах ВМФ РФ.

Литература

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – Москва: Вильямс, 2006. – 1104 с.
2. Борисов В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федуров. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.
3. Принципы построения функциональной модели самоорганизующейся системы автоматического обнаружения и классификации морских целей на базе нейросетевых технологий / В. А. Пятакович, А. М. Василенко, А. В. Николаев, О. А. Алексеев // Машиностроение и инженерное образование. – 2022. – № 1. – С. 33–46.
4. Пятакович В. А. Снижение уровней низкочастотных дискретных составляющих подводного шума морского объекта / В. А. Пятакович, А. В. Николаев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2021. – № 4. – С. 14–21.
5. Automation of Information Processing in the Intelligent System of Marine Monitoring / В. А. Пятакович, А. В. Николаев, Е. А. Костиков, О. В. Хотинский // Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. – Т. 50. – № 7, – С. 634–641.
6. Пятакович В. А. Автоматизация обработки информации в интеллектуальной системе морского мониторинга / В. А. Пятакович, А. В. Николаев, Е. А. Костиков // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2020. – № 4. – С. 72–79.
7. Пятакович, В. А. Методы комплексного уменьшения подводного шума морского объекта / В. А. Пятакович, В. Ф. Рычкова, А. С. Шмаков // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 3. – № 4 (54). – С. 28–34.
8. Пятакович В. А. Критерии компарирования систем искусственного интеллекта / В. А. Пятакович, В. Ф. Рычкова, Н. Г. Левченко // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 3. – № 4 (54). – С. 21–27.
9. Пятакович В. А. Математические модели оценки эффективности амортизирующих креплений виброактивных механизмов морских объектов по колебательной мощности / В. А. Пятакович, В. Ф. Рычкова, А. П. Пурденко // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 3. – № 4 (54). – С. 13–20.
10. Адаптивная локально-оптимальная стратегия управления эксплуатацией нейросетевой системы классификации морских целей / В. А. Пятакович, А. П. Пурденко, В. Ф. Рычкова, Е. Г. Филиппов // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 1–2 (47). – С. 195–204.
11. Патент № 2697719 Российская Федерация, МПК G01H 3/00 (2006.01). Система морского мониторинга с программируемым нейросетевым комплексом управления: № 2018146615 : заявл. 25.12.2018 : опубл. 19.08.19 / Пятакович В. А., Василенко А. М., Пятакович Н. В. – 18 с.

References

1. Hajkin S. Neural networks: a complete course / S. Hajkin. – Moskva : Vil'yams, 2006. – 1104 s.
2. Borisov V. V. Fuzzy models and networks / V. V. Borisov, V. V. Kruglov, A. S. Fedulov. – Moskva : Goryachaya liniya-Telekom, 2007. – 284 s.
3. Principles of constructing a functional model of a self-organizing system for automatic detection and classification of sea targets based on neural network technologies / V. A. Pyatakovich, A. M. Vasilenko, A. V. Nikolaev, O. A. Alekseev // Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie. – 2022. – № 1. – S. 33–46.
4. Pyatakovich V. A. Reducing the levels of low-frequency discrete components of underwater noise of a marine object / V. A. Pyatakovich, A. V. Nikolaev // Problemy` mashinostroeniya i avtomatizacii. – 2021. – № 4. – S. 14–21.
5. Automation of Information Processing in the Intelligent System of Marine Monitoring / V. A. Pyatakovich, A. V. Nikolaev, E. A. Kostikov, O. V. Xotinskij // Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. – Т. 50. – № 7, – S. 634–641.
6. Pyatakovich V. A. Automation of information processing in an intelligent marine monitoring system / V. A. Pyatakovich, A. V. Nikolaev, E. A. Kostikov // Problemy` mashinostroeniya i avtomatizacii. – 2020. – № 4. – S. 72–79.
7. Pyatakovich, V. A. Methods for comprehensive reduction of underwater noise of a marine facility / V. A. Pyatakovich, V. F. Ry`chkova, A. S. Shmakov // Morskie intellektual`ny`e texnologii. – 2021. – Т. 3. – № 4 (54). – S. 28–34.
8. Pyatakovich V. A. Criteria for comparing artificial intelligence systems / V. A. Pyatakovich, V. F. Ry`chkova, N. G. Levchenko // Morskie intellektual`ny`e texnologii. – 2021. – Т. 3. – № 4 (54). – S. 21–27.
9. Pyatakovich V. A. Mathematical models for assessing the effectiveness of shock-absorbing fastenings of vibration-

- active mechanisms of offshore objects based on oscillatory power / V. A. Pyatakovich, V. F. Ry`chkova, A. P. Purdenko // Morskie intellektual`ny`e texnologii. –2021. – Т. 3. – № 4 (54). – S. 13–20.
10. Adaptive locally optimal strategy for controlling the operation of a neural network system for classifying naval targets / V. A. Pyatakovich, A. P. Purdenko, V. F. Ry`chkova, E. G. Filippov // Morskie intellektual`ny`e texnologii. – 2020. – № 1–2 (47). – S. 195–204.
11. Patent № 2697719 Rossijskaya Federaciya, MPK G01H 3/00 (2006.01). Marine monitoring system with a programmable neural network control complex : № 2018146615 : zayavl. 25.12.2018 : opubl. 19.08.19 / Pyatakovich V. A., Vasilenko A. M., Pyatakovich N. V. – 18 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Пятакович Валерий Александрович, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории. Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С. О. Макарова, 690062, Россия, г. Владивосток. Камский переулок, 6. e-mail: pva.877com@mail.ru

Пурденко Александр Петрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Тактики военно-морского флота и военной истории. Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С. О. Макарова. 690062, Россия, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: app.59@mail.ru

Рычкова Виктория Феликсовна, начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского, 690059, Россия, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а. e-mail: rychkova@msun.ru

Valeriy A. Pyatakovich, Associate Professor, Ph.D. (Eng). Director of research Laboratory. Pacific Higher Naval College named after S. O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok. 690062. Russian Federation, e-mail: pva.877com@mail.ru

Alexander P. Purdenko, Associate Professor, Ph.D. (Eng). Associate professor of department of Tactics of the Navy and military history. Pacific Higher Naval College named after S. O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation e-mail: app.59@mail.ru

Victoria F. Rychkova, Director of the Department of Research and Innovation Activities Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi. 50 – a, Verkhneportovaya st., Vladivostok. 690059. Russian Federation, e-mail: rychkova@msun.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.11.2023.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.11.2023.
Принята к публикации/accepted for publication 09.12.2023.

Научная статья

УДК 623.98: 534.222: 004.93:1

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.072>

Показатели эффективности для оптимизации процесса построения нейромоделей систем классификации морских целей

Пятакович В.А.¹ pva.877com@mail.ru, Василенко А.М.¹ kahunya@gmail.com,
Рычкова В.Ф.² rychkova@msun.ru

¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, ²Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Оценка эффективности применения существующих нейросетевых моделей показала их недостаточную адаптацию к особенностям решения задачи классификации морских целей, что обосновывает построение новых специализированных нейромоделей систем классификации. Разнообразие нейросетевых структур приводит к необходимости автоматизации процесса их сравнения и анализа важнейших свойств нейромоделей. Наиболее широко используемыми критериями сравнения нейромоделей являются точность, характеризующая ошибкой обучения и ошибкой распознавания тестовых данных, время и количество итераций затраченных на процесс обучения, время распознавания тестовых данных, число слоев и нейронов сети. Этот набор показателей отражает лишь небольшую часть свойств нейромоделей, поэтому авторами был предложен комплекс критериев характеризующих сложность структуры и поведения, избыточность памяти, логическую прозрачность и качество аппроксимации нейросетевых моделей.

Ключевые слова: нейронная сеть, обучаемость, интерпретируемость, надежность, распределенность памяти, вариативность, эффективность.

Для цитирования: Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Показатели эффективности для оптимизации процесса построения нейромоделей систем классификации морских целей, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 105—111. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.072

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.072>

Performance indicators for optimizing the process of constructing neural models of naval target classification systems

Valeriy A. Pyatakovich¹ pva.877com@mail.ru, Anna M. Vasilenko kahunya@gmail.com,
Victoria F. Rychkova² rychkova@msun.ru

¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Vladivostok. Russian Federation, ²Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi, Vladivostok. Russian Federation

Annotation. An assessment of the effectiveness of using existing neural network models showed their insufficient adaptation to the peculiarities of solving the problem of classifying marine targets, which justifies the construction of new specialized neural models of classification systems. The variety of neural network structures leads to the need to automate the process of comparing them and analyzing the most important properties of neural models. The most widely used criteria for comparing neural models are accuracy, characterized by the training error and the test data recognition error, the time and number of iterations spent on the learning process, the test data recognition time, the number of layers and neurons of the network. This set of indicators reflects only a small part of the properties of neural models, so the authors proposed a set of criteria characterizing the complexity of structure and behavior, memory redundancy, logical transparency and quality of approximation of neural network models.

Keywords: neural network, learning ability, interpretability, reliability, memory distribution, variability, efficiency.

For citation: Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Rychkova V.F. Performance indicators for optimizing the process of constructing neural models of naval target classification systems, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 105—111. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.072

Введение

Для построения распознающих моделей по прецедентам широкое распространение на практике получили нейромодели, представляющие собой массивированно-параллельные соединения простых, обычно адаптивных элементов (нейронов), имеющих непустое множество входов, вместе с их иерархической организацией, обладающих свойствами нелинейности, нелокальности (дальнего действия), нестационарности (обучаемости) и обратной связи (исключение бесконечного рекуррента).

Наиболее значимыми классами сетевых вычислительных структур являются искусственные нейронные и нейронечеткие сети, описанные в работах [1–6]. В настоящее время разработан широкий спектр моделей и методов построения нейронных и нейронечетких сетей.

Такое разнообразие существующих моделей приводит к необходимости решения задачи автоматизации анализа свойств и сравнения сетевых вычислительных моделей. Целью работы является создание математического обеспечения для автоматизации анализа свойств и сравнения вычислительных нейромоделей применительно к

задачам автоматической классификации морских целей (МЦ).

Постановка задачи

Пусть задана обучающая выборка $\langle x, y \rangle$, где $x = \{x^s\}$, $x^s = \{x_j^s\}$, $y = \{y^s\}$, $s = 1, 2, \dots, S$, $j = 1, 2, \dots, N$, а x^s – s -й экземпляр выборки, x_j^s – значение j -го признака s -го экземпляра, S – число экземпляров выборки, N – число признаков, y^s – значение выходного признака, сопоставленное s -му экземпляру выборки.

Тогда задача построения распознающей модели $y = f(w, x)$ по выборке прецедентов $\langle x, y \rangle$ (задача обучения с учителем) заключается в идентификации такой структуры модели f и значений ее параметров w , при которых достигается экстремум заданной целевой функции обучения F .

При использовании нейронных сетей в качестве базиса для построения нейромодели необходимо обеспечить выбор наилучшей модели из множества возможных, что требует выделения наиболее значимых их характеристик.

Поскольку наиболее широко используемым типом сетей являются слоистые сети прямого распространения, будем характеризовать сети кортежем $\langle f, w \rangle$,

где $f = \langle M, \{N_\eta\}, \{ \langle \varphi^{(\eta,i)}, \psi^{(\eta,i)} \rangle \} \rangle$, M – число слоев сети, N_η – число нейронов в η -м слое сети, $w_j^{(\eta,i)}$ – весовой коэффициент j -го входа i -го нейрона η -го слоя, $\varphi^{(\eta,i)}$ – дискриминантная функция i -го нейрона η -го слоя, $\psi^{(\eta,i)}$ – функция активации i -го нейрона η -го слоя.

Также обозначим N_n – число нейронов в сети; $\varphi(i)$ и $\psi(i)$ – соответственно дискриминантная и активационная функции i -го нейрона (при сплошной нумерации нейронов сети); $w_{i,j}$ – вес связи между i -м и j -м нейронами сети (если связь отсутствует, примем $w_{i,j} = 0$), где $i, j = 1, 2, \dots, N_n$.

Для нейронных сетей чаще всего на практике структура модели f задается пользователем либо подбирается путем эволюционной оптимизации, а значения параметров w настраиваются на основе градиентных и, реже, эволюционных методов.

Для автоматизации сравнительного анализа нейромодели необходимо разработать набор показателей, а также методы их расчета, отражающие важнейшие свойства нейромодели.

Целесообразно при этом обеспечить такой масштаб шкалы критериев, при котором они будут легко объединяться друг с другом.

Наиболее широко используемыми критериями сравнения нейросетевых моделей, используемых для задания целевых функций F , являются точность, характеризующая ошибкой обучения и ошибкой распознавания тестовых данных, время и количество итераций, затраченных на процесс обучения, время распознавания тестовых данных, число слоев и нейронов сети [1, 2].

В работе [2] предложен ряд способов для оценки сложности нейросетей (НС).

Однако такой набор показателей отражает лишь небольшую часть свойств нейромодели. Поэтому авторами в работах [1–4] был предложен комплекс критериев, характеризовавших сложность,

избыточность памяти, логическую прозрачность и качество аппроксимации нейросетевых моделей.

Такие важные свойства НС, как иерархичность, пластичность, однородность, параллелизм вычислений, предорганизация в обучении, функциональная блочность, обучаемость, интерпретируемость, надежность, обобщение, распределенность памяти, вариативность моделей, эффективность до настоящего времени либо не имели аналитических формул для количественного выражения, либо оценивались показателями с различными диапазонами значений. Следовательно, в настоящей работе именно данные свойства выбраны для анализа.

Свойства структуры нейромодели

К свойствам архитектуры нейромодели следует отнести пластичность (сеть обладает большими адаптационными способностями), однородность, параллелизм, иерархичность, предорганизацию в обучении и функциональную блочность.

Пластичность обуславливает сложность поведения НС, которое рассматривается как результат взаимодействия многих элементов. Каждый из них ограничивает действие других и сам ограничивается другими на пути к формированию глобального наблюдаемого поведения.

Различают нейронную пластичность (в качестве пластических элементов рассматриваются нейроны), а также синаптическую пластичность (модификация силы синаптической связи между нейронами).

Относительный коэффициент нейронной пластичности зададим как

$$I_{н.п} = \frac{\sum_{i=1}^{N_n} \vartheta_{н.п}(\varphi(i)) \vartheta_{н.п}(\psi(i))}{N_{н.п}^{\max} \vartheta_{н.п}^{\max}(\varphi) \vartheta_{н.п}^{\max}(\psi)},$$

где $N_{н.п}^{\max}$ – максимально возможное количество нейронов; $\vartheta_{н.п}(element)$ – характеристика пластичности функционального элемента нейрона (будем полагать $\vartheta_{н.п}(element)$ равным числу возможных состояний элемента: для дискриминантной функции i -го нейрона $\vartheta_{н.п}(\varphi(i))$ будет равняться числу возможных видов дискриминантных функций, которые могут быть заданы для данного нейрона; для функции активации i -го нейрона $\vartheta_{н.п}(\psi(i))$ будет равняться числу возможных видов функций активации, которые могут быть заданы для данного нейрона); $\vartheta_{н.п}^{\max}(\varphi)$ и $\vartheta_{н.п}^{\max}(\psi)$ – максимальные характеристики пластичности дискриминантных и активационных функций соответственно среди всех нейронов сети. Относительный коэффициент нейронной пластичности сети будет принимать значения в диапазоне от 0 до 1, и чем больше его значение, тем выше уровень нейронной пластичности сети.

Относительный коэффициент синаптической пластичности сети определим как

$$I_{сп} = \frac{\sum_{i=1}^{N_n} \sum_{j=1}^{N_n} \vartheta_{сп}(i, j)}{N_n^2 \text{round} \left(\frac{w^{\max} - w^{\min}}{\Delta w} \right)},$$

где w^{\max} и w^{\min} – соответственно максимально и минимально возможные значения весов сети; Δw – минимально возможное изменение веса с учетом

разрядности вычислительной сетки ЭВМ; $round$ – функция округления к ближайшему целому числу; $\vartheta_{sp}(i, j)$ – характеристика пластичности связи от i -го нейрона к j -му $\vartheta_{sp}(i, j) = 0$, если связь не может существовать либо связь жестко задана и ее вес не может изменяться.

В остальных случаях:

$$\vartheta_{sp}(i, j) = round\left(\frac{w_{i,j}^{max} - w_{i,j}^{min}}{\Delta w_{i,j}}\right),$$

где $w_{i,j}^{max}$ и $w_{i,j}^{min}$ – соответственно максимально и минимально возможные значения веса связи от i -го нейрона к j -му; $\Delta w_{i,j}$ – минимально возможное изменение веса с учетом размера разрядной сетки ЭВМ.

Относительный коэффициент синаптической пластичности сети будет принимать значения в диапазоне от 0 до 1, и чем больше его значение, тем выше уровень синаптической пластичности сети при фиксированном количестве нейронов.

Относительный коэффициент пластичности сети определим на основе введенных относительных коэффициентов нейронной и синаптической пластичностей: $I_{pl} = I_{н.п} I_{sp}$.

Однородность нейроэлементов сети заключается в том, что нейросети строятся из множества простых унифицированных типовых элементов (нейронов), выполняющих элементарные действия (умножение, сложение, вычисление простейшей нелинейной функции) и соединенных между собой различными связями.

Однородность дискриминантных функций будем оценивать в виде

$$I_{hd} = \frac{2 \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{j=1}^{N_n} \{1|\varphi(i) \equiv \varphi(j)\}}{N_n(N_n - 1)}.$$

Однородность функций активации предлагается определять по формуле

$$I_{ha} = \frac{2 \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{j=1}^{N_n} \{1|\psi(i) \equiv \psi(j)\}}{N_n(N_n - 1)}.$$

Однородность нейронов сети определим как

$$I_{hn} = \frac{2 \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{j=1}^{N_n} \{1|(\psi(i) \equiv \psi(j)) \wedge (\varphi(i) \equiv \varphi(j))\}}{N_n(N_n - 1)}.$$

Показатели однородности будут изменяться от 0 до 1, и чем больше их значения, тем более однородны соответствующие элементы сети.

Параллельная архитектура и распределенность вычислений – обработка информации в НС, которая выполняется несколькими процессорными элементами, в то время как в обычных компьютерах, имеющих только один центральный процессор, информация обрабатывается последовательно, по шагам.

Параллелизм вычислений сети прямого распространения без латеральных связей будем характеризовать с помощью критерия:

$$I_{par} = \frac{\sum_{\eta=1}^M \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^{N_\eta} (N_{\eta-1} + 3)}{N_w + 2N_n}.$$

Иерархическая организация структуры, целостность и дробимость элементов НС – использование иерархических структур, позволяющее строить модели сложных объектов из более простых.

Работа иерархической структуры требует, чтобы информационный элемент в каждом иерархическом уровне вел себя как единое целое, но при переходе с уровня на уровень допускал дробление, причем при переходе с верхнего иерархического уровня на нижний это дробление соответствует выделению составляющих его элементов, а при переходе с нижнего уровня на верхний оно соответствует включению определенной части этого элемента в более сложный объект.

Определим иерархичность сети как

$$I_h = \frac{\sum_{\eta=1}^M \eta N_\eta}{MN_n}.$$

Предорганизация в обучении – свойство сети, отражающее ее пригодность для решения задачи в начале процесса структурно-параметрической идентификации. Данное свойство будем характеризовать набором показателей.

Относительный показатель предорганизации в обучении определим как

$$I_{po} = \frac{1}{2N_w} \sum_{\eta=1}^M \sum_{i=1}^{N_\eta} \sum_{j=1}^{N_{\eta-1}} \vartheta_{po}(w_j^{(\eta,i)}) + \frac{1}{4N_n} \sum_{\eta=1}^M \sum_{i=1}^{N_\eta} \vartheta_{po}(\varphi^{(\eta,i)}) + \frac{1}{4N_n} \sum_{\eta=1}^M \sum_{i=1}^{N_\eta} \vartheta_{po}(\psi^{(\eta,i)}),$$

где M – количество слоев в сети; N_n – количество нейронов в сети; ϑ_{po} – эвристическая функция, показывающая степень неслучайности задания значения параметра сети в предорганизации ее обучения:

$$\vartheta_{po}(element) = \begin{cases} 0, & element = rand; \\ 1, & element \neq rand \end{cases}$$

либо

$$\vartheta_{po}(element) = 1 - \frac{\max(rand) - \min(rand)}{\max(element) - \min(element)},$$

где $element$ – условное обозначение параметра функции; $rand$ – случайная компонента элемента.

Относительный показатель автоматизации предорганизации в обучении зададим как

$$I_{apo} = \frac{\vartheta_L + \vartheta_H}{4} + \frac{1}{4N_w} \sum_{\eta=1}^M \sum_{i=1}^{N_\eta} \sum_{j=1}^{N_{\eta-1}} \left(\vartheta_a(w_j^{(\eta,i)}) \vartheta_{po}(w_j^{(\eta,i)}) \right) + \frac{1}{8N_H} \sum_{\eta=1}^M \sum_{i=1}^{N_\eta} \left(\vartheta_a(w_j^{(\eta,i)}) \vartheta_{po}(\varphi^{(\eta,i)}) \right) + \frac{1}{8N_H} \sum_{\eta=1}^M \sum_{i=1}^{N_\eta} \left(\vartheta_a(w_j^{(\eta,i)}) \vartheta_{po}(\psi^{(\eta,i)}) \right),$$

где ϑ_L – эвристическая мера, показывающая степень автоматизации задания числа слоев в предорганизации обучения сети ($\vartheta_L = 1$, если число слоев определяется автоматически; в противном случае принимают $\vartheta_L = 0$); ϑ_H – эвристическая мера, показывающая степень автоматизации задания числа нейронов в предорганизации обучения сети ($\vartheta_H = 1$, если число нейронов определяется автоматически; в противном случае принимают $\vartheta_H = 0$); $\vartheta_a(element)$ – эвристическая функция, показывающая степень автоматизации задания значения параметра *element* сети в предорганизации ее обучения ($\vartheta_a(element) = 0$, если значение параметра *element* задает пользователь, в противном случае – $\vartheta_a(element) = 1$).

Функциональная блочность – свойство построения архитектуры сети из стандартизированных функциональных блоков, внутренняя организация и свойства которых определены заранее и известны. Поскольку все нейронные и нейронечеткие сети по своей природе состоят из нейронов, обладающих однотипностью выполняемых операций, относительную функциональную блочность будем рассматривать на внешнем уровне по отношению к уровню нейронов:

$$I_{fb} = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{j=i+1}^{N_H} \vartheta_{fb}(i, j)}{N_H(N_H - 1)},$$

где $\vartheta_{fb}(i, j)$ – показатель принадлежности *i*-го и *j*-го нейронов сети к одному и тому же функциональному блоку ($\vartheta_{fb}(i, j) = 1$, если нейроны принадлежат к одному и тому же блоку, $\vartheta_{fb}(i, j) = 0$ – в противном случае).

Если уровень функциональной блочности равен нулю, то это означает, что разработчику сети понятны только преобразования на уровне конкретных нейронов, однако нет таких групп нейронов, функции которых были бы ему понятны. Если же уровень функциональной блочности равен единице, то все нейроны сети объединены в систему блоков, функционирование которых понятно на более высоком уровне, чем уровень конкретного нейрона.

Свойства настраиваемых параметров нейромодели

К свойствам настраиваемых параметров нейромодели можно отнести обобщение, обучаемость, интерпретабельность, надежность,

распределенность памяти, вариативность и эффективность нейромоделей.

Обобщение – способность сети интегрировать частные данные для определения закономерностей и пролонгации результатов, что позволяет после обучения на одних данных применять полученные знания для других данных.

Коэффициент обобщения обученной сети определим как

$$I_{gen} = \frac{NS}{N_w N_H} I_h \exp(-(E_{об} - E_{тест})^2),$$

где $E_{об}$ и $E_{тест}$ – соответственно ошибка сети для обучающей и тестовой выборок.

Если коэффициент обобщения будет существенно больше единицы, то сеть проявляет большие обобщающие способности, если же коэффициент обобщения существенно меньше единицы, то сеть не проявляет обобщающих свойств.

Обучаемость – свойство нейросетей совершенствовать свою работу (обучаться или адаптироваться), используя примеры для настройки на решение определенной задачи.

Определим показатель обучаемости сети как

$$I_{tr} = \frac{I_{pl}(1 - L)L_{net}}{NS},$$

где L_{net} – константа Липшица (сложность) нейронной сети *net*; L – модифицированная константа Липшица для обучающей выборки:

- для задач с вещественной выходной переменной:

$$L(x, y) = \sqrt{\max_{\substack{s=1,2,\dots,S; \\ g=s+1,\dots,S}} \left\{ \frac{v_y(y^s - y^g)^2}{1 + \sum_{i=1}^N v_i(x_i^s - x_i^g)^2} \right\}},$$

$$v_i = \left(\frac{1}{\max_{s=1,2,\dots,S} \{x_i^s\} - \min_{s=1,2,\dots,S} \{x_i^s\}} \right)^2,$$

$$v_y = \left(\frac{1}{\max_{s=1,2,\dots,S} \{y^s\} - \min_{s=1,2,\dots,S} \{y^s\}} \right)^2;$$

- для задач с дискретной выходной переменной:

$$L(x, y) = \left(1 + \min_{\substack{s=1,2,\dots,S; \\ g=s+1,\dots,S}} \left\{ \sum_{i=1}^N v_i(x_i^s - x_i^g)^2 \right\} \right)^{-0,5}.$$

Чем больше будет значение показателя обучаемости, тем большими возможностями обладает нейронная сеть *net* для решения задачи аппроксимации таблично заданной зависимости $y = f(x)$. Интерпретабельность (логическая прозрачность) – свойство сети быть понятной для восприятия и анализа человеком.

Очевидно, что сеть является более интерпретабельной, если она иерархичная, функционально блочная, а ее веса контрастны (близки по значению к нулю или единице), причем среднее число входов нейрона не превышает 5–7

(это число обусловлено особенностями человеческой психики).

Наряду с ранее предложенными в работах [1, 3, 6] характеристиками логической прозрачности, можно эвристически определить интерпретируемость через иерархичность и функциональную блочность:

$$I_{interp} = \frac{I_{fb} I_h N_h}{\sum_{\eta=1}^M \sum_{i=1}^{N_\eta} \sum_{j=1}^{N_{\eta-1}} \vartheta_i(w_j^{(\eta,i)})},$$

$$\vartheta_i(w_j^{(\eta,i)}) = \begin{cases} 1 - \left| \sin(\pi w_j^{(\eta,i)}) \right|, & 0 \leq w_j^{(\eta,i)} \leq 1; \\ \frac{1}{w_j^{(\eta,i)}}, & w_j^{(\eta,i)} > 1; \\ \frac{1}{|w_j^{(\eta,i)} - 1|}, & w_j^{(\eta,i)} < 0. \end{cases}$$

Надежность и устойчивость сети к отказам отдельных элементов, ее составляющих проявляется в том, что отказ одного или нескольких нейроэлементов сети не приводит к отказу всей НС и не может существенно влиять на работу сети в целом.

Определим показатели надежности весов сети относительно обучающей выборки как

$$I_{wre}^{avg} = 1 - \frac{\sum_{\eta=1}^M \sum_{i=1}^{N_\eta} \sum_{j=1}^{N_{\eta-1}} |E(w) - E(w|w_j^{(\eta,i)} = 0)|}{N_w \sum_{i=1}^{N_M} |\Psi_{max}^{(M,i)} - \Psi_{min}^{(M,i)}|},$$

$$I_{wre}^{max} = 1 - \frac{\max_{\substack{\eta=1, \dots, M; \\ i=1, \dots, N_\eta; \\ j=1, \dots, N_{\eta-1}}} |E(w) - E(w|w_j^{(\eta,i)} = 0)|}{\max_{i=1, \dots, N_M} |\Psi_{max}^{(M,i)} - \Psi_{min}^{(M,i)}|},$$

где $E(w) = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{N_M} (y_i^s - \Psi_s^{(M,i)})^2$ – ошибка сети при наборе весовых коэффициентов w ; $\Psi_s^{(M,i)}$ – значение на s -м выходе сети для s -го экземпляра.

Определим показатели надежности нейронов сети относительно обучающей выборки как

$$I_{nre}^{avg} = 1 - \frac{\sum_{\eta=1}^M \sum_{i=1}^{N_\eta} \sum_{j=1}^{N_{\eta-1}} |E(w) - E(w|\forall p = 1, 2, \dots, N_{\eta+1}: w_i^{(\eta+1,p)} = 0)|}{N_w \sum_{i=1}^{N_M} |\Psi_{max}^{(M,i)} - \Psi_{min}^{(M,i)}|},$$

$$I_{nre}^{max} = 1 - \frac{\max_{\substack{\eta=1, \dots, M; \\ i=1, \dots, N_\eta; \\ j=1, \dots, N_{\eta-1}}} |E(w) - E(w|\forall p = 1, 2, \dots, N_{\eta+1}: w_i^{(\eta+1,p)} = 0)|}{\max_{i=1, \dots, N_M} |\Psi_{max}^{(M,i)} - \Psi_{min}^{(M,i)}|}.$$

Распределенность памяти – информация в сети, которая хранится по многим адресам таким образом, что каждый элемент данных представляется шаблоном активности, распределенным по многим вычислительным элементам, и каждый

вычислительный элемент участвует в представлении многих различных элементов данных.

Распределенность памяти сети представим, как усредненную долю весов, оказывающих существенное влияние на выход сети в общем числе весов для обучающей выборки:

$$I_{md} = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{\eta=1}^M \sum_{i=1}^{N_\eta} \sum_{j=1}^{N_{\eta-1}} \left(1 - e^{-\left(E(w, x^s) - E(w, x^s | w_j^{(\eta,i)}) \right)^2} \right)}{SN_w}.$$

Вариативность моделей аппроксимируемой зависимости по одной и той же таблице данных сетью заключается в том, что при неизменной структуре, но разных начальных значениях весов либо разных методах их настройки после обучения в общем случае может получиться несколько различных нейромоделей.

Определим абсолютный показатель вариативности моделей для сети:

$$I_v = \prod_{\eta=1}^M \prod_{i=1}^{N_\eta} \left(\vartheta_v(\varphi^{(\eta,i)}) \vartheta_v(\psi^{(\eta,i)}) \prod_{j=1}^{N_{\eta-1}} \vartheta_v(w_j^{(\eta,i)}) \right),$$

где $\vartheta_v(\varphi^{(\eta,i)})$, $\vartheta_v(\psi^{(\eta,i)})$, $\vartheta_v(w_j^{(\eta,i)})$ – соответственно показатели вариативности типов дискриминантных и активационных функций нейронов, а также значений весов в процессе обучения сети (если соответствующий элемент сети в процессе обучения может принимать только одно фиксированное состояние, то полагают $\vartheta_v(element) = 1$).

Вариативность дискриминантных и активационных функций определяется архитектурой сети и методом обучения.

Для весов вариативность предлагается оценивать по формуле $\vartheta_v(w_j^{(\eta,i)}) = 1$, если вес является неизменным в процессе обучения;

$\vartheta_v(w_j^{(\eta,i)}) = \text{round}\left(\frac{w_{jmax}^{(\eta,i)} - w_{jmin}^{(\eta,i)}}{\Delta w_j^{(\eta,i)}}\right)$, если вес может изменяться.

Здесь $w_{jmax}^{(\eta,i)}$, $w_{jmin}^{(\eta,i)}$ – соответственно максимально и минимально возможные значения веса $w_j^{(\eta,i)}$; $\Delta w_j^{(\eta,i)}$ – минимально возможное изменение веса с учетом размера разрядной сетки ЭВМ.

Эффективность (качество) решения задач НС определяется точностью (ошибкой) решения задачи для обучающих и тестовых данных, простотой, интерпретируемостью и быстродействием полученной нейросетевой модели, а также затратами на построение нейросетевой модели (требования к аппаратным средствам, и затраты времени метода обучения).

Обобщенный показатель эффективности нейромодели на основе предложенных показателей определим как

$$I_{ef} = I_{pl} I_{par} I_h I_{fb} I_{gen} I_{tr} I_{interp}$$

$$(I_{wre}^{avg} + I_n^{avg}) \left(\frac{1+0,5(I_{po}+I_{apo})}{6} \right) e^{-E}$$

В заключение отметим, что обобщенный показатель эффективности может быть использован как для сравнения нейромоделей и методов их синтеза, так и для оптимизации процесса построения нейромоделей. Применение предложенных

показателей на практике позволяет автоматизировать процесс построения авторских нейросетевых моделей для решения задач автоматической классификации морских целей.

Литература

1. Нейросетевые технологии в интеллектуальных системах обнаружения и оперативной идентификации морских целей : монография / В. А. Пятакович, А. М. Василенко, О. В. Хотинский. – Владивосток : Морской гос. ун-т им. Г. И. Невельского, 2018. – 263 с.
2. Оценка эффективности средств освещения обстановки ВМФ как информационных источников экспертной системы классификации целей / В. А. Пятакович, А. М. Василенко, Н. В. Пятакович // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ : сб. статей. – Владивосток: ТОВВМУ, 2018. – Вып. 96.– С. 309–316.
3. Пятакович В. А. Перспективные методы решения научной проблемы классификации целей нейросетевой экспертной системой при мониторинге морской обстановки / В. А. Пятакович, А. М. Василенко, В. Ф. Рычкова // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4 (42). – Том 5. – С. 139–148.
4. Технология создания автоматизированной системы дальнего приема и нейросетевой классификации гидрофизических полей морских акватории / В. А. Пятакович, А. М. Василенко, А. В. Филиппова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2017. – Вып. 7. – С. 247–258.
5. Пятакович В. А. Система классификации морских целей на базе нейросетевых технологий // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4 (42). – Том 5. – С. 169–176.
6. Распознавание и классификация источников формирования полей различной физической природы в морской среде : монография / В. А. Пятакович, А. М. Василенко, О. В. Хотинский. – Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2017. – 255 с.

References

1. Neural network technologies in intelligent systems for detection and operational identification of maritime targets : monografiya / V. A. Pyatakovich, A. M. Vasilenko, O. V. Xotinskij. – Vladivostok : Morskoy gos. un-t im. G. I. Nevel'skogo, 2018. – 263 s.
2. Assessing the effectiveness of Navy situational lighting systems as information sources for an expert target classification system / V. A. Pyatakovich, A. M. Vasilenko, N. V. Pyatakovich // Problemy i metody razrabotki i ekspluatatsii vooruzheniya i voennoj texniki VMF : sb. statej. – Vladivo-stok: TOVVMU, 2018. – Vy`p. 96.– S. 309–316.
3. Pyatakovich V. A. Promising methods for solving the scientific problem of classifying targets using a neural network expert system when monitoring the maritime situation / V. A. Pyatakovich, A. M. Vasilenko, V. F. Ry`chkova // Morskie intellektual`ny`e texnologii. – 2018. – № 4 (42). – Tom 5. – S. 139–148.
4. Technology for creating an automated long-range reception system and neural network classification of hydrophysical fields of marine waters / V. A. Pyatakovich, A. M. Vasilenko, A. V. Filippova // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki. – Tula : Izd-vo TulGU, 2017. – Vy`p. 7. – S. 247–258.
5. Pyatakovich V. A. Naval target classification system based on neural network technologies // Morskie intellektual`ny`e texnologii. – 2018. – № 4 (42). – Tom 5. – S. 169–176.
6. Recognition and classification of sources of formation of fields of various physical natures in the marine environment: monografiya / V. A. Pyatakovich, A. M. Vasilenko, O. V. Xotinskij. – Vladivostok : Mor. gos. un-t, 2017. – 255 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Пятакович Валерий Александрович, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории. Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С. О. Макарова, 690062, Россия, г. Владивосток. Камский переулок, 6. e-mail: pva.877com@mail.ru

Valeriy A. Pyatakovich, Associate Professor, Ph.D. (Eng). Director of research Laboratory. Pacific Higher Naval College named after S. O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok. 690062. Russian Federation, e-mail: pva.877com@mail.ru

Василенко Анна Михайловна, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории. Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С. О. Макарова 690062, Россия, г. Владивосток, Камский переулок, 6. e-mail: kahunya@gmail.com

Anna M. Vasilenko Ph.D. (Eng). Researcher at the research laboratory. Pacific Higher Naval College named after S. O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok. 690062. Russian Federation, e-mail: kahunya@gmail.com

Рычкова Виктория Феликсовна, начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского, 690059, Россия, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а. e-mail: rychkova@msun.ru

Victoria F. Rychkova, Director of the Department of Research and Innovation Activities Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi. 50 – a, Verkhneportovaya st., Vladivostok. 690059. Russian Federation, e-mail: rychkova@msun.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 09.12.2023.

Научная статья

УДК 621.391

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.073>

Применение новых бинарных кодов для передачи данных в гидроакустических системах связи

Родионов А.Ю.¹ deodar1618@yandex.ru, Кирьянов А.В.² a.kiryanov@aquatele.com,

Кулик С.Ю.² info@aquatele.com, Михайленко О.С.^{2,3} os_mikhailenko@mail.ru

¹Дальневосточный федеральный университет, ²ООО «Аквателеком», ³ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет»

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы поиска двоичных псевдослучайных последовательностей с автокорреляционной функцией с минимальным уровнем боковых лепестков, предназначенных для использования в гидроакустических системах передачи информации и формирования помехозащищенных навигационных посылок. Предложен новый многопозиционный метод передачи информации на базе найденных последовательностей, обладающий повышенной помехозащищенностью в гидроакустических каналах связи с малым временем когерентности и со значительным уровнем фоновых стохастических помех. Приведено сравнение автокорреляционной функции длиной 15 элементов непериодической M-последовательности и нового кода. Представлены результаты экспериментов по передаче данных и измерению дальности на базе предложенных последовательностей и методов на гидроакустических модемах АТМ-28 разработки ООО «Аквателеком». Полученные результаты свидетельствуют о применимости предложенных подходов в система гидроакустической связи и подводной навигации.

Ключевые слова: гидроакустическая связь, подводная навигация, двоичные псевдослучайные последовательности

Для цитирования: Родионов А.Ю., Кирьянов А.В., Кулик С.Ю., Михайленко О.С. Применение новых бинарных кодов для передачи данных в гидроакустических системах связи, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 112—118. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.073

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.073>

Application of new binary codes for data transmission in hydroacoustic communication systems

Alexander Yu. Rodionov¹ deodar1618@yandex.ru, Alexei V. Kiryanov² a.kiryanov@aquatele.com,

Sergei Yu. Kulik² s.kulik@aquatele.com, Oleg S. Mikhailenko^{2,3} o.mikhailenko@aquatele.com

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, ² LLC "Aquatelecom", Vladivostok, Russian Federation, ³ Vladivostok State University (VVSU), Vladivostok, Russian Federation

Abstract. This article discusses the search for binary pseudo-random sequences with an autocorrelation function with a minimum level of side lobes, intended for use in hydroacoustic information transmission systems and the formation of noise-resistant navigation messages. A new multi-position method for transmitting information based on the found sequences has been proposed, which has increased noise immunity in hydroacoustic communication channels with a short coherence time and a significant level of background stochastic interference. A comparison is given of the autocorrelation function with a length of 15 elements of the non-periodic M-sequence and the new code. The results of experiments on data transmission and range measurement based on the proposed sequences and methods on ATM-28 hydroacoustic modems developed by Aquatelecom LLC are presented. The results obtained indicate the applicability of the proposed approaches to hydroacoustic communication and underwater navigation systems.

Key words: hydroacoustic communications, underwater navigation, binary pseudo-random sequences.

For citation: Alexander Yu. Rodionov, Alexei V. Kiryanov, Sergei Yu. Kulik, Oleg S. Mikhailenko o.mikhailenko@aquatele.com, Application of new binary codes for data transmission in hydroacoustic communication systems, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 3, P. 112—118. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.073

Введение

В связи с ростом популярности систем, использующих хаотические сигналы, актуально изучение функций, имеющих с ними интегральное соответствие, на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП) с наилучшими автокорреляционными свойствами. В соответствии с теоремой Винера–Хинчина сигналы с идеальной автокорреляционной функцией (АКФ) имеют наилучшие стохастические свойства. Подобные последовательности имеют широкое применение в

системах радиолокации, синхронизации, расширения спектра и т.п.

Учитывая большой интерес к представленной научной теме, встает вопрос о поиске и синтезе более длинных последовательностей, нежели те, что используются на сегодняшний день. Поиск оптимальных кодов большой длины методом простого перебора является весьма ресурсозатратной задачей. Все это приводит к необходимости создания других методов поиска, обеспечивающих заданный критерий оптимальности, но при этом содержащих меньшее количество

вычислительных операций, а следовательно, обладающих меньшим временем расчета. Далее рассмотрен один из способов оптимизации такого поиска.

1. Характеристики найденных бинарных кодов с наилучшими автокорреляционными свойствами по минимаксному критерию

Для количественного определения степени отличия сигнала $u(t)$ и его смещенной во времени копии $u(t-\tau)$ принято вводить АКФ сигнала $u(t)$:

$$B_u(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u(t-\tau)dt. \quad (1)$$

Для дискретного сигнала $u = \{u_0, u_1, \dots, u_{M-1}\}$ АКФ имеет следующий вид:

$$B_u(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} u_j u_{j-n}. \quad (2)$$

При синтезе оптимальных дискретных сигналов принято использовать минимаксный критерий: оптимальным считается сигнал с наименьшим уровнем наибольшего из боковых лепестков АКФ. Такой критерий отвечает существу проблемы [1].

Дискретные сигналы с наилучшей структурой АКФ являются объектом интенсивных исследований. Среди них большую известность получили сигналы Баркера. Эти сигналы обладают уникальным свойством: при всех $n \neq 0$ значения их боковых лепестков АКФ не превышают единицы. Установлено, что не существует сигналов Баркера с числом элементов, большим 13.

Поиск кодов большой длины методом простого перебора вариантов оказывается весьма громоздким и является проблемой даже для современных вычислительных мощностей [2]. Между тем имеется явная тенденция применять сигналы с все большей размерностью, и это оправдывает поиск других методов синтеза, не связанных с подобными трудностями.

Частота повторений RLE-блоков (Run-Length Encoding, кодирование длин серий) бинарных последовательностей напрямую связана со стохастическими свойствами кода и в дальнейшем коллективом были найдены последовательности, полученные с помощью разработанного программного приложения. При кодировании длин серий кодовая последовательность разбивается на блоки, состоящие из идущих подряд одинаковых элементов кода. Код при этом записывается как последовательность длин этих блоков. Таким образом, если рассмотреть известную бинарную последовательность Баркера длиной 13 – (1111100110101), то запись ее в формате RLE выглядит как (5221111), количество анализируемых RLE-блоков составит 7, а число уникальных блоков – 3.

Анализ сигнатур найденных кодов показал характерное количество RLE-блоков, из которых были рассчитаны доли от общей длины кода. Это хорошо согласуется с теоремой Винера–Хинчина, так как конкретные RLE-блоки отвечают за нахождение определенных частот внутри кода, а неравномерность количества элементов в разных блоках показывает равномерность спектральной плотности кода. Существуют три основных свойства любой двоичной псевдослучайной

последовательности, которые могут быть использованы в качестве проверки на случайность. Это сбалансированность, цикличность и корреляция. Циклом (группой) называется непрерывная последовательность одинаковых двоичных чисел. Появление одной двоичной цифры автоматически начинает новый цикл. Длина группы равна количеству цифр в нем. Желательно, чтобы в каждом фрагменте последовательности приблизительно половину составляли циклы обоих типов длиной 1, приблизительно одну четверть – длиной 2, приблизительно одну восьмую – длиной 3 и т.д. [3]. Таким образом, доля содержания конкретной группы в рассматриваемом коде определяется выражением:

$$p_i = 2^{-i}, \quad (3)$$

где i – длина группы. В результате проведенного исследования синтезированных сигнатур кодов по полученной базе длиной до 28 элементов вышеупомянутое распределение доли содержания группы ближе к зависимости:

$$p_i = 2^{-i-1}. \quad (4)$$

Распределение долей RLE-блоков в коде имеет медианный характер, так как сумма RLE-блоков в заданной пропорции не равна длине кода. Необходимую длину кода дополняют отклоненные от медианного значения RLE-блоки большой длины. В действительности эти отклонения незначительно будут влиять на время расчета кода необходимой длины. Алгоритм расчета подобных кодов предполагает рекуррентный анализ вновь найденных кодов для обновления значений распределения RLE-элементов в кодах. Количество RLE-элементов большой длины для найденных кодов имеет стохастический характер в пределах определенных чисел, в то время как число RLE-блоков малой длины имеют характерную линейную зависимость от длины кода, с распределением (4). С увеличением длины кода RLE-элементы большой длины также начинают подчиняться распределению (4). Это предполагает сокращение времени расчета кодов, в отличие от метода простого перебора, в котором время расчета имеет степенную зависимость от длины кода. Равномерность спектральной плотности кода – главное условие для получения минимального значения уровня боковых лепестков (УБЛ) его АКФ. В результате поиска всех существующих последовательностей по заданным критериям длиной до 52 элементов посредством разработанного алгоритма перебора было обнаружены семейства кодов, с учетом зеркальности и инверсных последовательностей. К примеру, один из кодов длиной 24 элемента будет иметь вид 000000001110010101100100. В современных системах радиоэлектроники широко применяются псевдослучайные последовательности, сформированные по определенным правилам, например, М-последовательности, Де Брейна, последовательности Гордона–Милса–Велча (GMW) [4]. Однако их длина зависит от степени 2, что существенно ограничивает выбор длины кода. При этом значения УБЛ АКФ с ростом длины последовательности уступают аналогичным показателям предложенных кодов (табл. 1).

Таблица 1
Выборочное сравнение последовательностей по максимальному УБЛ АКФ

Последовательности	Максимальное значение УБЛ АКФ при длине последовательности					
	15	16	17	31	32	33
М-последовательности	3	–	–	4	–	–
Последовательности Де Брейна	–	3	–	–	4	–
GMW-последовательности	–	–	3	–	–	6
Найденные коды	2	2	2	3	3	3

В результате поиска оптимальных двоичных последовательностей с размерностью, большей 13, были обнаружены коды, превосходящие по минимаксному критерию АКФ все известные кодовые последовательности длиной до 52 элементов. Выявлена тенденция к периодическому появлению кодов с лучшим отношением пика АКФ к УБЛ, что говорит об актуальности дальнейшего поиска более длинных кодов. Пример АКФ двух кодовых

последовательностей длиной 15 элементов: непериодической М-последовательности 011010111000110 (синий) и нового кода 000001110011010 (красный) представлен на рис. 1. Была выбрана М-последовательность с УБЛ равным 4, в то время как у найденных кодов УБЛ не превышает значений 2 при максимальном пике АКФ равным 15.

Анализ частоты повторений RLE-блоков в найденных семействах бинарных кодов позволил выявить закономерности распределения количества блоков в зависимости от длины кода по соотношению (4). Данные закономерности в дальнейшем позволят сузить область поиска оптимальных кодов при решении задач по синтезу и оптимизации структуры сложных сигналов. Получены оптимальные последовательности размерностью до 52 элементов, для них проведен анализ кодирования длин серий (рис. 2).

Выявлены закономерности в распределении количества серий различной длины в кодах, оптимальных по выбранному критерию, что в дальнейшем позволит оптимизировать процесс поиска таких кодов.

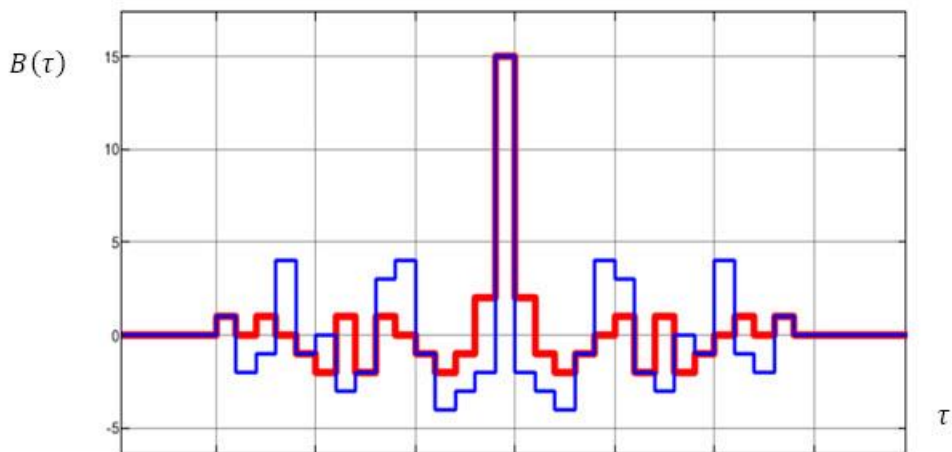


Рис. 1 Сравнение АКФ двух кодовых последовательностей длиной 15 элементов: непериодической М-последовательности 011010111000110 (синий) и нового кода 000001110011010 (красный)

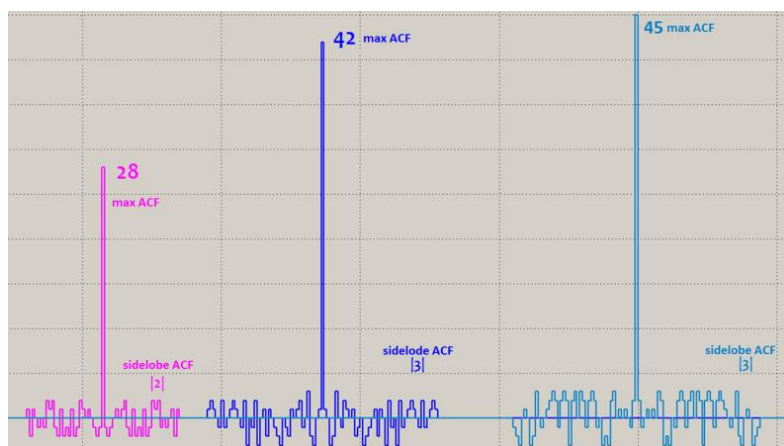


Рис. 2 Примеры автокорреляционных функций для найденных кодов длиной 28, 42 и 45 элементов

2. Метод передачи цифровых данных и навигационных сигналов на основе предложенных новых псевдослучайных последовательностей. Аналитические оценки пропускной способности

Для передачи данных и решения навигационной задачи под водой для автономных/телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов при помощи средств гидроакустической связи методами сигнальной обработки в физическом протоколе передачи данных необходимо обеспечить возможности: 1) формирования на излучателе шумоподобных сигналов с хорошими автокорреляционными свойствами, 2) их надежного детектирования на приемной стороне с помощью согласованной фильтрации и 3) точного определения момента их прихода.

В современных системах связи для создания шумоподобных сигналов широкое применение получили именно псевдослучайные последовательности (ПСП), сложности использования коротких импульсных сигналов для оценки параметров канала связаны с высокой пиковой мощностью и присутствием аналогичных стохастических импульсных помех в подводном гидроакустическом канале, порождаемых биологическими объектами и волнением моря. Также использование ПСП в гидроакустическом канале связи является эффективным и зачастую единственным средством для реализации сверхдальней связи, ввиду ограничений, связанных с излучаемой мощностью [5]. Недостатком использования такого метода является значительное снижение скорости передачи информации.

Основным способом увеличения пропускной способности для подобных широкополосных систем (ШПЦ/DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum), использующих ПСП, является увеличение сигнального пространства кодов. Нарастивание количества K кодов позволяет увеличить скорость в $\log_2 2K$ раз. Формирование сигнального пространства требует тщательного выбора кодов с минимальными значениями взаимно-корреляционных функций (ВКФ) из набора кодов с лучшими значениями автокорреляционных функций (АКФ). В рамках данного подхода на приемной стороне необходимо организовать параллельную работу K согласованных фильтров, адаптированных под выбранные ПСП. Зачастую, на практике каждый из K согласованных фильтров реализуется дополнительно в N модификациях, настраивающих каждый коррелятор на N частотных каналов, соответствующих различным возможным доплеровским сдвигам частот сигналов. При значительных длинах L выбранных кодов вычислительная нагрузка на приемной стороне получается значительной, что может снижать энергетическую эффективность модема. Однако, даже при оптимальном выборе ПСП возможны ситуации, когда импульсная характеристика ГА линии связи имеет значительное временное рассеяние при мощных амплитудах отраженных лучей. Тогда помимо проявления данного явления на основном корреляторе, на параллельных согласованных фильтрах может выполняться свертка ВКФ с импульсной характеристикой канала,

результат которой может дать сигнал, соизмеримый по уровню с сигналом на основном корреляторе, и приводить к неоднозначности в принятии решения и возникновению ошибок.

Хорошую устойчивость к нестационарности многолучевого канала и внешним импульсным помехам показали некогерентные дифференциальные методы приема с использованием ПСП [6,7]. Малое время когерентности характерное для динамических гидроакустических сред распространения значительно снижает эффективность когерентных методов передачи цифровых сигналов.

Для достижения приемлемых значений скорости информационного обмена без применения большого количества параллельно работающих корреляторов в данной работе рассматривается использование дополнительной временной сдвиговой манипуляции для ранее полученных уникальных ПСП [6]. Лучшее соотношение максимума АКФ к уровню боковых лепестков у найденных кодов по сравнению с известными кодами позволяет получить более точные оценки импульсной характеристики канала. Относительно небольшая длина кодов также позволяет достичь хороших характеристик по пропускной способности в семействе гидроакустических систем связи.

$$s(t) = \left[\pm s_{L \text{ code}} \left(t - \frac{t\tau_0}{2} \right) \right]_{DBPSK} \cdot \sin \left(2\pi f_0 \left[t - \frac{t\tau_0}{2} \right] \right), \quad (5)$$

где τ_0 – длительность символа, $\tau_0 = 2/\Delta F$, ΔF – полоса пропускания антенной системы, l – номер позиции временной манипуляции кода, $l \in [0..M-1]$. M – количество временных позиций ПСП кода длиной L .

Пропускная способность f_b (бит/с):

$$f_b = \frac{\log_2(4[k+1])}{\tau_0(L+1+k+g)} = \frac{\log_2(2M)}{\tau_0(L+M/2+g)}, \quad (6)$$

где g – количество занимаемых символов под величину защитного интервала τ_{guard} ,

$$g = \tau_{guard}/\tau_0.$$

Сигнал излучается в линию связи в формате длина кода + интервал для сдвиговой манипуляции + защитный интервал, где защитный интервал τ_{guard} , равен времени реверберации сигнала в ГА канале связи.

Морской эксперимент. Осенью 2023 года были проведены натурные эксперименты на оборудовании компании ООО «Аквателеком» для оценки эффективности разработанного метода. Целью проведенных экспериментов была оценка достижимой дальности передачи сигнала на частоте 28 кГц в полосе от 24 до 32 кГц в условиях дрейфа точек излучателя и приемника, оценка скорости информационного обмена на различных дистанциях в акватории с активным судоходством. Новые коды использовались в качестве ПСП, выполняющих задачу синхронизации и передачи информационных последовательностей в рассматриваемых ниже морских экспериментах. Эксперимент проводился в акватории с глубиной до 25 м. Использовались две гидроакустические антенны с рабочей центральной частотой 28 кГц (чувствительность антенн в режиме излучения и приема 6 Па/В и 200 мкВ/Па, соответственно), заглубление антенн от поверхности составляло 5-7 м. Условия приема

гидроакустического сигнала осложнялись проходящими на расстояниях 1-2 км большегрузными судами, верхние частоты спектра создаваемых помех достигали рабочей полосы используемой системы связи, что позволило оценить применимость метода в условиях со значительным уровнем импульсных помех.

Целью экспериментов была оценка технических характеристик гидроакустических модемов ATM-28 для измерения дистанции в осенних гидролого-акустических условиях залива Петра Великого Японского моря. К основным задачам морских тестов можно отнести - проведение экспериментальных исследований для определения дальности устойчивой связи при различных скоростях передачи данных, определение максимальной дальности связи для гидроакустических модемов в текущих условиях, проведение циклических измерений дистанции для подводной навигации.

Проводились измерения расстояний между модемами в асинхронном режиме («запрос-ответ») на различных скоростях передачи данных (mode 6 – 83 бит/с, mode 0 – 500 бит/с, mode 9 – 800 бит/с). В ходе эксперимента использовались два маломерных судна, одно фиксировалось на якорю вблизи берега при глубине места 22 м, второе – отходило на расстояние до 2050 м в сторону полуострова Песчаный с глубинами места до 25 м.

Волнение моря в день проведения эксперимента достигало 2 баллов, дул ветер южного направления средней интенсивности. Дрейф второго судна достигал 2 км/ч (0,55 м/с), определялся периодическими измерениями по навигатору GPS на втором судне. Модемы заглублялись до 5-7 м глубины и свободно дрейфовали в толще воды вместе с судами. Капитаном второго судна определялись координаты первого фиксированного судна и собственные координаты. При получении посылок оператором гидроакустической связи (находился на втором судне) информации о дистанции между модемами, капитаном второго подвижного судна дистанция подтверждалась с погрешностью не более 10 м, что соответствует инструментальной погрешности GPS-приемника. В ранее проведенных морских экспериментах инструментальная точность измерения дистанции достигала 1,5 см при использовании гидроакустических модемов, метрологическая точность экспериментов обеспечивалась используемой системой DGPS.

На рисунке 3 представлены модемы, используемые в эксперименте, настройка модемов выполнялась по Ethernet через веб-браузер. По умолчанию устанавливались адреса 192.168.0.101 и 192.168.0.102 у первого и второго устройства соответственно. На стартовой странице прописаны все параметры модема. Адреса модемов устанавливались 1 и 2 соответственно, для обоих устройств выбирались одинаковые скоростные режимы. При проведении экспериментов были заглушены двигатели судов и убраны посторонние шумы. Модем со второго судна выполнял запрос до первого судна, модем с первого судна отвечал обратно, и, определяя время распространения сигнала, вычислялась дистанция. Одновременно в навигационных пакетах передавалась информация об адресах устройств на скоростях передачи данных

83/500/800 бит/с, устанавливаемая пробно в разные временные отрезки эксперимента.

На вкладке «Тест связи» выбирался «Автоматический опрос дальности» с интервалом опроса 2 секунды на малых и 5 секунд на больших дистанциях. На вкладке «Тест связи» отслеживались обновляемые данные об измеренных дистанциях. Во вкладке «Системный журнал» отслеживалось состояние переданных пакетов и сохранение информации в лог.



Рис. 3 Гидроакустические модемы ООО «Аквателеком» ATM-28 (частотный диапазон 24-32 кГц)

Ниже представлен фрагмент измерения дистанции 1706.855 м на скорости передачи данных 83 бит/с. Цикл опроса: 5 секунд. Время по Владивостоку 14:21:22 во время проведения эксперимента.

```
04:21:22 2023 ANSWER DISTANCE: 1706.855347 TO:
1 FROM: 2
04:21:24 2023 S_TXCOMPLETE TO: 2 FROM: 1
04:21:27 2023 ANSWER DISTANCE: 1709.132202 TO:
1 FROM: 2
04:21:29 2023 S_TXCOMPLETE TO: 2 FROM: 1
04:21:30 2023 S_WRONG_PARITY TO: 15 FROM: 2
04:21:32 2023 ANSWER DISTANCE: 1711.380615 TO:
1 FROM: 2
04:21:34 2023 S_TXCOMPLETE TO: 2 FROM: 1
04:21:37 2023 ANSWER DISTANCE: 1713.492310 TO:
1 FROM: 2
04:21:39 2023 S_TXCOMPLETE TO: 2 FROM: 1
04:21:42 2023 ANSWER DISTANCE: 1715.630615 TO:
1 FROM: 2
04:21:44 2023 S_TXCOMPLETE TO: 2 FROM: 1
04:21:47 2023 ANSWER DISTANCE: 1717.963135 TO:
1 FROM: 2
04:21:49 2023 S_TXCOMPLETE TO: 2 FROM: 1
04:21:52 2023 ANSWER DISTANCE: 1720.350464 TO:
1 FROM: 2
```

Заключение

В данной статье было представлено описание гидроакустической системы связи, реализующей методы расширения спектра ПСП с дополнительной сдвиговой манипуляцией во временной области при устойчивости работы в условиях шельфа при высоком уровне шумов в акватории.

В ходе экспериментов была подтверждена устойчивая связь с использованием гидроакустических модемов ATM-28 на дальностях до 1706,855 м включительно, скорость передачи данных варьировалась от 83 до 800 бит/с. Максимальная дальность связи составляла 2043,285 м при скорости 83 бит/с. Полученные результаты соответствуют расчетным значениям оптимальной дистанции до 1500 м для рабочих частот гидроакустических модемов ATM-28, при

максимальной дальности действия 3400 м в ранее проведенных экспериментах.

Литература

1. Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб., изд. Наука и техника, 2005. 400 с.
2. Чусов А.А. Параллельный поиск сигналов с заданными взаимно и автокорреляционными свойствами на многопроцессорных платформах / А. А. Чусов, А. А. Ковылин, Л. Г. Стаценко, Ю. В. Миргородская // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54. – № 8. – С. 29-35.
3. Скляр Б. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. – 2-е изд., испр. – М.: Вильямс, 2004. – 1104 с.
4. Golomb S.W., Gong G. Signal design for good correlation for wireless communication, cryptography and radar. – US: Cambridge University Press, 2005. – 438 p.
5. Bezotvetnykh, V. V., Burenin, A. V., Morgunov, Y. N., & Strobyskin, D. S. (2012). Specificities of applying pseudorandom sound signals to measuring impulse responses on the shelf of the Sea of Japan. *Acoustical Physics*, 58(1), 125-128.
6. Rodionov, A. Y. Some trial results of the hydro acoustical communication system operation for AUV and ASV group control and navigation / A. Y. Rodionov, S. Y. Kulik, P. P. Unru // OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, OCE 2016, Monterey, CA, 19–23 сентября 2016 года. – Monterey, CA, 2016. – P. 7761076. – DOI 10.1109/OCEANS.2016.7761076.
7. Kamerman A., Krishnakumar A. OFDM encoding with reduced crestfactor // Symp. On Comm. & Vehicular Tecnology in the Benelux, Louvain-La-Neuve, Belgium. – 1994. P. 182-186.

References

8. Gantmaher V.E., Bystrov N.E., Chebotarev D.V. Shumopodobnye signaly. Analiz, sintez, obrabotka [Noise-like signals. Analysis, synthesis, processing]. SPb., izd. Nauka i tehnika, 2005. 400 s.
9. Chusov A.A. Parallel'nyj poisk signalov s zadannymi vzaimno i avtokorreljacionnymi svojstvami na mnogoprocessornyh platformah [Parallel search for signals with specified mutual and autocorrelation properties on multiprocessor platforms] / A. A. Chusov, A. A. Kovylin, L. G. Stacenko, Ju. V. Mirgorodskaja // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radiojelektronika. – 2011. – Т. 54. – № 8. – S. 29-35.
10. Skljjar B. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie [Theoretical foundations and practical application]: Per. s angl. – 2-e izd., ispr. – M.: Vil'jams, 2004. – 1104 s.
11. Golomb S.W., Gong G. Signal design for good correlation for wireless communication, cryptography and radar. – US: Cambridge University Press, 2005. – 438 p.
12. Bezotvetnykh, V. V., Burenin, A. V., Morgunov, Y. N., & Strobyskin, D. S. (2012). Specificities of applying pseudorandom sound signals to measuring impulse responses on the shelf of the Sea of Japan. *Acoustical Physics*, 58(1), 125-128.
13. Rodionov, A. Y. Some trial results of the hydro acoustical communication system operation for AUV and ASV group control and navigation / A. Y. Rodionov, S. Y. Kulik, P. P. Unru // OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, OCE 2016, Monterey, CA, 19–23 сентября 2016 года. – Monterey, CA, 2016. – P. 7761076. – DOI 10.1109/OCEANS.2016.7761076.
14. Kamerman A., Krishnakumar A. OFDM encoding with reduced crestfactor // Symp. On Comm. & Vehicular Tecnology in the Benelux, Louvain-La-Neuve, Belgium. – 1994. P. 182-186.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Родионов Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор Департамента электроники, телекоммуникации и приборостроения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: deodar1618@yandex.ru

Alexander Yu. Rodionov, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Electronics, Telecommunications and Instrumentation, Far Eastern Federal University, 690922, Vladivostok, o. Russian, p. Ajax, 10, e-mail: deodar1618@yandex.ru

Кириянов Алексей Валерьевич, генеральный директор ООО «Аквателеком», 690068, Приморский край, г. Владивосток, ул. Чкалова, д. 10, кв. 28, e-mail: a.kiryanov@aquatele.com

Alexei V. Kiryanov, Ph.D. (Eng), General Director of Aquatelecom LLC, 690068, Vladivostok, st. Chkalova, 10, apt. 28, e-mail: a.kiryanov@aquatele.com

Кулик Сергей Юрьевич, инженер-программист ООО «Аквателеком», 690068, Приморский край, г. Владивосток, ул. Чкалова, д. 10, кв. 28, e-mail: info@aquatele.com

Sergei Yu. Kulik, software engineer at Aquatelecom LLC, 690068, Vladivostok, st. Chkalova, 10, apt. 28, e-mail: info@aquatele.com

Михайленко Олег Сергеевич, инженер, Владивостокский государственный университет (ФГБОУ ВО «ВВГУ»), Российская Федерация, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: os_mikhailenko@mail.ru

Oleg S. Mikhailenko, engineer, Vladivostok State University (VVSU), Gogolya, 41 St. Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: os_mikhailenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.12.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 12.12.2023.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3
e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи в WORD и PDF, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта и инструкция размещены на сайте www.morintex.ru
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор в WORD.

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».

На страницах журнала публикуются НОВЫЕ научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации 18000 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А. Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**

Скорородов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанный на дифференциальных уравнениях и передаточных функциях, способствующих физическому пониманию процессов, происходящих в системах автоматического управления, для дальнейшего усвоения особенностей применения матричных уравнений для исследования устойчивости и качества современных цифровых систем автоматического управления.

Есть в продаже: **цена 1800 руб. + пересылка**