

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ISSN 1992-4429

ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА

2021

Глубины океана ~ наша гигантская лаборатория

№ 1 (35)

UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ О ПРОБЛЕМАХ ОСВОЕНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА





РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

БОБКОВ

Валерий Александрович –

д.т.н., ФГБУН Институт автоматики
и процессов управления ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

ЗЛОБИНА

Надежда Владимировна –

д.т.н., ФГБУН Институт проблем
морских технологий ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

ИЛЛАРИОНОВ

Геннадий Юрьевич –

д.т.н., ФГБУН Институт
проблем морских технологий ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

ИНЗАРЦЕВ

Александр Вячеславович –

д.т.н., ФГБУН Институт проблем морских
технологий ДВО РАН, г. Владивосток,
Российская Федерация

КАСАТКИН

Борис Анатольевич –

д.ф.-м.н., ФГБУН Институт проблем
морских технологий ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

МАТВИЕНКО

Юрий Викторович –

д.т.н., ФГБУН Институт проблем
морских технологий ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

МОРГУНОВ

Юрий Николаевич –

д.т.н., ФГБУН Тихоокеанский океанологический
институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

ОБЖИРОВ

Анатолий Иванович –

д.г.-м.н., профессор, ФГБУН Тихоокеанский
океанологический институт им. В.И. Ильичева
ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

АКУЛИЧЕВ

Виктор Анатольевич –

академик РАН, профессор, ФГБУН Тихоокеанский
океанологический институт им. В.И. Ильичева
ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

БЫЧКОВ

Игорь Вячеславович –

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

ВАСИЛЬЕВ

Станислав Николаевич –

академик РАН, профессор, ФГБУН Институт проблем
управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
Российская Федерация

ВЕЛЬТИЦЕВ

Вадим Викторович –

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

ДОЛГИХ

Григорий Иванович –

академик РАН, профессор, ФГБУН Тихоокеанский
океанологический институт им. В.И. Ильичева
ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

КАЛЯЕВ

Игорь Анатольевич –

академик РАН, НИИ МВС ЮФУ, г. Ростов-на Дону,
Российская Федерация

КЕБКАЛ

Константин Георгиевич –

д.т.н., EvoLogics GmbH, Berlin, Germany

КУЛЬЧИН

Юрий Николаевич –

академик РАН, ФГБУН Институт автоматики
и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток,
Российская Федерация

ПШИХОПОВ

Вячеслав Хасанович –

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

СЕЛЕЗНЕВ

Игорь Александрович –

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

СЕРГИЕНКО

Валентин Иванович –

академик РАН, профессор, Президиум ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

СТЕПАНОВ

Олег Андреевич –

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



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

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

ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА

UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS

№ 1 (35).2021

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
О ПРОБЛЕМАХ ОСВОЕНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
ABOUT EXPLORATION OCEAN PROBLEMS

Учредители и издатели:

Федеральное государственное
бюджетное учреждение
«Дальневосточное отделение
Российской академии наук»

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

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских
технологий Дальневосточного
отделения Российской
академии наук

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

Адрес редакции:

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

Издание зарегистрировано в Федеральной
службе по надзору в сфере связи, инфор-
мационных технологий и массовых ком-
муникаций (Роскомнадзор). Регистраци-
онное свидетельство: ПИ № ФС77-77237
от 25 ноября 2019 г.

Подписной индекс
в каталогах Роспечати 36087

Журнал входит в Перечень ведущих рецензи-
руемых журналов и изданий, в которых долж-
ны быть опубликованы основные научные
результаты диссертаций на соискание ученой
степени доктора и кандидата наук

© ДВО РАН, 2020
© ИПМТ ДВО РАН, 2020

Главный редактор

ЩЕРБАТЮК Александр Федорович –
чл.-корр. РАН, ФГБУН Институт проблем морских
технологий ДВО РАН, г. Владивосток,
Российская Федерация

Заместитель главного редактора

КИСЕЛЕВ Лев Владимирович – д.т.н.,
ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

Зав. редакцией, ответственный секретарь

МИРОМАНОВА Ирина Витальевна –
ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

Редактор *В.С. Жердев*

Дата выхода в свет 25.03.2021 г.

Бумага мелованная. Формат 60x90/8. Печать офсетная.
Усл. п. л. 10,8. Уч.-изд. л. 9,01. Тираж 200 экз. Заказ ИВ 210297.
Цена свободная

ИП Сердюк Оксана Александровна
690065, Владивосток, ул. Стрельникова, 12-87.
Тел. +79147102232. E-mail: oksanaserdiuk62@gmail.com

Отпечатано в ЗАО «ЛИТ»
г. Владивосток, ул. Комсомольская, 1в

SYSTEMS, TECHNOLOGIES AND EXPERIMENTS

- 4 **Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu.**
Control allocation approaches for over-actuated underwater vehicles: a brief review

MODELS, ALGORITHMS AND SOFTWARE

- 18 **Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V.**
Specific Features of a Hybrid Underwater Vehicle Motion Dynamic Model
- 31 **Bykova V.S., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V.**
The use of the autonomous underwater vehicle for navigating a ship through a mined area
- 41 **Sokolov A.Yu., Motorin A.V.**
Sea currents estimation methods for the dead reckoning

SEA TECHNOLOGY FACILITY AND METHODS OF UNDERWATER RESEARCH

- 51 **Fershalov M. Yu., Petrov P.S., Manulchev D.S., Zaharenko A.D.**
Generalization of the method for single-hydrophone geoacoustic inversion: application to a waveguide with inhomogeneous bottom relief
- 60 **Sokolova E.B., Mishukova G.I., Salyuk P.A., Shakirov R.B.**
Joint analysis of hydro-optical parameters and dissolved methane in water column of the Bering Sea and the eastern sector of the Arctic
- 70 **Kasatkin S.B.**
The estimation of the spatial frequency structure of the sound field in the shallow sea in the infrasonic frequency range

SHORT COMMUNICATIONS

- 80 **Makarov D.V., Alliluev A.D.**
On experimental determination of the acoustic wavefield propagator

UNDERWATER ROBOTICS NEWS

- 85 **Review by D.G. Lyakhov**

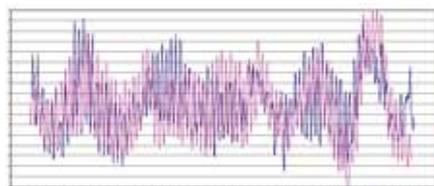


Стр. 21



3D-модель ГНПА

Стр. 44



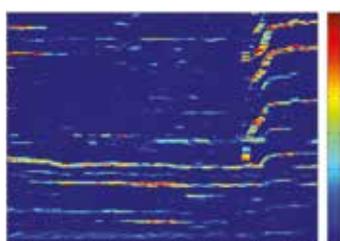
Зональная составляющая скорости течения

Стр. 54



Пневмоизлучатель

Стр. 72



Пример сонограммы звукового поля

СИСТЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

- 4 **Костенко В.В., Толстоногов А.Ю.**
Методы решения задачи распределения управляющих воздействий на исполнительные механизмы подводного аппарата: краткий обзор

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

- 18 **Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В.**
Особенности динамической модели пространственного движения гибридного необитаемого подводного аппарата
- 31 **Быкова В.С., Машошин А.И., Пашкевич И.В.**
Применение автономного необитаемого подводного аппарата для проводки судов через заминированный район
- 41 **Соколов А.Ю., Моторин А.В.**
Методы оценивания течений в задаче автономного навигационного счисления

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- 51 **Фершалов М.Ю., Петров П.С., Манульчев Д.С., Захаренко А.Д.**
Обобщение метода геоакустической инверсии по записи импульсного сигнала одиночным гидрофоном с учетом неоднородностей батиметрии
- 60 **Соколова Е.Б., Мишукова Г.И., Салюк П.А., Шакиров Р.Б.**
Совместный анализ вертикальных профилей гидрооптических параметров и концентрации растворенного метана в воде в Беринговом море и в восточном секторе арктики
- 70 **Касаткин С.Б.**
К оценке пространственно-частотной структуры звукового поля в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- 80 **Макаров Д.В., Аллилуев А.Д.**
Об экспериментальном определении пропагатора акустического поля

НОВОСТИ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

- 85 Обзор Д.Г. Ляхова

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОДВОДНОГО АППАРАТА: КРАТКИЙ ОБЗОР

В.В. Костенко, А.Ю. Толстоногов

Существуют различные подходы к постановке задачи управления движением необитаемого подводного аппарата. Подводный аппарат может быть рассмотрен как единый управляемый объект, включающий в себя как динамику твердого тела, так и динамику исполнительных механизмов. В то же время существуют подходы, в которых задача управления делится на две независимых: в первой решается задача управления движением, во второй решается задача распределения сформированных управляющих команд на исполнительные механизмы движительно-рулевого комплекса. В статье представлен обзор различных подходов к решению задачи распределения управляющих воздействий, сформированных системой управления движением подводного аппарата. Показаны различные подходы и методы решения задач для различных типов движительно-рулевых комплексов. Представлены примеры программных пакетов, позволяющих численно решать задачи распределения управляющих воздействий в формулировках квадратичной оптимизации и управления по прогнозирующим моделям. Приведены примеры еще не решенных задач, которые требуют дальнейших исследований.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, система управления движением, исполнительные механизмы, движительно-рулевой комплекс, управление по прогнозирующим моделям

Введение

Задача распределения управляющих воздействий (control allocation*) возникает естественным образом для избыточного (over-actuated) движительно-рулевого комплекса (ДРК) подводного аппарата (ПА), то есть такого ДРК, в котором исполнительных механизмов (ИМ) (рули управления, основные и подруливающие движители) больше, чем количество доступных для управления степеней свободы. Использование ДРК такого типа широко распространено по следующим причинам:

- ввиду того, что подводные операции сопряжены с высокой степенью риска, избыточность необходима для реализации функций резервирования систем управления движением подводного аппарата;
- в силу гидродинамических особенностей функ-

* Здесь и далее в скобках фигурирует терминология, наиболее часто встречающаяся в иностранных научных изданиях

ционирования при различных режимах движения (позиционный, крейсерский) часть исполнительных механизмов ДРК будет работать лучше или хуже; в соответствии с этим при разработке многоцелевых подводных аппаратов необходимо использовать избыточные комплекты ИМ [1];

- избыточная конфигурация ДРК при энергетически оптимальном распределении управляющего воздействия позволяет сократить затраты энергии на 20–25% по сравнению с эквивалентной неизбыточной конфигурацией [2].

Решение задачи распределения управляющих воздействий ДРК позволяет оптимизировать энергетические затраты на движение ПА, обеспечить отказоустойчивость системы управления и уменьшить механический износ ИМ в условиях накладываемых на них ограничений [3,4]. Исторически первой эта задача возникла в двух областях: для систем управления многостепенными манипуляторами [5] и самолётами [6]. Основной целью тогда было создание

систем аккомодации, то есть формирования такой системы управления движением, которая была бы устойчива к выходу из строя отдельных исполнительных механизмов.

В общем случае задача распределения управляющих воздействий для избыточных систем управления ведет к задаче численной оптимизации с линейными ограничениями, решение которой сложно реализовать для высокочастотных управляющих контуров в условиях операционных систем реального времени.

В настоящее время имеется достаточное количество обзорных статей в иностранной научной литературе, посвященных задаче распределения управляющих воздействий, включая как отдельные приложения – суда, подводные аппараты [7], летательные средства [8, 9], так и междисциплинарные [10]. В отечественной литературе такая постановка задачи обычно не выделяется в отдельный класс [11] и, например, задача аккомодации к отказам исполнительных механизмов решается на основании данных о параметрах движения объекта управления [12,13]. Впрочем, упоминание задачи распределения управляющих воздействий можно найти в отдельных статьях [14–16] и главах диссертации [17].

Целью данной статьи является литературный обзор существующих подходов в рамках задачи распределения управляющих воздействий с учетом научных достижений за последнее десятилетие в области подводной робототехники. Статья структурирована следующим образом. В разделе 1 приведены математическая формулировка задачи распределения управляющих воздействий и обоснование выделения её в отдельный класс задачи управления. Раздел 2 посвящён описанию динамической модели подводного аппарата, а также моделей, чаще всего встречающихся для ИМ ДРК. В разделе 3 представлен формализованный способ описания ДРК. В разделе 4 представлены существующие на данный момент методы решения задачи распределения управляющих воздействий. В разделе 5 приводятся ссылки на существующие в открытом доступе программные средства, позволяющие решать задачу в режиме реального времени.

1. Формулировка задачи распределения управляющих воздействий

Пусть динамика подводного аппарата, оснащенного избыточным ДРК, определена в формулировках метода пространства состояний следующим образом:

$$\dot{x}(t) = a(x(t)) + B_u(x(t))u(t), \quad (1)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния системы; $u \in U \subset \mathbb{R}^k$ – вектор управления исполнительными механизмами (control input), где подмножество U можно интерпретировать как ограничение величины команд управления, вызванное насыщением статической характеристики движителей, механическими ограничениями угла поворота рулей или иными особенностями ИМ; $a(x(t)): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ представляет собой гладкую нелинейную функцию, описывающую управляемую систему; матрица $B_u(x(t)) \in \mathbb{R}^{n \times k}$ определяет влияние вектора управления на состояние системы. Пусть ранг матрицы $B_u(x(t))$ равен m и он меньше, чем k , вследствие избыточности ДРК. Такая матрица является недоопределённой, а соответствующая ей система либо имеет бесконечное число линейно независимых решений по параметру u , либо не имеет решений вовсе. Матрица $B_u(x(t))$ может быть разложена следующим образом:

$$B_u(x) = B_v(x)B(x), \quad (2)$$

где обе матрицы $B_v(x) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ и $B(x) \in \mathbb{R}^{m \times k}$ обладают рангом m . Это ведёт к новому описанию динамической системы, которое может быть представлено следующим образом:

$$\dot{x}(t) = a(x(t)) + B_v(x(t))v(t), \quad (3)$$

$$v(t) = B(x(t))u(t), \quad (4)$$

где $v(t) \in A \subset \mathbb{R}^m$ можно интерпретировать как обобщенное действие всех исполнительных механизмов на объект управления или вектор виртуального управления (virtual input), а подмножество A получается аффинным преобразованием из подмножества U под действием матрицы $B(x)$.

Удобно раскладывать матрицу $B_u(x)$ таким образом, чтобы матрица $B_v(x)$ была квадратной ($m = n$). При этом матрица будет полноранговой, а решение уравнения для первой части системы единственным. В качестве вектора управления удобно использовать обобщенный вектор сил и моментов, действующих на объект управления в связанной с ним системе координат (ССК). При $n = 6$ его можно определить как $v = [f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z]^T$, где f_x, f_y, f_z – проекции сил, затребованных системой управления движением, на продольную поперечную и нормальную оси связанной с аппаратом системы координат, а m_x, m_y, m_z – соответствующие затребованные проекции моментов.

Тем не менее матрица $B(x)$ в случае избыточного ДРК остается недоопределённой. Фактически это ведет к тому что для вектора v , который был затребован системой управления, может быть неопределённое множество решений уравнения (4).

Задача поиска оптимального вектора управления движением может быть поставлена в рамках обоих вариантов описания системы, представленных выше. Пусть задача оптимального управления поставлена в рамках квадратичной оптимизации, тогда для описания (1) задача будет сформулирована следующим образом [18]:

$$\min_u \int_0^{\infty} [q(x) + u^T R_u(x)u] dt, \quad (5)$$

при условии $u \in U$,

где $q(x) \geq 0$, $R_u(x) = R_u^T(x) \geq 0$ – некоторые критерии оптимизации.

При этом описание (3)(4) естественным образом ведет к постановке двух независимых оптимизационных задач, которые могут быть записаны следующим образом:

$$\min_v \int_0^{\infty} [q(x) + v^T R_v(x)v] dt, \quad (6)$$

$$\min_{u \in \mathbb{R}^m, s \in \mathbb{R}^m} (\|Qs\| + J(x, u, t)), \quad (7)$$

при условии $v - B(x)u = s, u \in U$,

где $q(x) \geq 0$, $R_v(x) = R_v^T(x) \geq 0$, а s представляет собой невязку вектора виртуального управления, которая определяет меру различия между заданным и сформированным векторами управления, Q – матрица, формализующая приоритеты работы тех или иных осей управления при выходе вектора v за пределы допустимого множества A , а $J(x, u, t)$ – некоторый функционал качества.

В работе [18] показано, что оптимальность решения сохраняется при переходе от задачи оптимизации (5) к двум независимым задачам (6) и (7). При этом второй подход позволяет достичь следующих преимуществ:

- решение задачи оптимального управления (6) для нелинейных систем трудоемко и требует значительных численных расчётов, но при этом, в случае неизменного критерия оптимизации R_v и изменяющихся критериев оптимизации $J(x, u, t)$ и Q , нет необходимости заново получать решение уравнения (6);
- в первом подходе изменение параметров оптимизации R_u влияет как на изменение поведения системы в целом, так и на изменение распределения управляющих команд. Во втором случае задачи изолированы друг от друга и изменение R_v влияет только на поведение системы, не затрагивая работу ДРК;
- реализация системы управления движением может быть архитектурно разделена на два неза-

висимых уровня, и в рамках каждого из них могут быть применены различные подходы к решению. При этом важно, что задача управления движением подводного аппарата может быть полностью абстрагирована от структуры его ДРК, обеспечив единый и универсальный подход к разработке контура управления движением для произвольного типа ПА;

- ограничения, накладываемые на общую задачу оптимального управления (5), существенно усложняют её численное решение, особенно когда подмножество U является невыпуклым. При раздельном подходе можно решать задачу (6), условно считая задачу без ограничений, при этом накладывая ограничения только на более простую задачу (7), решение которой с учётом ограничений технически реализуемо современными вычислительными средствами в режиме реального времени;
- реализация раздельных уровней управления движением позволяет существенно упростить систему аккомодации за счет её переноса в область ответственности задачи распределения управляющих команд.

Отдельно стоит упомянуть случай при $k - n < 0$ для системы (1). Такой случай подразумевает, что исполнительных механизмов ДРК меньше, чем размерность вектора состояния системы, такие системы можно назвать дефицитными (under-actuated system), а соответствующая ей матрица B_u является переопределённой или плохо обусловленной. В этом случае задача распределения управляющего воздействия тесно связана с системой управления движением ПА и её сложно сформулировать обособленно. Отдельные примеры решения этой задачи для различных типов АНПА представлены в литературе [19, 20], но этот класс задач не является предметом обсуждения данной статьи.

2. Описание ПА как объекта управления

2.1. Модель динамики подводного аппарата

Полную динамику подводного аппарата при $n = 6$ в рамках изолированной задачи управления ПА по виртуальному вектору управления v можно описать следующей системой уравнений [21]:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v, \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = v. \end{cases}$$

В первом уравнении в качестве вектора состояния используется положение ПА в некото-

рой инерциальной системе координат (ИСК) $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T \in \mathbb{R}^6$, где первые три компоненты вектора определяют линейное смещение положения относительно начала отсчета, а вторая тройка определяет ориентацию тела, выраженную в углах Эйлера, $v = [u, v, w, p, q, r]^T \in \mathbb{R}^6$ описывает движение АНПА в ССК, матрица $J \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ определяет кинематические соотношения при переходе от ССК к ИСК.

Во втором уравнении в качестве вектора состояния используется скорость аппарата v в ССК, $M \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ – матрица инерции НПА, $C(v) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ – матрица кориолисовых и центробежных сил, $D(v) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ – матрица гидродинамических сил и моментов, а $g(\eta)$ – вектор гидростатических сил и моментов.

2.2. Модель исполнительных механизмов ДРК

Исполнительные элементы ДРК определяют эффективность траекторного маневрирования НПА, а также возможность его динамического позиционирования в точке или зависания в толще воды. На практике используются различные конструктивные схемы ДРК, в состав которых могут входить маршевые и подруливающие движители, носовые и кормовые рулевые устройства. Наиболее распространенными типами движителей являются гребные винты в насадке и водометные движители, которые могут устанавливаться стационарно на корпусе аппарата или на поворотных кронштейнах, которые поворачиваются на требуемый угол в плоскости или пространстве для изменения направления действия силы тяги. При этом использование водометных движителей ограничено их сравнительно низким КПД (0.5–0.55) по сравнению с гребными винтами, у которых он может достигать значений 0.7–0.75 [22–25]. Гораздо меньший КПД имеют такие экзотические движительные установки, как крыльчатые, волновые или машущие.

Рулевые устройства, использующие гидродинамические крылья в качестве исполнительного органа, как известно, имеют низкую эффективность при малых скоростях набегающего потока [23, 24]. При этом на крейсерских скоростях движения использование носовых и кормовых рулей направления и глубины имеет очевидное преимущество по сравнению с подруливающими движителями в части энергопотребления. Остановимся на традиционных исполнительных элементах ДРК многофункционального НПА, обеспечивающего выполнение обзорно-поисковых работ с движением в широком диапазоне скоростей хода и динамическое позиционирование в толще воды.

Маршевые движители (МД). Это один или несколько кормовых движителей, обеспечивающих

продольное движение аппарата, а также возможность маневрирования по глубине и курсу. Основные параметры статической характеристики гребного винта (ГВ) маршевого движителя соответствуют следующим соотношениям [24,25]:

$$\tau_{\text{мд}} = K_t(\lambda_p) \cdot \rho \cdot g \cdot n_s^2 \cdot D^4, \quad (8)$$

где $\tau_{\text{мд}}$ – упор маршевого движителя, Н; $K_t(\lambda_p)$ – безразмерные коэффициенты тяги и момента ГВ соответственно; $\lambda_p = V(n_s \cdot D)^{-1}$ – относительная поступь ГВ; n_s – частота вращения ГВ, об/с; D – диаметр ГВ, м; V – скорость хода аппарата, м/с; ρ – массовая плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Управляющая сила, соответствующая упору маршевого движителя, может быть записана в следующем виде [7]:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{мд}} &= K_{\text{мд}} \cdot u_{\text{мд}}, \\ K_{\text{мд}} &= K_t(\lambda) \cdot \rho \cdot g \cdot D^4, \\ u_{\text{мд}} &= n_s |n_s|; \end{aligned} \quad (9)$$

где $K_{\text{мд}}$ – коэффициент управляющей силы маршевого движителя, $u_{\text{мд}}$ – управляющая команда маршевого движителя. При этом выбор команды управления МД $u_{\text{мд}} = n_s |n_s|$ будет соответствовать частоте вращения движителя $n_s = \text{sign}(u_{\text{мд}}) \sqrt{|u_{\text{мд}}|}$.

Подруливающие движители (ПД). В составе ДРК подводных аппаратов, как правило, используются группы вертикальных и горизонтальных ПД, которые обеспечивают формирование управляющих сил и моментов при динамическом позиционировании аппарата в толще воды с компенсацией течения и других силовых и моментных возмущений. Тяговые характеристики ГВ ПД зависят от параметров поперечного набегающего потока, вызванного ходом аппарата, и определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{вд}} &= K_t^{\text{вд}}(V, v_k, \alpha) \cdot \rho \cdot g \cdot n_{\text{св}}^2 \cdot D^4, \\ \tau_{\text{гд}} &= K_t^{\text{гд}}(V, v_k, \beta) \cdot \rho \cdot g \cdot n_{\text{ст}}^2 \cdot D^4; \end{aligned} \quad (10)$$

где $\tau_{\text{вд}}, \tau_{\text{гд}}$ – упор вертикального и горизонтального ПД соответственно, Н; $K_t^{\text{вд}}, K_t^{\text{гд}}$ – безразмерные коэффициенты ослабления тяги вертикального и горизонтального ПД в зависимости от результирующей скорости движения аппарата V соответственно; $n_{\text{св}}, n_{\text{ст}}$ – частоты вращения ГВ ПД, об/с; v_k – скорость потока в канале ПД, м/с; α, β – угол атаки и дрейфа соответственно.

По аналогии с (9) управляющие силы, соответствующие упорам подруливающих движителей, могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\tau_{\text{вд}} &= K_{\text{вд}} \cdot u_{\text{вд}}, \quad \tau_{\text{гд}} = K_{\text{гд}} \cdot u_{\text{гд}}; \\
K_{\text{вд}} &= K_t^{\text{вд}}(V, v_k, \alpha) \cdot \rho \cdot g \cdot D^4, \\
K_{\text{гд}} &= K_t^{\text{гд}}(V, v_k, \beta) \cdot \rho \cdot g \cdot D^4; \\
u_{\text{вд}} &= n_{\text{св}} |n_{\text{св}}|, \quad u_{\text{гд}} = n_{\text{ст}} |n_{\text{ст}}|,
\end{aligned} \quad (11)$$

где $K_{\text{вд}}, K_{\text{гд}}$ – коэффициенты управляющих сил ПД, $u_{\text{вд}}, u_{\text{гд}}$ – управляющие команды ПД.

Рулевые устройства (РУ). Традиционным конструктивным и эксплуатационным решением РУ является использование кормовых рулей и элеронов, хотя при малых скоростях движения находят применение и дополнительные рули глубины. Управляющие моменты рулей являются функцией угла перекладки и скорости набегающего потока, при этом дополнительные силы лобового сопротивления не учитываются при анализе управления. Модель РУ определяется следующими соотношениями [26]:

$$\begin{aligned}
M_x^{\text{py}} &= m_x^\delta \cdot \delta_\theta \frac{\rho V^2}{2} U, \quad M_y^{\text{py}} = m_y^\delta \cdot \delta_\phi \frac{\rho V^2}{2} U, \\
M_z^{\text{py}} &= m_z^\delta \cdot \delta_H \frac{\rho V^2}{2} U;
\end{aligned} \quad (12)$$

где $M_x^{\text{py}}, M_y^{\text{py}}, M_z^{\text{py}}$ – управляющие моменты РУ по крену, курсу и дифференту соответственно; $m_x^\delta, m_y^\delta, m_z^\delta$ – производные гидродинамических характеристик от перекладки рулей крена, направления и глубины соответственно; $\delta_\theta, \delta_\phi, \delta_H$ – углы перекладки рулей крена, направления и глубины соответственно; U – водоизмещение аппарата, м^3 .

Управляющие моменты РУ можно представить следующими функциями от углов перекладки:

$$\begin{aligned}
M_x^{\text{py}} &= K_x^{\text{py}} \cdot \delta_\theta, \quad M_y^{\text{py}} = K_y^{\text{py}} \cdot \delta_\phi, \quad M_z^{\text{py}} = K_z^{\text{py}} \cdot \delta_H; \\
K_x^{\text{py}} &= m_x^\delta \frac{\rho V^2}{2} U, \quad K_y^{\text{py}} = m_y^\delta \frac{\rho V^2}{2} U, \quad K_z^{\text{py}} = m_z^\delta \frac{\rho V^2}{2} U,
\end{aligned} \quad (13)$$

где $K_x^{\text{py}}, K_y^{\text{py}}, K_z^{\text{py}}$ – коэффициенты управляющих моментов рулей крена, направления и глубины соответственно.

3. Описание движительно-рулевого комплекса НПА

Пусть движительно-рулевой комплекс подводного аппарата оснащён k движителями, тогда уравнение (4) для вектора виртуального управления v при $n = 6$ может быть записано следующим образом [27]

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x^1 & C_x^2 & \dots & C_x^k \\ C_y^1 & C_y^2 & \dots & C_y^k \\ C_z^1 & C_z^2 & \dots & C_z^k \\ [C^1 \times P^1]_x & [C^2 \times P^2]_x & \dots & [C^k \times P^k]_x \\ [C^1 \times P^1]_y & [C^2 \times P^2]_y & \dots & [C^k \times P^k]_y \\ [C^1 \times P^1]_z & [C^2 \times P^2]_z & \dots & [C^k \times P^k]_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_k \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где C_j^i – проекция направляющего косинуса i -го движителя на j -ю ось ССК, а P^i – положение i -го движителя в ССК.

В случае если НПА оснащён, например, дополнительным рулём управления и поворотным движителем, которые оба обеспечивают вращение НПА в горизонтальной плоскости ССК, то в описание будут добавлены следующие столбцы:

$$\begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \\ 0 \\ -P_z \sin(\alpha) \\ 0 \\ P_x \sin(\alpha) - P_y \cos(\alpha) \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \quad (15)$$

Поворотный движитель
Руль управления

Для рулей управления удобно использовать в качестве команды управления ИМ создаваемый им момент в ССК, а затем по калибровочной характеристике переводить его значение в необходимое значение угла перекладки в зависимости от скорости набегающего потока НПА.

4. Методы решения задачи распределения управляющих воздействий

Существует достаточно много подходов к постановке и решению задачи распределения управляющих воздействий между ИМ ДРК. В рамках данного обзора они разделены на две большие группы. В первую группу отнесены те задачи, в которых вектор виртуального управления пропорционален вектору управления ИМ, то есть $v(t) = Bu(t)$, и это допущение было сделано в формулировке задачи распределения управляющими воздействиями. Но в то же время существует отдельная группа систем, где это допущение не может быть принято.

4.1. Линейные системы ИМ

В подавляющем большинстве случаев к этой группе относят практически все телеуправляемые

необитаемые подводные аппараты (ТНПА) с фиксированными двигателями, а также большую часть АНПА, оснащенных фиксированными двигателями и/или рулями управления. В статье [28] представлен обзор различных АНПА, разработанных до 2000 года за рубежом. Большинство представленных аппаратов оснащено одним или двумя маршевыми двигателями, которые работают совместно с рулями управления. К этой группе также могут быть отнесены такие аппараты, как МТ-2010 [29], ММТ-3000 [30] и другие аппараты, разработанные в Институте проблем морских технологий ДВО РАН.

Для линейных систем исполнительных механизмов исторически первыми появились статические модели, описывающие их поведение и соответствующие им статические методы оптимизации, но после 2000 года начали появляться исследования, в рамках которых учитывалась динамическая модель исполнительных механизмов при решении задачи оптимального распределения.

Аналитическое решение при $u \in \mathbb{R}^k$. Отдельным случаем является аналитическое решение задачи при отсутствии ограничений на управляющие команды, т.е. $u \in \mathbb{R}^k$. Такая ситуация отчасти является синтетической, но может быть к ней сведена подбором специальных контуров управления с затяжными переходными процессами. При отсутствии ограничений на команды управления оптимизационная задача может быть решена на основе метрики L_2 (евклидова норма):

$$\min_{u \in \mathbb{R}^p} \frac{1}{2} (u - u_p) W (u - u_p),$$

при $v_c = Bu$,

где u_p – желаемое значение вектора управления ИМ в случае отсутствия управления, а W – диагональная матрица положительно определённых весовых коэффициентов.

Решение данной задачи может быть получено аналитическим образом и имеет следующий вид [31]:

$$u = (I - CB)u_p + Cv_c,$$

где I – единичная матрица, а C определяется следующим выражением:

$$C = W^{-1} B^T (B W^{-1} B^T)^{-1}.$$

Это решение возможно, только если матрица V является невырожденной, но зачастую это не так или она может стать вырожденной при отказах отдельных элементов двигатель-рулевого комплекса. В этом случае в практической реализации нормальной является практика записи матрицы C в следующей форме:

$$C_\varepsilon = W^{-1} B^T (B W^{-1} B^T + \varepsilon I)^{-1},$$

где $\varepsilon \geq 0$ представляет собой бесконечно малую добавку, фактически не влияющую на решение задачи, но обеспечивающую существование обратной матрицы.

Прямое распределение с масштабированием. Данный подход не обеспечивает оптимального решения, но позволяет получить его в условиях линейных ограничений $u \in U \subset \mathbb{R}^k$, накладываемых на исполнительные механизмы. Данный метод подразумевает поиск такого набора линейных положительных сжимающих коэффициентов $\alpha \in [0, 1]$, при котором решение задачи распределения управляющего воздействия не выходит за рамки допустимого множества U [32], при этом новая линейная оптимизационная задача ставится следующим образом:

$$\max_{\alpha \leq 1} \alpha,$$

при условии $Bu = \alpha v_c, \alpha v_c \in A$.

Решение задачи поиска такого набора сжимающих коэффициентов встречается в зарубежной литературе [33, 34]. Кроме того, встречаются статьи, в которых рассматривается решение задачи оптимизационного поиска набора сжимающих коэффициентов [35].

Одна из вариаций данного подхода, которая используется в аппаратах Института проблем морских технологий ДВО РАН, формулируется следующим образом [36]. Пусть v_c^{prio} представляет собой команду управления v_c , в которой оси расставлены в соответствии с уменьшением степени приоритета, $l = [l_1, l_2, \dots, l_m]$ где $l_i \in [0, 1]$, представляет собой набор коэффициентов насыщения i -й оси управления, а u^{ub} представляет собой решение задачи распределения без ограничений, полученное в соответствии с выражением (16). Тогда можно решить задачу распределения управляющих значений итерационным методом с фиксированным количеством шагов. Так, для оси с максимальным приоритетом, т.е. для v_c^1 сжимающий коэффициент будет записан следующим образом:

$$\alpha_1 = \min \left\{ \frac{l_1 \cdot u_j^{\lim}}{u_j^{ub}} \right\}_{j=1}^k,$$

где u_j^{\lim} представляет собой максимальное значение команды управления j -го исполнительного механизма. Для простоты считаем, что характеристика исполнительного механизма симметрична, т.е. $u_j^{\lim} = u_j^+ = -u_j^-$.

Для осей с меньшим приоритетом, т.е. для $i > 1$ в наборе v_c^{prio} , расчёт сжимающего коэффициента будет записан следующим образом:

$$\alpha_i = \min_{j=1}^k \left\{ \frac{\min(l_i \cdot u_j^{\text{lim}}, u_j^{\text{lim}} - u_j^{\text{prev}})}{u_j^{\text{ub}}} \right\},$$

где u_j^{prev} представляет собой команду управления, которая была рассчитана для j -го исполнительного механизма на предыдущих итерациях алгоритма расчёта и определяется следующим образом:

$$u_j^{\text{prev}} = \sum_{k=0}^{i-1} \alpha_k u_k^{\text{ub}}.$$

Квадратичная оптимизация. Выбор функционала J второго порядка в уравнении, описывающем управляемую систему (7), можно легко привести к записи задачи квадратичной оптимизации в канонической форме (метрика L_2 или евклидова норма):

$$\min_{u,s} \frac{1}{2} (u^T, s^T) H \begin{pmatrix} u \\ s \end{pmatrix},$$

при условии

$$(B, -I) \begin{pmatrix} u \\ s \end{pmatrix} = v_c,$$

$$\begin{pmatrix} I & 0 \\ -I & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ s \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} u_{\min} \\ -u_{\max} \end{pmatrix},$$

где $H = 2 \cdot \text{diag}(q_1, \dots, q_k, w_1, \dots, w_m)$ представляет собой диагональную матрицу положительно определённых весовых коэффициентов для ИМ ДРК (q_1, \dots, q_k) и элементов вектора виртуального управления (w_1, \dots, w_m).

В данной постановке задачи используются различные математические методы поиска решения, например, метод активного набора (active set) или метод внутренней точки (interior point). Оба метода использовались при решении задачи распределения для квадратичной формулировки проблемы [37, 38].

Функционал J может быть записан также и в L_1 метрике, но особенностью методов линейного программирования при решении таких задач является поиск оптимального решения по граням и вершинам области допустимых значений границ подмножества U . Физический смысл этого заключается в тенденции максимальной загрузки минимального количества ИМ [39], что существенно повышает износ отдельных ИМ и ведёт к чрезмерной нагрузке на систему энергообеспечения. В то время как методы квадратичного программирования, в свою очередь, стремятся найти такое решение, которое распределяет равную нагрузку на максимальное количество элементов управления.

Динамическое распределение. Предыдущие формулировки задачи распределения вектора управления строились на базе статической модели ИМ и не учитывали динамических процессов, которые происходят в них. В работах [40, 41] были предложены первые попытки формулировки задачи распределения вектора управления с учетом динамики ИМ.

В работе [42] представлен новый подход для учета динамики исполнительных приводов. Его суть заключается в создании подпространств глобального пространства решения задачи распределения управляющих команд, которые отражают «виртуальную» динамику процессов, происходящих в исполнительных механизмах. Позже этот подход был развит в работах [43, 44].

В рамках нового подхода динамическая задача распределения управляющих воздействий (dynamic control allocation) приобрела новую формальную запись:

$$\begin{cases} \dot{\omega}(t) = \mu(t), \\ u(t) = B^+ v(t) + B_{\perp} \omega(t), \quad u_c(t) \equiv B^+ v(t); \end{cases} \quad (17)$$

где $\omega(t) \in \mathbb{R}^{k-m}$ – вектор состояния распределителя (allocator state), $\mu(t) \in \mathbb{R}^{k-m}$ – вход распределителя (allocator input), $u_c(t)$ обозначается как первичный вектор управления ИМ, B^+ – псевдообратная матрица к матрице B , а B_{\perp} представляет собой такую недоопределённую матрицу, множество решений которой формируют подпространство, ортогональное подпространству, сформированному множеством решений недоопределённой матрицы B . Такая запись позволяет получить произвольный вектор команд управления ИМ путем настройки $\omega(t)$.

Недостатком методов, представленных выше, является необходимость знания динамической модели исполнительных механизмов. Для решения этой проблемы в работе [45] авторами представлен новый подход, в котором параметры динамики ИМ определяются в режиме реального времени на основе методов обучения с подкреплением.

Динамическое распределение на базе прогнозирующих моделей. Управление с прогнозирующими моделями (Model predictive control) представляет собой один из самых современных подходов в области теории управления. Изначально он применялся при управлении производственными процессами, где большие постоянные времени переходных процессов позволяли его применять, т.к. он крайне ресурсоёмок. Но с ростом вычислительных мощностей компьютеров и встраиваемых систем появилась возможность применения данного подхода для мобильных объектов управления. В рамках этого подхода

сформировался отдельный подкласс под названием «Model predictive control allocation» [46–48] предназначенный для решения задачи распределения управляющих воздействий на основе прогнозирующих моделей.

Задача распределения в данном подходе записывается следующим образом [49]. Пусть исполнительные механизмы ДРК представлены в формулировках метода пространства состояний следующим образом:

$$\dot{u}(t) = A_u u(t) + B_u u_{cmd}(t),$$

где A и B блочно-диагональные матрицы, описывающие динамику исполнительных элементов, $u_{cmd}(t)$ – вектор управления ИМ, а $\hat{u}(t)$ – сформированное ИМ управление. Тогда постановка задачи распределения управления на базе прогнозирующей модели будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{u}(t) = A_u \hat{u}(t) + B_u u_{cmd}(t),$$

при условии

$$v_c(t) = Bv(t), u \in U.$$

Для предсказания состояния на горизонт времени N набора исполнительных механизмов $u(t)$ используется дискретная запись:

$$\hat{u} = [\hat{u}(k+1|k), \dots, \hat{u}(k+N|k)],$$

$$\hat{v} = [\hat{v}(k+1|k), \dots, \hat{v}(k+N|k)],$$

где N представляет собой размер горизонта предсказания, а k – текущий временной отрезок. Для заданного горизонта предсказания множество решений вектора управления ИМ ДРК u_{cmd}^* может быть найдено путем минимизации квадратичного функционала, который записан следующим образом:

$$J(\cdot) = \sum_{j=1}^N W(j) [\hat{v}(k+j|k) - v^*(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^k W_a(i) [u_{cmd,i}(k+j-1|k)]^2,$$

где $W(j)$ представляет собой матрицу весовых коэффициентов, которая отражает значимость минимизации невязки с целевой командой управления v^* в момент времени j . В свою очередь, весовой коэффициент $W_a(i)$ отражает стоимость использования i -го исполнительного механизма.

4.2. Нелинейные системы ИМ

Существуют более сложные системы ДРК, так, в экспериментальном автономном подводном аппарате «KAUV-1» [50] маршевый движитель расположен на поворотной платформе, которая обеспечивает его вращение в горизонтальной плоскости ССК, в то вре-

мя как система изменяемого положения центра масс обеспечивает создание момента по каналу дифферента. Еще одним примером сложного движительно-рулевого комплекса является автономный подводный аппарат «Jinbei» [51], на котором установлена пара вращательных подруливающих движителей. Похожий автономный робототехнический комплекс под названием «Otohime» [52] также оснащен поворотными подруливающими движителями и был разработан той же группой японских ученых для решения задачи автоматического сбора грунта с морского дна.

Особенностью таких структур ДРК является наличие движителей, которые закреплены на поворотной платформе. Это ведёт к тому, что допущение $v(t) = Bv(t)$ не может быть принято. Кроме того, в этом случае область решения является невыпуклой. Для такого класса задач подавляющая часть методов, описанных выше, не работает и требуются другие подходы.

Методы нелинейного программирования. В работах [53, 54] показано, что методы нелинейного программирования можно использовать для решения задачи распределения управляющих воздействий. Основным используемым подходом является локальная аппроксимация квадратичного функционала и линеаризация ограничений.

Это приводит к численному методу решения оптимизационной задачи, аналогичному последовательному квадратичному программированию (Sequential quadratic programming), за исключением того, что линейное либо квадратичное приближение необходимо выполнять для каждой итерации расчётов.

Недостатком такого подхода является то, что при высокой нелинейности исполнительных механизмов и сильной невыпуклости области решения данный метод может остаться в локальном экстремуме, не дойдя до глобального, что может существенно ухудшить качество управления.

Динамический поиск оптимума. В работе [55] автором предлагается переформулировать задачу поиска оптимального распределения управляющего воздействия как поиск управляющей функции Ляпунова. В частности, пусть задан функционал $J'(x, u, t) = J(x, u, t) + \delta(u)$, где $\delta(u)$ представляет собой специальную штрафную функцию, которая удерживает u в рамках подпространства U . Тогда функция Ляпунова будет записана следующим образом:

$$L(x, u, t, \lambda) = J'(x, u, t) + \lambda^T (v_c - h(u, x, t)), \quad (18)$$

где λ – множитель Лагранжа. Пусть существует функция управления Ляпунова $V_0(x, t)$ (Control-Lyapunov function), которая была сформирована системой

управления НПА, тогда задача оптимального распределения управляющего воздействия будет записана следующим образом:

$$V(x, u, t, \lambda) = \sigma V_0(x, t) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial L^T}{\partial u} \frac{\partial L}{\partial u} + \frac{\partial L^T}{\partial \lambda} \frac{\partial L}{\partial \lambda} \right),$$

где σ – некоторый множитель.

Этот подход был развит позже при решении задачи распределения управляющих воздействий для нелинейных ИМ с учетом их динамики [56].

5. Программные средства для решения задачи распределения управляющих воздействий

Для решения задачи квадратичной оптимизации во встраиваемых системах управления, применяемых в подводных аппаратах, желательно использовать легковесные библиотеки на языках программирования C++/C, которые позволяют решать оптимизационные задачи в режиме реального времени и легко встраиваемы в ПО аппарата.

Основные известные программные реализации с открытым исходным кодом, которые подходят для описываемой задачи, следующие:

- CVXGEN – реализация решения задачи квадратичной оптимизации на основе метода внутренней точки с автоматической генерацией C кода [57]. В работе [49] показано, что этот программный пакет может быть использован для решения задачи оптимального распределения в формулировках MPC подхода в режиме реального времени;
- qpOASES – реализация решения задачи квадратичной оптимизации на основе метода активных множеств на языке C++ [58];
- FiOrdOs – специальный программный модуль к MATLAB, который позволяет автоматически сформировать код для численного решения задачи квадратичной оптимизации с линейными ограничениями на языке C. Может быть использован для решения задачи оптимального распределения в формулировках MPC [59];
- ACADO – специальная программная среда и набор алгоритмов для решения задачи квадратичной оптимизации с ограничениями, динамической оптимизации, задачи MPC. В составе пакета есть специальные методы для автоматической генерации C кода [60];

- MPT (Multi-Parametric Toolbox) – специальный бесплатный пакет к MATLAB, включающий в себя реализацию оптимального управления линейными, гибридными и нелинейными системами. Могут быть заданы линейный и квадратичный функционалы качества. Есть автоматическая генерация кода на языке C [61].

Заключение

Задачу управления движением подводного аппарата можно ставить различными способами. Один из них заключается в разделении задачи на две независимых, которые решаются последовательно: управление движением НПА и управление исполнительными механизмами. В статье показано, что при такой декомпозиции управления оптимальность решения сохраняется. Приведены различные подходы и методы решения задачи распределения управляющих воздействий в зависимости от типа используемого ДРК. Кроме того, представлены программные пакеты, которые позволяют реализовать рассмотренные подходы в компьютерах и встраиваемых системах.

Описываемая задача представляется достаточно проработанной, но в тоже время существует большой пласт особенностей динамики ИМ, которые до сих пор не учтены в представленных подходах:

- При формировании динамических моделей исполнительных механизмов явным образом не выражены параметры электроприводов. В работах не учитывается, что коэффициент полезного действия электромотора существенно зависит от скорости вращения вала привода.
- Динамическая модель не учитывает сильную зависимость параметров исполнительных механизмов от скорости набегающего потока, хотя это важный параметр для работы всех исполнительных механизмов. Так, в работе [62] показано, что из-за гидродинамических особенностей эффективность ПА существенно падает с возрастанием скорости набегающего потока и изменением его угла набегания.

Такие задачи, как и многие другие в этой области, требуют дальнейшего детального рассмотрения.

Работа выполнена по теме госзадания ИПМТ ДВО РАН «Научные исследования и разработки в области новых технологий создания перспективных морских робототехнических комплексов ...», № госрегистрации АААА-А17-117013010055-6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Valasek M. Design and control of under-actuated and over-actuated mechanical systems—challenges of mechanics and mechatronics // *Computational mechanics in vehicle system dynamics—proceedings of 5th world congress on computational mechanics held in Vienna*. Vienna, 2002.
2. Бриллиантов А.Н. Разработка и исследование основ построения энергетических систем подводных аппаратов: канд. дис. по техн. наукам / Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова. М., 2005. С. 68–70.
3. Enns D. Control allocation approaches // *Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 1998. P. 4109.
4. Durham W.C. Constrained control allocation // *Journal of Guidance, control and Dynamics*. 1993. No. 16(4). P. 717–725.
5. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control. 3rd ed. Upper Saddle River: Upper Saddle River, 2005. 407 p.
6. Bordignon K.A. Constrained control allocation for systems with redundant control effectors: дис. – Virginia Tech, 1996.
7. Fossen T.I., Johansen T.A. A survey of control allocation methods for ships and underwater vehicles // *14th Mediterranean conference on control and automation*. – IEEE, Ancona, 2006. P. 1–6.
8. Oppenheimer M., Doman D., Bolender M. Control allocation // *The control handbook, control system applications* / Ed. by Levine. W.S. 2010.
9. Durham W., Bordignon K.A., Beck R. Aircraft control allocation. John Wiley & Sons, 2017.
10. Johansen T.A., Fossen T.I. Control allocation – a survey // *Automatica*. 2013. No. 49(5). P. 1087–1103.
11. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве / под ред. В.Ф.Филаретова. Владивосток: Дальнаука, 2018, 400 с.
12. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Подход к реконфигурации системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // *Гироскопия и навигация*. 2020. № 28(2). С. 131–146.
13. Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Кульчак А.М. Аналитическое решение задачи оптимальной реконфигурации системы управления летательного аппарата при отказе нескольких органов управления // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 7. С. 59–66.
14. Амбросовский В.М., Корнев А.С., Хабаров С.П. Распределение упоров в задаче позиционирования подвижных объектов // *Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ*. 2013. № 7. С. 63.
15. Воловодов С.К., Черняев М.Г., Каверинский А.Ю., Воловодов С.С. Распределение ресурсов управления при пространственной стабилизации подвижных объектов // *Гироскопия и навигация*. 2003. № 1. С. 30–42.
16. Амбросовский В.М., Корнев А.С. Алгоритмы управления в задачах позиционирования динамических объектов // XII Всерос. совещ. по проблемам управления. ВСПУ-2014. М., 2014. С. 3523–3533.
17. Власов С.М. Адаптивное управление плоским движением надводного роботизированного объекта С.-Петерб. нац. исслед. ун-т информатик. технологий, механики и оптики. 2016.
18. Härkegård O., Glad S.T. Resolving actuator redundancy—optimal control vs. control allocation // *Automatica*. 2005. No. 41(1). P. 137–144.
19. Bi F.Y., Wei Y.J., Zhang J.Z., Cao W. Position-tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles in the presence of unknown ocean currents // *IET control theory & applications*. 2010. No. 4(11). P. 2369–2380.
20. Do K.D., Jiang Z.P., Pan J., Nijmeijer H. Global output feedback universal controller for stabilization and tracking of underactuated ODIN—an underwater vehicle // *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. 2002. Vol. 1. P. 504–509.
21. Fossen T.I. Marine Control Systems—Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics. Trondheim, Norway, Org, 2002.
22. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые двигатели. Л.: Судостроение, 1988.
23. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М.: Наука, 2005. 400 с.
24. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 216 с.
25. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: Дальнаука, 2018. 368 с.
26. Боженов Ю.А., Борков А.П., Гаврилов В.М. и др. Самоходные необитаемые подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1986. 264 с.
27. Армишев С.В. Исследование структуры двигательных комплексов подводных аппаратов // *Подводные аппараты и роботы*. М., 1986. С. 45–52.
28. Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey // *Autonomous Robots*. 2000. No. 8(1). P. 7–24.
29. Борейко А.А., Горнак В.Е., Мальцева С.В., Матвиенко Ю.В., Михайлов Д.Н. Малогабаритный многофункциональный автономный необитаемый подводный аппарат «МТ-2010» // *Подводные исследования и робототехника*. 2011. № 2. С. 37–42.
30. Горнак В.Е., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф., Инзарцев А.В. ММТ-3000 – новый малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат Института проблем морских технологий ДВО РАН // *Подводные исследования и робототехника*. 2007. № 1. С. 12–20.
31. Fossen T.I., Sagatun S.I. Adaptive control of nonlinear systems: A case study of underwater robotic systems // *Journal of Robotic Systems*. 1991. No. 8(3). P. 393–412.
32. DURHAM W.C. Constrained control allocation // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1994. No. 17(2). P. 330–336.
33. Bordignon K.A., Durham W.C. Closed-form solutions to constrained control allocation problem // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995. Vol. 18, No. 5. P. 1000–1007.
34. Petersen J.A., Bodson M. Fast implementation of direct allocation with extension to coplanar controls // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2002. Vol. 25. P. 464–473.
35. Oppenheimer M., Doman D., Bolender M. Control allocation // *The control handbook, control system applications*. 2010.
36. Костенко В.В., Павин А.М. К вопросу обеспечения независимости управляющих воздействий двигательного комплекса подводного аппарата // *Материалы 6-й научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана»*. Владивосток, 2015. С. 118–123.
37. Petersen J.A., Bodson M. Constrained quadratic programming techniques for control allocation // *42nd IEEE International Conference on Decision and Control*. Maui, HI, 2003. Vol. 4. P. 3378–3383.
38. Harkegard O. Efficient active set algorithms for solving constrained least squares problems in aircraft control allocation // *Proceedings of the 41st IEEE Conf. on Decision and Control*. Las Vegas, NV, USA, 2002. P. 1295–1300.
39. Bodson M. Evaluation of optimization methods for control allocation // *Journal of Guidance Control, and Dynamics*. 2002. No. 25. P. 703–711.
40. Härkegård O. Dynamic control allocation using constrained quadratic programming // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2004. No. 27(6). P. 1028–1034.
41. Tjønnås J., Johansen T.A. Adaptive control allocation // *Automatica*. 2008. No. 44(11). P. 2754–2765.
42. Zaccarian L. Dynamic allocation for input redundant control systems // *Automatica*. 2009. No. 45(6). P. 1431–1438.

43. Galeani S., Serrani A., Varano G., Zaccarian L. On input allocation-based regulation for linear over-actuated systems // *Automatica*. 2015. No. 52. P. 346–354.
44. Serrani A. Output regulation for over-actuated linear systems via inverse model allocation // *IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. Hawaii, 2012. P. 4871–4876.
45. Kolaric P., Lopez V.G., Lewis F.L. Optimal dynamic Control Allocation with guaranteed constraints and online Reinforcement Learning // *Automatica*. 2020. No. 122.
46. Schwartz M., Siebenrock F., Hohmann S. Model Predictive Control Allocation of an Over-actuated Electric Vehicle with Single Wheel Actuators // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52, No. 8. P. 162–169.
47. Bächle T., Graichen K., Buchholz M., Dietmayer K. Model predictive control allocation in electric vehicle drive trains // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. No. 48(15). P. 335–340.
48. Naderi M., Sedigh A.K., Johansen T.A. Guaranteed feasible control allocation using model predictive control // *Control Theory and Technology*. 2019. No. 17(3). P. 252–264.
49. Hanger M., Johansen T.A., Mykland G.K., Skullestad. A. Dynamic model predictive control allocation using CVXGEN // *9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*. Santiago, 2011. P. 417–422.
50. Loc M.B., Choi H.S., Seo J.M., Baek S.H., Kim A.J.Y. Development and control of a new AUV platform // *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2014. No. 12(4). P. 886–894.
51. Yoshida H. et al. Development of the cruising-AUV “Jinbei” // *Oceans-Yeosu*. – IEEE, 2012. P. 1–4.
52. Ishibashi S. et al. The development of an autonomous underwater vehicle «Otohime» with the multiple operation, 2013. *IEEE Intern. Conf. on Mechatronics and Automation*. Takamatsu, Japan, 2013. P. 1588–1593.
53. Johansen T.A., Fossen T.I., Berge S.P. Constrained nonlinear control allocation with singularity avoidance using sequential quadratic programming // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2004. No. 12(1). P. 211–216.
54. Poonamallee V.L., Yurkovich S., Serrani A., Doman. D.B. A nonlinear programming approach for control allocation // *Proceedings of the American control conference*. Boston, 2004. Vol. 2. P. 1689–1694.
55. Johansen T.A. Optimizing nonlinear control allocation // *43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. Bahamas, 2004. Vol. 4. P. 3435–3440.
56. Tjonnas J., Johansen T.A. Optimizing adaptive control allocation with actuator dynamics // *46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, 2007. P. 3780–3785.
57. Mattingley J., Boyd S. Real-Time Convex Optimization in Signal Processing // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2010. Vol. 27, No. 3. P. 50–61.
58. Ferreau H.J., Kirches C., Potschka A., Bock H.G., Diehl M. qpOASES: A parametric active-set algorithm for quadratic programming // *Mathematical Programming Computation*. 2014. No. 6(4). P. 327–363.
59. Jones C.N., Domahidi A., Morari M., Richter S., Ullmann F., Zeilinger. M. Fast predictive control: Real-time computation and certification // *IFAC Proceedings Volumes*. 2012. No. 45(17). P. 94–98.
60. Houska B., Ferreau H.J., Diehl M. ACADO toolkit—An open-source framework for automatic control and dynamic optimization // *Optimal Control Applications and Methods* 2011. No. 32(3). P. 298–312.
61. Kvasnica M., Grieder P., Baotic M., Morari M. Multi-parametric toolbox (MPT) // *International workshop on hybrid systems: Computation and control*. San Francisco, 2004. P. 448–462.
62. Palmer A., Hearn G.E., Stevenson P. Modelling tunnel thrusters for autonomous underwater vehicles // *IFAC Proceedings Volumes*. 2008. No. 41(1). P. 91–96.x.

Об авторах

КОСТЕНКО Владимир Владимирович, к.т.н., заведующий лабораторий исполнительных устройств и систем телеуправления, ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН
Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а
Научные интересы: Подводная робототехника, системы управления движением, движительно-рулевые комплексы, динамические модели, буксируемые системы.
Тел.: +7 (984) 145-43-85
E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru
SPIN-код: 2310-3141
ORCID ID: 0000-0002-3821-3787
Resercher ID: AAF-6399-2021
Scopus ID: 57189036440

ТОЛСТОНОГОВ Антон Юрьевич, научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН
Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а
Научные интересы: теория и практика создания систем управления движением автономных, телеуправляемых и гибридных подводных роботов
Тел.: +7 (950) 282-51-56
E-mail: tolstonogov.anton@gmail.com
SPIN-код: 7409-7896
ORCID ID: 0000-0002-2839-2267
Resercher ID: AAF-8216-2021
Scopus ID: 57105049900

Для цитирования:

Костенко В.В., Толстоногов А.Ю. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОДВОДНОГО АППАРАТА: КРАТКИЙ ОБЗОР. Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 1(35). С. 4–17. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_01

CONTROL ALLOCATION APPROACHES FOR OVER-ACTUATED UNDERWATER VEHICLES: A BRIEF REVIEW

V.V. Kostenko, A.Yu. Tolstonogov

There are various approaches to formulate the motion control problem for an unmanned underwater vehicle. An underwater vehicle can be considered as a single controllable object, that includes the dynamics of a rigid body, and the dynamics of actuators. At the same time, there are approaches aimed to divide the problem into two independent ones. In the first one, the problem of the vehicle control is solved, the second one solves the problem of allocation the control commands to the effectors of the propulsion system. The article provides an overview of various approaches to solving the control allocation problem for an underwater vehicle. Various approaches and methods of solving the problem for various types of propulsion systems are shown. Examples of software are presented that allow to numerically solve the problem in the formulations of quadratic optimization and model predictive control. The examples of problems that have not yet been fully resolved are given.

Keywords: underwater vehicle, vehicle control, control allocation, thruster, rudder, propulsion system, model predictive control allocation, dynamic allocation

References

1. Valasek M. Design and control of under-actuated and over-actuated mechanical systems—challenges of mechanics and mechatronics. Computational mechanics in vehicle system dynamics—proceedings of 5th world congress on computational mechanics held in Vienna. Vienna, 2002.
2. Brilliantov A.N. *Razrabotka i issledovanie osnov postroeniya energeticheskikh sistem podvodnykh apparatov*: dis. PhD in technical sciences / Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. M., 2005. P. 68–70.
3. Enns D. Control allocation approaches. Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 1998. P. 4109.
4. Durham W.C. Constrained control allocation. Journal of Guidance, Control and Dynamics. 1993. No. 16(4). P. 717–725.
5. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control. 3rd ed. Upper Saddle River: Upper Saddle River, 2005. 407 p.
6. Bordignon K.A. Constrained control allocation for systems with redundant control effectors: dis. PhD. – Virginia Tech, 1996.
7. Fossen T.I., Johansen T.A. A survey of control allocation methods for ships and underwater vehicles // 14th Mediterranean conference on control and automation. – IEEE, Ancona, 2006. P. 1–6.
8. Oppenheimer M., Doman D., Bolender M. Control allocation // The control handbook, control system applications / Ed. by Levine. W.S. 2010.
9. Durham W., Bordignon K.A., Beck R. Aircraft control allocation. John Wiley & Sons, 2017.
10. Johansen T.A., Fossen T.I. Control allocation – a survey // Automatica. 2013. No. 49(5). P. 1087–1103.
11. Filaretov V. F., Yukhimets D.A. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве / ed. V.F. Filaretov. Vladivostok: Dalnauka, 2018. 400 p.
12. Martynova L.A., Rozengauz M.B. Approach to reconfiguration of motion control system of autonomous underwater vehicle // *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation]. 2020. No. 28(2). P. 131–146.
13. Zybin E.Yu., Kosyanchuk V.V., Kulchak A.M. Analytical solution of the optimal aircraft control system reconfiguration problem in case of actuators failures // *Mechatronics, automation, control*. 2014. No. 7. P. 59–66.
14. Ambrosovsky V.M., Korenev A.S., Habarov S.P. Control allocation in task of dynamic position of vessel. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*. 2013. No. 7. P. 63.
15. Volovodov S. K., Chernyaev M. G., Kaverinsky A. Yu., Volovodov S.S. *Raspreделение resursov upravleniya pri prostranstvennoj stabilizatsii podvizhnykh ob"ektov. Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation]. 2003. No. 1. P. 30–42.
16. Ambrosovsky V.M., Korenev A.S. *Algoritmy upravleniya v zadachah pozicionirovaniya dinamicheskikh ob"ektov. XII vseros. soveshch. po problemam upravleniya VSPU-2014*. M., 2014. P. 3523–3533.
17. Vlasov S.M. *Adaptivnoe upravlenie ploskim dvizheniem nadvodnogo robotizirovannogo ob"ekta S.-Peterb. nac. issled. un-t informac. tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2016.
18. Härkegård O., Glad S.T. Resolving actuator redundancy—optimal control vs. control allocation // *Automatica*. 2005. No. 41(1). P. 137–144.
19. Bi F.Y., Wei Y.J., Zhang J.Z., Cao W. Position-tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles in the presence of unknown ocean currents // *IET control theory & applications*. 2010. No. 4(11). P. 2369–2380.
20. Do K.D., Jiang Z.P., Pan J., Nijmeijer H. Global output feedback universal controller for stabilization and tracking of underactuated ODIN—an underwater vehicle // *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. 2002. Vol. 1. P. 504–509.
21. Fossen T.I. *Marine Control Systems—Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics. Trondheim, Norway, Org, 2002.
22. Artyushkov L.S., Achkinadze A.Sh., Rusetsky A.A. *Sudovye dvizhiteli*. L.: Sudostroenie, 1988.
23. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. и др. *Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii*. M.: Nauka, 2005. 400 p.
24. Pantov E.N., Makhin N.N., Sheremetov B.B. *Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov*. L.: Sudostroenie, 1973. 216 p.

25. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Underwater robotic systems: systems, technologies, applications. Vladivostok: Dalnauka, 2018. 368 p.
26. Bozhenov Yu. A., Borkov A. P., Gavrilov V. M., etc. *Samohodnye neobitaemye podvodnye apparaty*. L.: Sudostroenie, 1986. 264 p.
27. Armishev S.V. *Issledovanie struktury dvizhitel'nykh kompleksov podvodnykh apparatov. Podvodnye apparaty i roboty*. M., 1986. P. 45–52.
28. Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey. *Autonomous Robots*. 2000. No. 8(1). P. 7–24.
29. Boreyko A.A., Gornak V.E., Maltseva S.V., Matvienko Yu.V., Mikhaylov D.N. Small multifunctional autonomous underwater vehicle «MT -2010». *Underwater investigations and robotics*. 2011. No. 2. P. 37–42.
30. Gornak V.S., Inzartsev A.V., Lvov O.Yu., Matvienko Yu.V., Scherbatyuk A.Ph. MMT-3000 – Small AUV of New Series of IMTP FEB RAS. *Underwater investigations and robotics*. 2007. No. 1. P. 12–20.
31. Fossen T.I., Sagatun S.I. Adaptive control of nonlinear systems: A case study of underwater robotic systems. *Journal of Robotic Systems*. 1991. No. 8(3). P. 393–412.
32. DURHAM W.C. Constrained control allocation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1994. No. 17(2). P. 330–336.
33. Bordignon K.A., Durham W.C. Closed-form solutions to constrained control allocation problem // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995. Vol. 18, No. 5. P. 1000–1007.
34. Petersen J.A., Bodson M. Fast implementation of direct allocation with extension to coplanar controls // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2002. Vol. 25. P. 464–473.
35. Oppenheimer M., Doman D., Bolender M. Control allocation // *The control handbook, control system applications*. 2010.
36. Kostenko V.V., Pavin A.M. *K voprosu obespecheniya nezavisimosti upravlyayushchih vozdeystviy dvizhitel'no-rulevogo kompleksa podvodnogo apparata. Materialy 6-j nauchno-tehnicheskoy konferencii «Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana»*. Vladivostok, 2015. P. 118–123.
37. Petersen J.A., Bodson M. Constrained quadratic programming techniques for control allocation. 42nd IEEE International Conference on Decision and Control. Maui, HI, 2003. Vol. 4. P. 3378–3383.
38. Harkegard O. Efficient active set algorithms for solving constrained least squares problems in aircraft control allocation. *Proceedings of the 41st IEEE Conf. on Decision and Control*. Las Vegas, NV, USA, 2002. P. 1295–1300.
39. Bodson M. Evaluation of optimization methods for control allocation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2002. No. 25. P. 703–711.
40. Härkegård O. Dynamic control allocation using constrained quadratic programming. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2004. No. 27(6). P. 1028–1034.
41. Tjønnås J., Johansen T.A. Adaptive control allocation. *Automatica*. 2008. No. 44(11). P. 2754–2765.
42. Zaccarian L. Dynamic allocation for input redundant control systems. *Automatica*. 2009. No. 45(6). P. 1431–1438.
43. Galeani S., Serrani A., Varano G., Zaccarian L. On input allocation-based regulation for linear over-actuated systems. *Automatica*. 2015. No. 52. P. 346–354.
44. Serrani A. Output regulation for over-actuated linear systems via inverse model allocation. *IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. Hawaii, 2012. P. 4871–4876.
45. Kolaric P., Lopez V.G., Lewis F.L. Optimal dynamic Control Allocation with guaranteed constraints and online Reinforcement Learning. *Automatica*. 2020. No. 122.
46. Schwartz M., Siebenrock F., Hohmann S. Model Predictive Control Allocation of an Over-actuated Electric Vehicle with Single Wheel Actuators. *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52, No. 8. P. 162–169.
47. Bächle T., Graichen K., Buchholz M., Dietmayer K. Model predictive control allocation in electric vehicle drive trains. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. No. 48(15). P. 335–340.
48. Naderi M., Sedigh A.K., Johansen T.A. Guaranteed feasible control allocation using model predictive control. *Control Theory and Technology*. 2019. No. 17(3). P. 252–264.
49. Hanger M., Johansen T.A., Mykland G.K., Skullestad. A. Dynamic model predictive control allocation using CVXGEN. 9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). Santiago, 2011. P. 417–422.
50. Loc M.B., Choi H.S., Seo J.M., Baek S.H., Kim A.J.Y. Development and control of a new AUV platform. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2014. No. 12(4). P. 886–894.
51. Yoshida H. et al. Development of the cruising-AUV “Jinbei”. *Oceans-Yeosu*. – IEEE, 2012. P. 1–4.
52. Ishibashi S. et al. The development of an autonomous underwater vehicle «Otohime» with the multiple operation, 2013. *IEEE Intern. Conf. on Mechatronics and Automation*. Takamatsu, Japan, 2013. P. 1588–1593.
53. Johansen T.A., Fossen T.I., Berge S.P. Constrained nonlinear control allocation with singularity avoidance using sequential quadratic programming. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2004. No. 12(1). P. 211–216.
54. Poonamallee V.L., Yurkovich S., Serrani A., Doman. D.B. A nonlinear programming approach for control allocation. *Proceedings of the American control conference*. Boston, 2004. Vol. 2. P. 1689–1694.
55. Johansen T.A. Optimizing nonlinear control allocation // 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Bahamas, 2004. Vol. 4. P. 3435–3440.
56. Tjonnas J., Johansen T.A. Optimizing adaptive control allocation with actuator dynamics. 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, 2007. P. 3780–3785.
57. Mattingley J., Boyd S. Real-Time Convex Optimization in Signal Processing. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2010. Vol. 27, No. 3. P. 50–61.
58. Ferreau H.J., Kirches C., Potschka A., Bock H.G., Diehl M. qpOASES: A parametric active-set algorithm for quadratic programming. *Mathematical Programming Computation*. 2014. No. 6(4). P. 327–363.
59. Jones C.N., Domahidi A., Morari M., Richter S., Ullmann F., Zeilinger. M. Fast predictive control: Real-time computation and certification // *IFAC Proceedings Volumes*. 2012. No. 45(17). P. 94–98.
60. Houska B., Ferreau H.J., Diehl M. ACADO toolkit—An open-source framework for automatic control and dynamic optimization. *Optimal Control Applications and Methods* 2011. No. 32(3). P. 298–312.
61. Kvasnica M., Grieder P., Baotić M., Morari M. Multi-parametric toolbox (MPT). *International workshop on hybrid systems: Computation and control*. San Francisco, 2004. P. 448–462.
62. Palmer A., Hearn G.E., Stevenson P. Modelling tunnel thrusters for autonomous underwater vehicles. *IFAC Proceedings Volumes*. 2008. No. 41(1). P. 91–96.x.

Recommended citation:

Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu. CONTROL ALLOCATION APPROACHES FOR OVER-ACTUATED UNDERWATER VEHICLES: A BRIEF REVIEW. *Underwater investigation and robotics*. 2021. No. 1(35). P. 4–17. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_01

About the authors

KOSTENKO Vladimir Vladimirovich, Leading Researcher PhD in Engineering Science, Head of Laboratories, Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 5a Sukhanova st., Vladivostok, Russia

Research interests: Underwater robotics, motion control systems, propulsion and steering systems, dynamic models, towed systems.

Phone: +7 (984) 145-43-85

E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru

SPIN-код: 2310-3141

ORCID ID: 0000-0002-3821-3787

Resercher ID: AAF-6399-2021

Scopus ID: 57189036440

TOLSTONOGOV Anton Yur'evich, senior researcher Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 5a Sukhanova st., Vladivostok, Russia

Научные интересы: theory and practice of creating motion control systems for autonomous, remote-controlled and hybrid underwater robots

Phone: +7 (950) 282-51-56

E-mail: tolstonogov.anton@gmail.com

SPIN-код: 7409-7896

ORCID ID: 0000-0002-2839-2267

Resercher ID: AAF-8216-2021

Scopus ID: 57105049900



ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ГИБРИДНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Л.В. Киселев, В.В. Костенко, А.В. Медведев

При создании гибридных автономных необитаемых подводных аппаратов (ГНПА) одна из основных проблем состоит в обеспечении заданных динамических свойств аппарата с учетом особенностей его конструкции и многообразия режимов пространственного движения. Для решения этой актуальной проблемы разрабатывается динамическая модель, основанная на совмещении функций автономного и телеуправляемого подводных аппаратов (АНПА/ТНПА). Основными элементами в структуре модели являются: математическая модель пространственного движения с шестью степенями свободы, вычислительные средства «виртуальной гидродинамики», адаптивные регуляторы движения, комбинированный движительно-рулевой комплекс, модель внешней среды. Задача исследования состоит в определении параметров математической модели (гидродинамических характеристик, управляющих и возмущающих сил, сил гидродинамического сопротивления, ходовых и маневренных характеристик аппарата) в режимах крейсерского движения и позиционирования. В качестве прототипа ГНПА для выбора геометрической формы и основных конструктивных параметров в работе принят ГНПА «Freedom ROV» (Oceanering, США). В результате вычислительных экспериментов получены оценки параметров динамической модели ГНПА, свидетельствующие о его работоспособности при осуществлении сложных режимов пространственного движения с взаимодействием элементов всего функционального комплекса. Как следствие это позволяет выработать рекомендации для оптимального выбора структуры и характеристик многозадачной информационно-управляющей системы ГНПА при выполнении широкого класса подводно-технических работ.

Ключевые слова: автономные, телеуправляемые, гибридные необитаемые подводные аппараты (АНПА, ТНПА, ГНПА), динамические и вычислительные модели, управление движением, гидродинамика, движительно-рулевые комплексы .

Введение

Развитие современных подводных робототехнических комплексов связано с разработкой гибридных необитаемых подводных аппаратов (ГНПА), создание которых основано на расширении функций АНПА путем включения в его информационно-управляющую структуру функций, присущих ТНПА. В работе [1] показано, что такой гибридный аппарат может в режиме АНПА выполнять весь спектр бесконтактных работ, выходить к заданному объекту в соответствии с заданной программой, выполнять действия, связанные с формированием канала информационного обмена с постом управления и далее выполнять контактные операции в супервизорном режиме.

В технологии ГНПА и оценке его функциональных свойств можно отметить два аспекта. Первый касается обоснования облика ГНПА, его конструктивных особенностей, системной организации, эффективности при выполнении рабочих действий. Принципиально важные задачи технологии ГНПА рассмотрены в работе [1]. К их числу относятся:

- интеллектуализация системы бортового управления,
- организация супервизорного управления АНПА,
- расширение инструментального оснащения и оптимизация конструктивных решений,
- развитие средств подводной навигации для поддержки работ ГНПА,
- организация структуры подводного базирования для обеспечения длительных работ.

Другой аспект проблемы связан с построением обобщенной функционально-параметрической модели, адекватно отражающей динамические процессы ГНПА в многозадачных режимах пространственного движения.

В перечень основных задач по оценке функциональных и динамических характеристик системы управления пространственным движением ГНПА входит построение математической модели пространственного движения ГНПА и соответствующих вычислительных программных средств с учетом:

- особенностей решаемых задач по назначению,
- влияния переменного гидродинамического воздействия вязкой среды при осуществлении типовых и специфических режимов пространственных движений ГНПА,
- функциональных и кинематических особенностей движительно-рулевого комплекса (ДРК), обеспечивающего эффективное маневрирование ГНПА в пространстве, в том числе в толще воды и вблизи дна,
- минимизации энергозатрат на движение в условиях повышенной автономности,
- объема и точностных характеристик навигационных данных, необходимых для формирования миссий и управления движением с многообразием программных и самоорганизующихся траекторий.

Для решения указанного класса задач необходима разработка алгоритмов и средств имитационного моделирования, обеспечивающих адекватность используемой математической модели, надежную идентификацию гидродинамических характеристик аппарата, силовых и энергетических характеристик ДРК в режимах автономного и телеуправляемого движения.

■ Структура управления и режимы движения

Динамические свойства ГНПА, как и АНПА вообще, определяются характеристиками управляемости (маневренности), устойчивости по отношению к начальным условиям вектора состояний и по отношению к параметрам управления, точности и быстродействия в переходных и установившихся режимах.

Перечень основных режимов движения определяется характером выполняемых работ и соответствующих им миссиям. В общем случае в этот перечень включаются:

- 1) поступательное движение с постоянной или переменной скоростью, торможение, задний ход,
- 2) движение в вертикальной плоскости с управлением глубиной погружения или расстоянием до дна,
- 3) зависание, вертикальное погружение/всплытие с постоянной или регулируемой плавучестью,

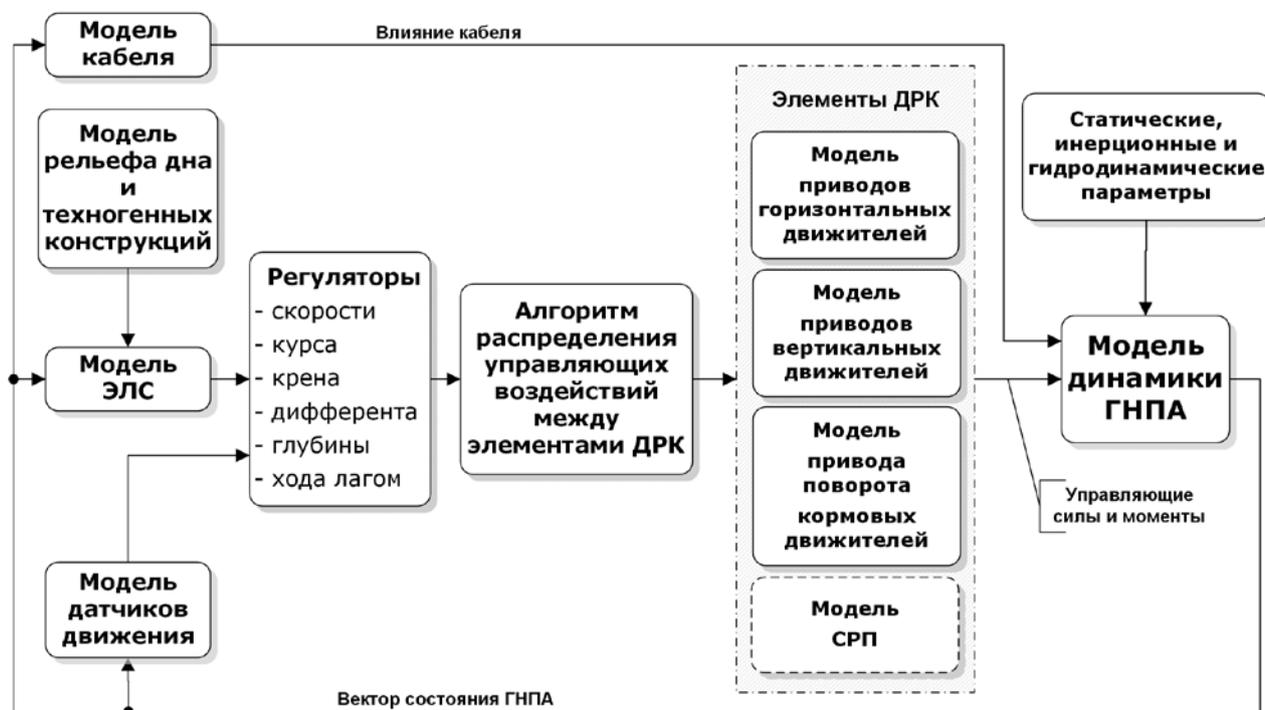


Рис. 1. Структурная схема модели СУ ГНПА

4) круговые или иные вращательные движения в горизонтальной плоскости в режимах «ход» и «на месте» (циркуляция), стабилизация курса или угловой скорости,

5) динамическое позиционирование над точкой (объектом), стабилизация линейного и углового положения в трех плоскостях.

Все перечисленные режимы движения являются, в принципе, типовыми для АНПА и ТНПА. Из них наиболее сложным в отношении динамики является режим позиционирования, который сопровождается стабилизацией положения по линейным и угловым координатам, лаговыми движениями с малой скоростью и стабилизацией углового положения с ориентацией на заданное направление.

Реализация перечисленных режимов движения предполагает использование исполнительных органов, представляющих собой пространственно распределенный избыточный движительно-рулевой комплекс, в состав которого включаются:

- кормовые (маршевые) движители на поворотной платформе,
- два горизонтальных подруливающих движителя, расположенные в носу ГНПА, и четыре вертикальных подруливающих движителя,
- как дополнение могут быть использованы носовые и кормовые рули, выполненные по определенной схеме.

На рис. 1 приведена структура системы управления движением ГНПА, представленная в виде двух уровней, из которых первый составляет полный состав регуляторов по каналам управления, а второй содержит модели динамики аппарата и исполнительных органов.

■ Математическая модель динамики ГНПА

Пространственное движение ГНПА во всех типовых режимах представляется в виде совокупности плоских движений, кинематическая взаимосвязь которых осуществляется только через управляющие и возмущающие воздействия. Это обстоятельство используется практически в системах управления движением АНПА и ТНПА и дает, кроме того, возможность представить математическую модель движения ГНПА в виде совокупности трех плоских движений, которые могут согласованно осуществляться в соответствии с программной миссией или по команде через канал связи. С учетом принятых допущений представим математическую модель пространственного движения АНПА в виде трех систем уравнений в связанной с аппаратом системе координат с использованием «естественных» переменных состояния [2-7]. Принятые при этом системы координат и схемы действия сил приведены на рис. 2.

$$\begin{aligned}
 m_x \dot{v} &= -R_x(v, \alpha) + P \sin \vartheta + (T_{x1} - F_x) \cos \alpha - (T_{y1} - F_y) \sin \alpha, \\
 m_y v \dot{\vartheta} &= R_y(v, \alpha, \psi) + P \cos \vartheta + (T_{y1} - F_y) \cos \alpha + (T_{x1} - F_x) \sin \alpha, \\
 J_{zz} \ddot{\psi} &= M_0 \sin \psi + M_z(v, \alpha, \psi) + M_{z1}, \\
 \dot{X} &= v \cos \vartheta, \quad \dot{Y} = -v \sin \vartheta, \quad \psi = \vartheta - \alpha.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_x \dot{v} &= -R_x(v, \beta) + (T_{x1} - F_x) \cos \beta - (T_{z1} - F_z) \sin \beta, \\
 m_z v \dot{\chi} &= R_z(v, \beta, \phi) + (T_{z1} - F_z) \cos \beta + (T_{x1} - F_x) \sin \beta, \\
 J_{yy} \ddot{\phi} &= M_y(v, \beta, \phi) + M_{y1}, \\
 \dot{X} &= v \cos \chi, \quad \dot{Z} = v \sin \chi, \quad \phi = \chi + \beta.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 m_z \dot{v} &= -R_z(v, \zeta) + P \sin \kappa + (T_{z1} - F_z) \cos \zeta - (T_{y1} - F_y) \sin \zeta, \\
 m_y v \dot{\kappa} &= R_y(v, \zeta, \theta) + P \cos \kappa + (T_{y1} - F_y) \cos \zeta + (T_{z1} - F_z) \sin \zeta, \\
 J_{xx} \ddot{\theta} &= M_0 \sin \theta + M_x(v, \zeta, \theta) + M_{x1}, \\
 \dot{Z} &= v \cos \kappa, \quad \dot{Y} = -v \sin \kappa, \quad \theta = \kappa - \zeta.
 \end{aligned}$$

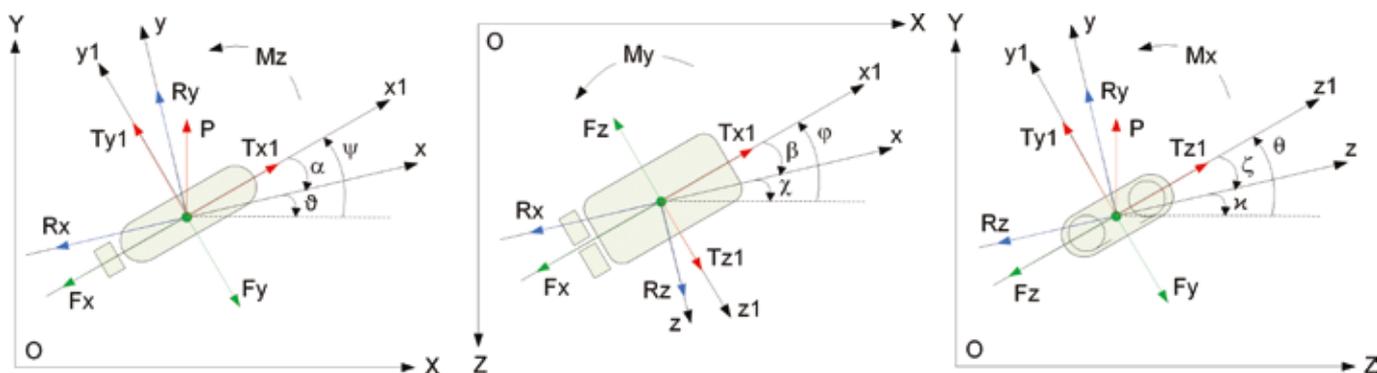


Рис. 2. Схема действия сил в связанной системе координат для модели ГНПА

В уравнениях (1) используются обозначения, принятые в работах [1–4], в частности: OXYZ – инерциальная (полигонная система координат); $Ax_1y_1z_1$ – система координат, связанная с аппаратом; $Axyz$ – скоростная (поточная) система координат, помещенная в центре масс аппарата и ориентированная осью Ax по вектору скорости v ; $m_x, m_y, m_z, J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}$ – массы и моменты инерции аппарата с учетом присоединенных масс и моментов инерции жидкости; $T_{x1}, T_{y1}, T_{z1}, M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}$ – управляющие силы и моменты движительно-рулевого комплекса в связанной системе координат; ϑ, χ, κ – углы подъема, поворота и наклона траектории; φ, ψ, θ – углы курса, дифферента и крена аппарата; α, β, ζ – углы атаки, дрейфа и скольжения; $R_x, R_y, R_z, M_x, M_y, M_z$ – гидродинамические силы и моменты; F_x, F_y, F_z – проекции результирующей силовой воздействия кабеля связи на оси связанной системы координат; $M_0 = \gamma V_a h_o$ – момент остойчивости; γ – удельный вес жидкости; V_a – объемное водоизмещение аппарата; h_o – метацентрическая высота; $P = \gamma V_a - G_a$ – остаточная плавучесть аппарата, где G_a – вес аппарата на воздухе.

Гидродинамические силы и моменты, обусловленные вязкостью жидкости, принято представлять в виде суммы позиционных и демпфирующих составляющих [2, 3]:

$$\begin{aligned}
 R_x(v, \alpha) &= C_x(\alpha) \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} = R_x(1, \alpha) v^2; \\
 R_y(v, \alpha, \psi) &= C_y(\alpha) \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} + C_y^\omega \frac{\rho v}{2} V \dot{\psi} = R_y(1, \alpha) v^2 + C_y^\omega \frac{\rho v}{2} V \dot{\psi}; \\
 R_z(v, \beta, \dot{\phi}) &= C_z(\beta) \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} + C_z^\omega \frac{\rho v}{2} V \dot{\phi} = R_z(1, \beta) v^2 + C_z^\omega \frac{\rho v}{2} V \dot{\phi}; \\
 M_x(v, \zeta, \dot{\theta}) &= m_x(\zeta) \frac{\rho v^2}{2} V + C_x^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\theta} = M_x(1, \zeta) v^2 + m_x^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\theta}; \\
 M_y(v, \beta, \dot{\phi}) &= m_y(\beta) \frac{\rho v^2}{2} V + C_y^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\phi} = M_y(1, \beta) v^2 + m_y^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\phi}; \\
 M_z(v, \alpha, \dot{\psi}) &= m_z(\alpha) \frac{\rho v^2}{2} V + C_z^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\psi} = M_z(1, \alpha) v^2 + m_z^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\psi};
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где $R_x(1, \alpha), R_y(1, \alpha), R_z(1, \beta), M_x(1, \zeta), M_y(1, \beta), M_z(1, \alpha)$, – зависимости позиционной составляющей гидродинамических сил и моментов от углов атаки, дрейфа и скольжения при скорости набегающего потока $v = 1$ м/с; $C_x^\omega, C_y^\omega, C_z^\omega, m_x^\omega, m_y^\omega, m_z^\omega$ – демпфирующие коэффициенты.

Для конкретного примера ГНПА в качестве аналога для дальнейших вычислительных экспериментов был принят ГНПА «Freedom ROV» (Oceanering, США), внешний вид которого и 3D-изображение модели показаны на рис. 3.

Параметры модели, представленной в виде трехосного эллипсоида, приведены в табл. 1, причем составляющие масс и моментов инерции с учетом присоединенной жидкости вычислялись по известным формулам гидродинамики [4].

Для определения гидродинамических характеристик модели использовались прикладные программные средства «виртуальной



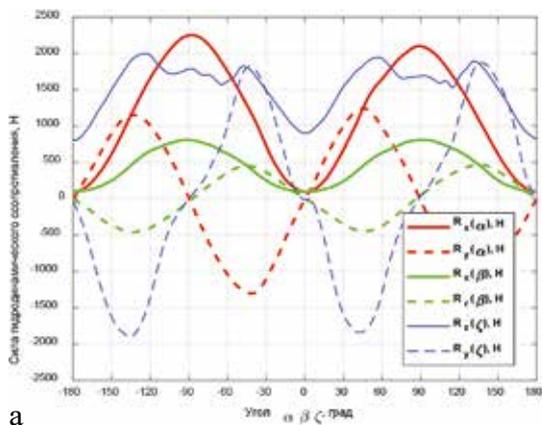
Рис. 3. Внешний вид ГНПА «Freedom ROV» и 3D-изображение его модели

Таблица 1. Параметры модели ГНПА

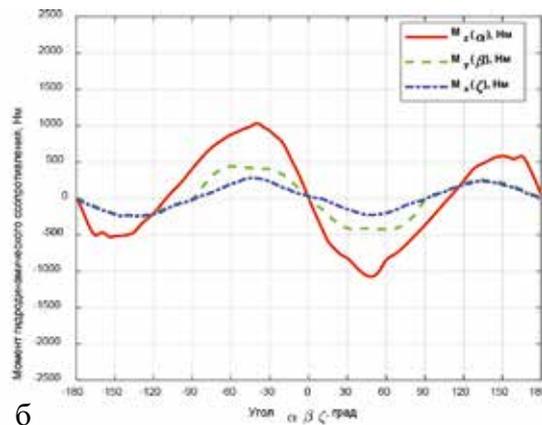
Параметры	Значение
Размеры: длина; ширина; высота, м	4,0; 0,5; 0,8
Объём,	1,79
Площадь поверхности,	21,05
Метацентрическая высота, мм	5
Момент остойчивости, Нм	92
Масса: m_x, m_y, m_z кг	2402 , 4144, 4144
Моменты инерции: J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} кг·м ²	405, 4691, 4691

продувки», позволяющие строить визуализированные картины обтекания тела в поле набегающего потока [5,6]. На рис. 4 приведены зависимости позиционных сил и моментов гидродинамического сопротивления от углов атаки и дрейфа в диапазоне их изменения $\pm 180^\circ$. Для определения демпфирующих сил и моментов модель аппарата вращалась относительно центра масс со скоростью 0,1 рад/с. В результате вычислений с использованием САПР «Solid Works» были получены следующие абсолютные значения для производных этих величин:

$$\begin{aligned}
 R_y^\omega &= 19 \text{ Н}; R_z^\omega = 1,8 \text{ Н}; M_x^\omega = 1,3 \text{ Нм}; \\
 M_y^\omega &= 30,3 \text{ Нм}; M_z^\omega = 87 \text{ Нм}.
 \end{aligned}$$



а



б

Рис. 4. Зависимости позиционных сил (а) и моментов (б) гидродинамического сопротивления

Следует отметить, что составляющие гидродинамического момента являются знакопеременными величинами и меняют знак при углах атаки, крена и дрейфа вблизи $0^\circ, \pm 120^\circ$. Из графиков следует, что аппарат статически устойчив по углам атаки, крена и курса во всем диапазоне их изменения. Это соответствует положению центра гидродинамического давления в корму аппарата относительно его центра масс. В противном случае это может повлечь за собой статическую неустойчивость аппарата, главным образом по углу атаки, и необходимость использования эффективных алгоритмов управления движением в вертикальной плоскости для обеспечения устойчивости движения «в большом» и «в малом».

■ Вычислительная модель

Разработанный стенд моделирования в *Matlab/Simulink*-диаграмме позволяет в ручном и автоматическом режимах управлять моделью ГНПА. Ручной режим предполагает использование контроллера *gamepad* для задания целевых значений управления в бесконечном по времени запуске моделирования. При этом используется модуль «*RealTime Sync*» для синхронизации с реальным временем. Автоматический режим предполагает отработку заданных алгоритмов движения при ограниченном времени на симуляцию, при этом не требуется синхронизация с реальными часами. Данный режим позволяет также управлять

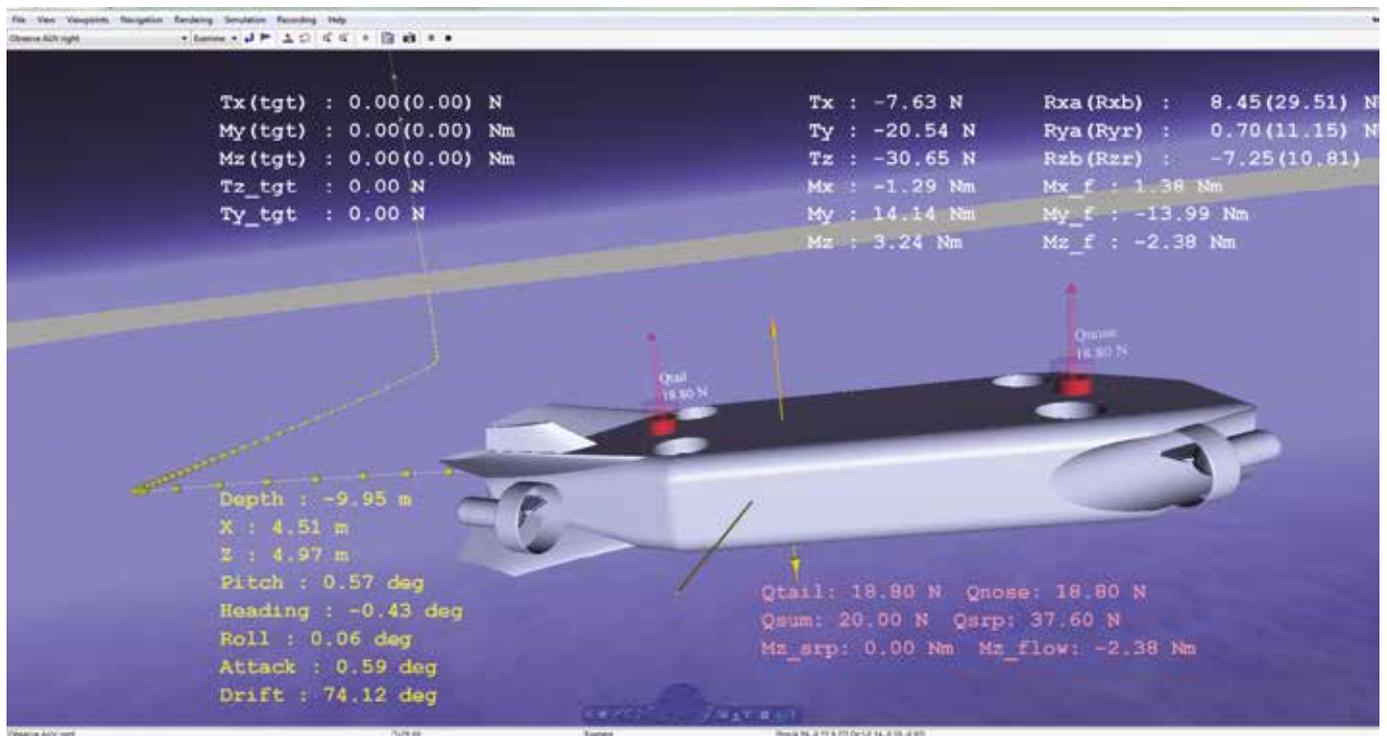
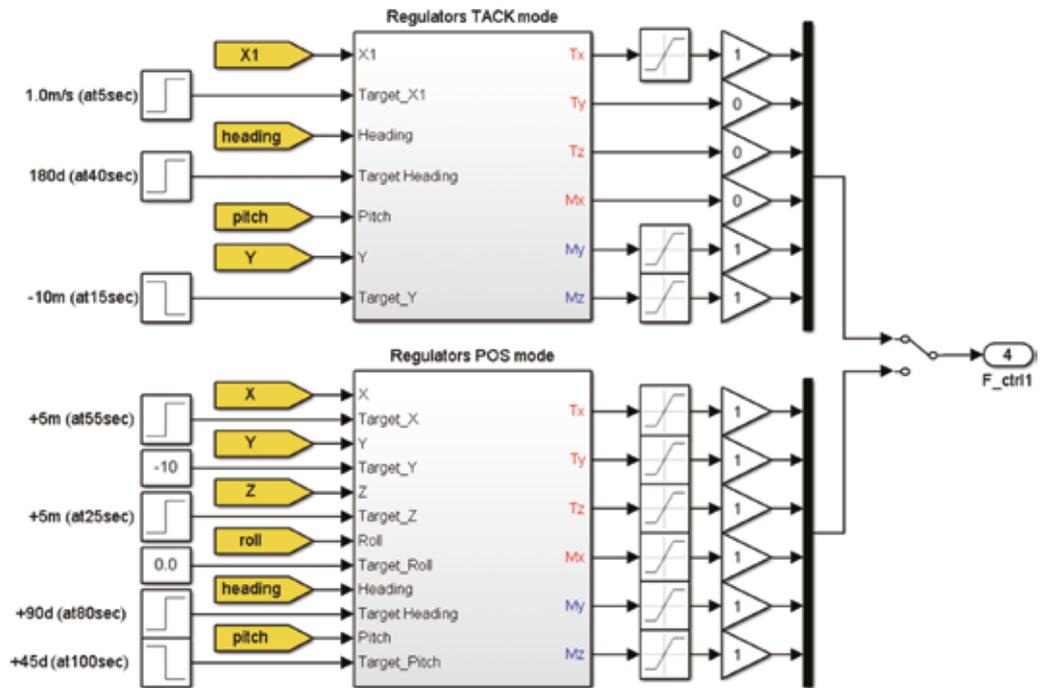


Рис. 5. Окно для визуального отображения поведения модели ГНПА в среде с числовыми параметрами движения. В процессе ручного управления моделью через это окно возможно контролировать целевые параметры

Рис. 6. Модули Simulink. Блоки регуляторов для режимов крейсерского движения и позиционирования



системой регулирования плавучести (СПП) с алгоритмом поведения на основе блока StateFlow.

На рис. 5 приведено окно *VR-инструментария Simulink* для визуализированного представления процессов управления движением. Стенд моделирования состоит из модулей разной степени вложенности, из которых основным является блок динамики с решателями уравнений движения, с моделью гидродинамики и моделью поведения ГНПА на поверхности.

На рис. 6 представлены модули Simulink с блоками регуляторов для режимов крейсерского движения и динамического позиционирования. Дополнительные модули *Simulink* включают регуляторы управления посредством СПП и модуль контроллера для ручного управления. В каждом канале управления используются PD/PID-регуляторы с ограничениями на управляющие воздействия и параметры 6-мерного вектора состояния.

■ Модель динамики движительно-рулевого комплекса (ДРК)

ДРК обеспечивает работу ГНПА как в автономном режиме при выполнении обзорно-поисковых работ, так и в режиме супервизорного управления через кабель связи при динамическом позиционировании над объектом. Рулевые устройства, использующие гидродинамические крылья в качестве исполнительных органов, как известно, имеют низкую

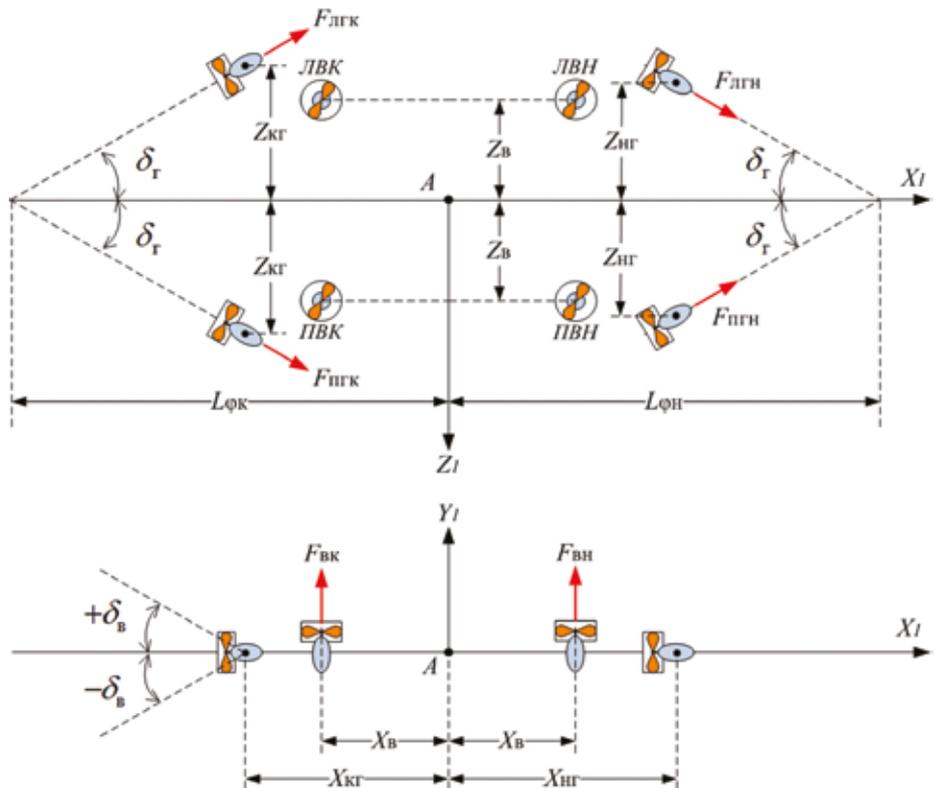


Рис. 7. Компонентная схема ДРК

эффективность при малых скоростях набегающего потока [8]. Эффективность вертикальных подруливающих движителей также может быть недостаточной из-за влияния поперечного набегающего потока [9]. При этом компромиссным решением является использование кормовых маршевых движителей с приводом поворота в вертикальной плоскости, обеспечивающим управление по дифференту во всем диапазоне скоростей хода [10]. На рис. 7 представлена компоновочная схема ДРК, создающего управляющие воздействия по всем степеням свободы аппарата.

Управляющие силы и моменты, соответствующие приведенной схеме, определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} T_x &= [(F_{пгк} + F_{лгк}) \cdot \cos \delta_b + F_{лгн} + F_{пгн}] \cdot \cos \delta_r, \\ T_y &= (F_{пгк} + F_{лгк}) \cdot \sin \delta_b \cdot \cos \delta_r + F_{пвк} + F_{лвк} + F_{лвн} + F_{пвн}, \\ T_z &= (F_{пгк} - F_{лгк} + F_{лгн} - F_{пгн}) \cdot \sin \delta_r, \\ M_x &= (-F_{пгк} + F_{лгк}) \cdot \sin \delta_b \cdot \cos \delta_r \cdot Z_{кг} + (-F_{пвк} + F_{лвк} + F_{лвн} - F_{пвн}) \cdot Z_b, \\ M_y &= (F_{пгк} - F_{лгк}) \cdot \sin \delta_r \cdot L_{\phi_k} + (-F_{лгн} + F_{пгн}) \cdot \sin \delta_r \cdot L_{\phi_n}, \\ M_z &= (F_{пгк} + F_{лгк}) \cdot \sin \delta_b \cdot \cos \delta_r \cdot X_{кг} + (-F_{пвк} - F_{лвк} + F_{лвн} + F_{пвн}) \cdot X_b, \\ L_{\phi_k} &= X_{кг} + Z_{кг} \cdot \text{ctg} \delta_r, \quad L_{\phi_n} = X_{кн} + Z_{кн} \cdot \text{ctg} \delta_r, \end{aligned}$$

где $T_x, T_y, T_z, M_x, M_y, M_z$ – проекции векторов управляющих сил и моментов на оси связанной с аппаратом системы координат (ССК) $AX_1Y_1Z_1$; $F_{пгк}, F_{лгк}, F_{лгн}, F_{пгн}$ – тяги горизонтальной группы движителей; $F_{пвк}, F_{лвк}, F_{лвн}, F_{пвн}$ – тяги вертикальной группы движителей; δ_r – угол установки горизонтальных движителей к продольной оси аппарата AX_1 ; $|\delta_b| \leq \delta_b^{\max} = 30^\circ$ – регулируемый угол поворота кормовой пары горизонтальных движителей; $X_{кг}, Z_{кг}, X_{кн}, Z_{кн}$ – координаты расстановки горизонтальных движителей в ССК; X_b, Z_b – координаты расстановки вертикальных движителей в ССК; L_{ϕ_k}, L_{ϕ_n} – плечо курсового момента кормовых и носовых горизонтальных движителей, соответственно.

Численные значения линейных параметров ДРК в связанной системе координат приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры расстановки движителей ГНПА

$X_{кг}, \text{ м}$	$X_{кн}, \text{ м}$	$X_b, \text{ м}$	$Z_{кг}, \text{ м}$	$Z_{кн}, \text{ м}$	$Z_b, \text{ м}$	$L_{\phi_k}, \text{ м}$	$L_{\phi_n}, \text{ м}$	$\delta_r, \text{ град}$
2,00	1,64	0,93	0,40	0,43	0,36	2,97	2,68	22,5

Декомпозиция управляющих воздействий T_x, M_y, M_z между элементами ДРК в режиме движения с крейсерским ходом (без использования вертикальной группы движителей) соответствует следующим выражениям:

$$\begin{aligned} F_{пгк} &= T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_r \cdot \cos \delta_b)^{-1} + M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r \cdot L_{\phi_k}), \\ F_{лгк} &= T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_r \cdot \cos \delta_b)^{-1} - M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r \cdot L_{\phi_k}), \\ F_{лгн} &= T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_r)^{-1} - M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r \cdot L_{\phi_n}), \\ F_{пгн} &= T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_r)^{-1} + M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r \cdot L_{\phi_n}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{x1}^o &= \begin{cases} T_{x1}^{pez}, & \text{при } |T_{x1}^{pez}| \leq T_{x1}^{\max} \\ T_{x1}^{\max} \cdot \text{sign} T_{x1}^{pez}, & \text{при } |T_{x1}^{pez}| > T_{x1}^{\max} \end{cases}; \\ M_{y1}^o &= \begin{cases} M_{y1}^{pez}, & \text{при } |M_{y1}^{pez}| \leq M_{y1}^{\max} \\ M_{y1}^{\max} \cdot \text{sign} M_{y1}^{pez}, & \text{при } |M_{y1}^{pez}| > M_{y1}^{\max} \end{cases}; \\ M_{z1}^o &= \begin{cases} M_{z1}^{pez}, & \text{при } |M_{z1}^{pez}| \leq M_{z1}^{\max} \\ M_{z1}^{\max} \cdot \text{sign} M_{z1}^{pez}, & \text{при } |M_{z1}^{pez}| > M_{z1}^{\max} \end{cases}; \\ \delta_b &= \begin{cases} \arcsin \frac{M_{z1}^o}{0,5 \cdot T_{x1}^o \cdot \cos \delta_r \cdot X_{кг}}, & \\ \text{при } |\delta_b| \leq \delta_b^{\max} & \\ \delta_b^{\max} \cdot \text{sign} \delta_b, & \text{при } |\delta_b| > \delta_b^{\max} \end{cases}, \end{aligned}$$

где $T_{x1}^{pez}, M_{y1}^{pez}, M_{z1}^{pez}$ – целевые значения управляющих воздействий, сформированные регуляторами движения в режиме крейсерского хода; $T_{x1}^{\max}, M_{y1}^{\max}, M_{z1}^{\max}$ – максимальные значения управляющих воздействий, реализуемые ДРК в режиме крейсерского хода.

Декомпозиция управляющих воздействий $T_{x2}, T_{y2}, T_{z2}, M_{x2}, M_{y2}, M_{z2}$ между элементами ДРК в режиме динамического позиционирования и движения с малым ходом (без использования привода поворота кормовой пары горизонтальных движителей и с использованием вертикальной группы движителей) определяется соотношениями:

$$\begin{aligned} F_{пгк} &= T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_r)^{-1} + T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r)^{-1} + \\ &+ M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r \cdot L_{\phi_k})^{-1}, \\ F_{лгк} &= T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_r)^{-1} - T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r)^{-1} - \\ &- M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r \cdot L_{\phi_k})^{-1}, \\ F_{лгн} &= T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_r)^{-1} + T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r)^{-1} - \\ &- M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r \cdot L_{\phi_n})^{-1}, \\ F_{пгн} &= T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_r)^{-1} - T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r)^{-1} + \\ &+ M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_r \cdot L_{\phi_n})^{-1}, \\ F_{пвк} &= T_{y2}^o / 4 - M_{x2}^o \cdot (4 \cdot Z_b)^{-1} - M_{z2}^o \cdot (4 \cdot X_b)^{-1}, \\ F_{лвк} &= T_{y2}^o / 4 + M_{x2}^o \cdot (4 \cdot Z_b)^{-1} - M_{z2}^o \cdot (4 \cdot X_b)^{-1}, \\ F_{лвн} &= T_{y2}^o / 4 + M_{x2}^o \cdot (4 \cdot Z_b)^{-1} + M_{z2}^o \cdot (4 \cdot X_b)^{-1}, \\ F_{пвн} &= T_{y2}^o / 4 - M_{x2}^o \cdot (4 \cdot Z_b)^{-1} + M_{z2}^o \cdot (4 \cdot X_b)^{-1}, \end{aligned}$$

$$T_{x2}^o = \begin{cases} T_{x2}^{pez}, & \text{при } |T_{x2}^{pez}| \leq T_{x2}^{\max} \\ T_{x2}^{\max} \cdot \text{sign} T_{x2}^{pez}, & \text{при } |T_{x2}^{pez}| > T_{x2}^{\max} \end{cases}$$

$$M_{x2}^o = \begin{cases} M_{x2}^{pez}, & \text{при } |M_{x2}^{pez}| \leq M_{x2}^{\max} \\ M_{x2}^{\max} \cdot \text{sign} M_{x2}^{pez}, & \text{при } |M_{x2}^{pez}| > M_{x2}^{\max} \end{cases}$$

$$T_{y2}^o = \begin{cases} T_{y2}^{pez}, & \text{при } |T_{y2}^{pez}| \leq T_{y2}^{\max} \\ T_{y2}^{\max} \cdot \text{sign} T_{y2}^{pez}, & \text{при } |T_{y2}^{pez}| > T_{y2}^{\max} \end{cases}$$

$$M_{y2}^o = \begin{cases} M_{y2}^{pez}, & \text{при } |M_{y2}^{pez}| \leq M_{y2}^{\max} \\ M_{y2}^{\max} \cdot \text{sign} M_{y2}^{pez}, & \text{при } |M_{y2}^{pez}| > M_{y2}^{\max} \end{cases}$$

$$T_{z2}^o = \begin{cases} T_{z2}^{pez}, & \text{при } |T_{z2}^{pez}| \leq T_{z2}^{\max} \\ T_{z2}^{\max} \cdot \text{sign} T_{z2}^{pez}, & \text{при } |T_{z2}^{pez}| > T_{z2}^{\max} \end{cases}$$

$$M_{z2}^o = \begin{cases} M_{z2}^{pez}, & \text{при } |M_{z2}^{pez}| \leq M_{z2}^{\max} \\ M_{z2}^{\max} \cdot \text{sign} M_{z2}^{pez}, & \text{при } |M_{z2}^{pez}| > M_{z2}^{\max} \end{cases}$$

где $T_{x2}^{pez}, T_{y2}^{pez}, T_{z2}^{pez}, M_{x2}^{pez}, M_{y2}^{pez}, M_{z2}^{pez}$ – целевые значения управляющих воздействий, сформированные регуляторами движения в режиме динамического позиционирования; $T_{x2}^{\max}, T_{y2}^{\max}, T_{z2}^{\max}, M_{x2}^{\max}, M_{y2}^{\max}, M_{z2}^{\max}$ – максимальные значения управляющих воздействий, реализуемые ДРК в режиме динамического позиционирования. Максимальные значения управляющих воздействий ДРК для двух режимов движения аппарата, соответствующие максимальной тяге каждого из двигателей $F_{гд}^{\max} = F_{вд}^{\max} = 500$ Н с фиксированным

ее распределением между конкурирующими каналами управления, сведены в табл. 3.

Ресурс двигателей ДРК распределен между каналами управления следующим образом:

- ресурс горизонтальных двигателей между каналами управления в режиме крейсерского хода – $F_{Tx}^{\GammaД} = 280$ Н, $F_{My}^{\GammaД} = 220$ Н;
- ресурс горизонтальных двигателей между каналами управления в режиме динамического позиционирования – $F_{Tx}^{\GammaД} = 200$ Н, $F_{Tz}^{\GammaД} = 200$ Н, $F_{My}^{\GammaД} = 100$ Н;
- ресурс вертикальных двигателей между каналами управления в режиме динамического позиционирования – $F_{Ty}^{ВД} = 200$ Н, $F_{Mx}^{ВД} = 200$ Н, $F_{Mz}^{ВД} = 100$ Н.

■ Результаты моделирования динамики ГНПА в крейсерском режиме движения и в режиме динамического позиционирования

1. *Крейсерский режим* является стандартным для АНПА при осуществлении типовых программных миссий со стабилизацией глубины и курса с постоянной или переменной скоростью. При этом управляющие воздействия создаются только кормовой парой горизонтальных двигателей и их поворотом в вертикальной плоскости. Для примера задавалось движение, включающее следующие элементы: старт с заданным курсовым углом с начальной скоростью 0,2 м/с и увеличением скорости до 1,0 м/с, отработку рассогласования по глубине 8 м, переход на обратный

Таблица 3. Максимальные значения управляющих воздействий ДРК

Режим движения	Управляющие воздействия ДРК					
	T_x^{\max} , Н	T_y^{\max} , Н	T_z^{\max} , Н	M_x^{\max} , Нм	M_y^{\max} , Нм	M_z^{\max} , Нм
Крейсерский ход (АНПА)	900	0	0	0	950	416
Позиционирование (ГНПА)	740	800	300	288	430	372

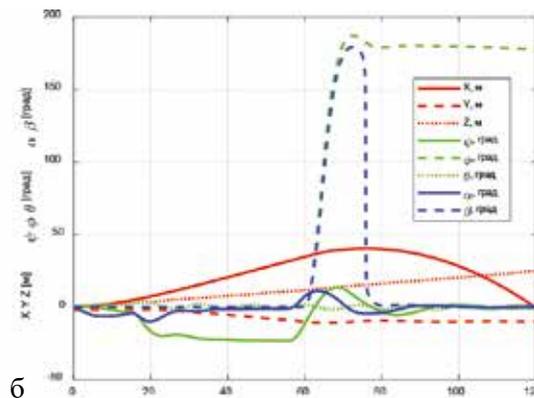
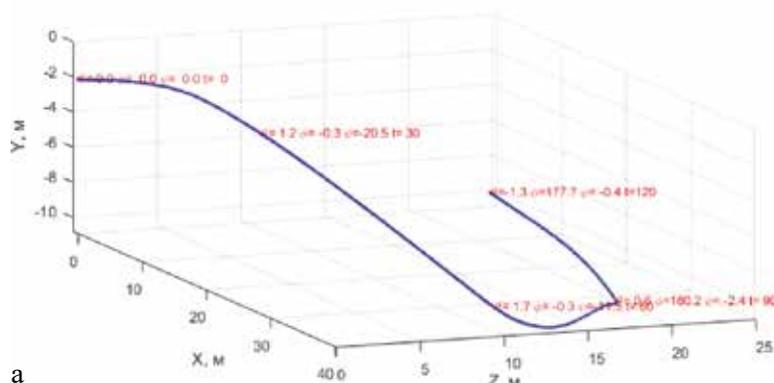


Рис. 8. Крейсерский режим движения: пример пространственной траектории (а), линейные и угловые параметры движения (б)

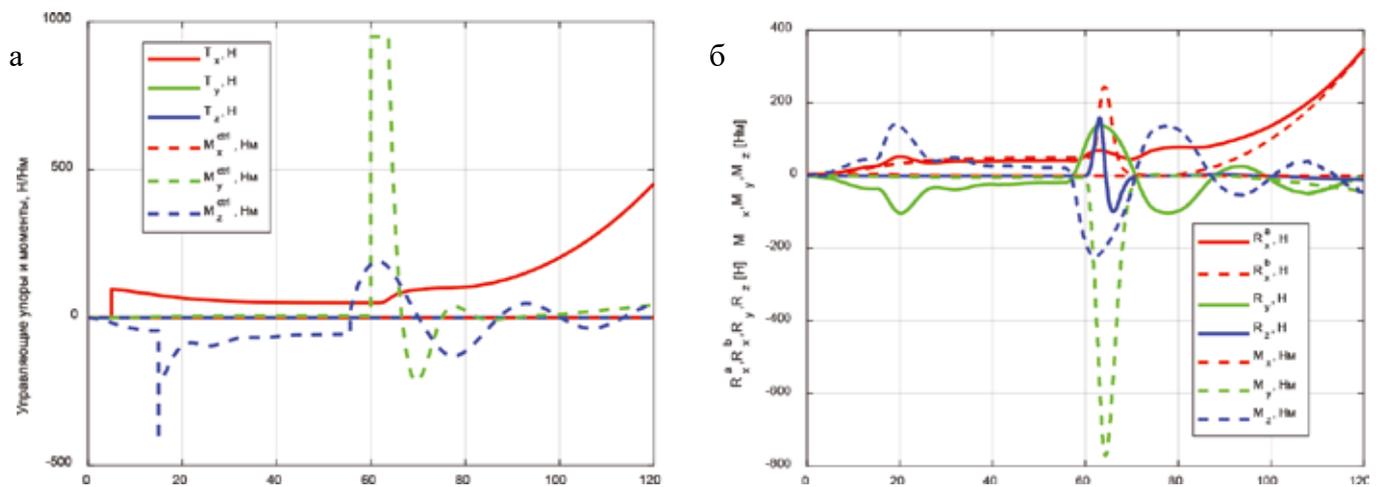


Рис. 9. Крейсерский режим движения: управляющие силы и моменты (а), силы гидродинамического сопротивления (б)

галс. Из внешних возмущений учитывались положительная плавучесть 10 Н и постоянно действующее боковое течение 0,2 м/с. Результаты моделирования движения представлены на рис. 8, 9.

Можно отметить, что динамика ГНПА в режиме крейсерского движения отвечает тем условиям, которые заданы программой движения. Устойчивость движения при отработке заданных рассогласований по курсу и глубине обеспечивается выбором параметров регуляторов, а характеристики маневренности определяются максимальными значениями управляющих усилий.

2. Режим динамического позиционирования является стандартным для ТНПА при осуществлении рабочих операций в окрестностях объекта донной инфраструктуры со стабилизацией углового и линейного положения в условиях действия возмущений от течения и кабеля связи. При этом задействованы все движители ДРК, а кормовая пара горизонтальных движителей фиксируется с нулевым углом поворота. При моделировании динамики аппарата была задана программа движения, включающая последовательно: вертикальное погружение на 8 м, боковое смещение на 5 м, продольное перемещение на 5 м, поворот на

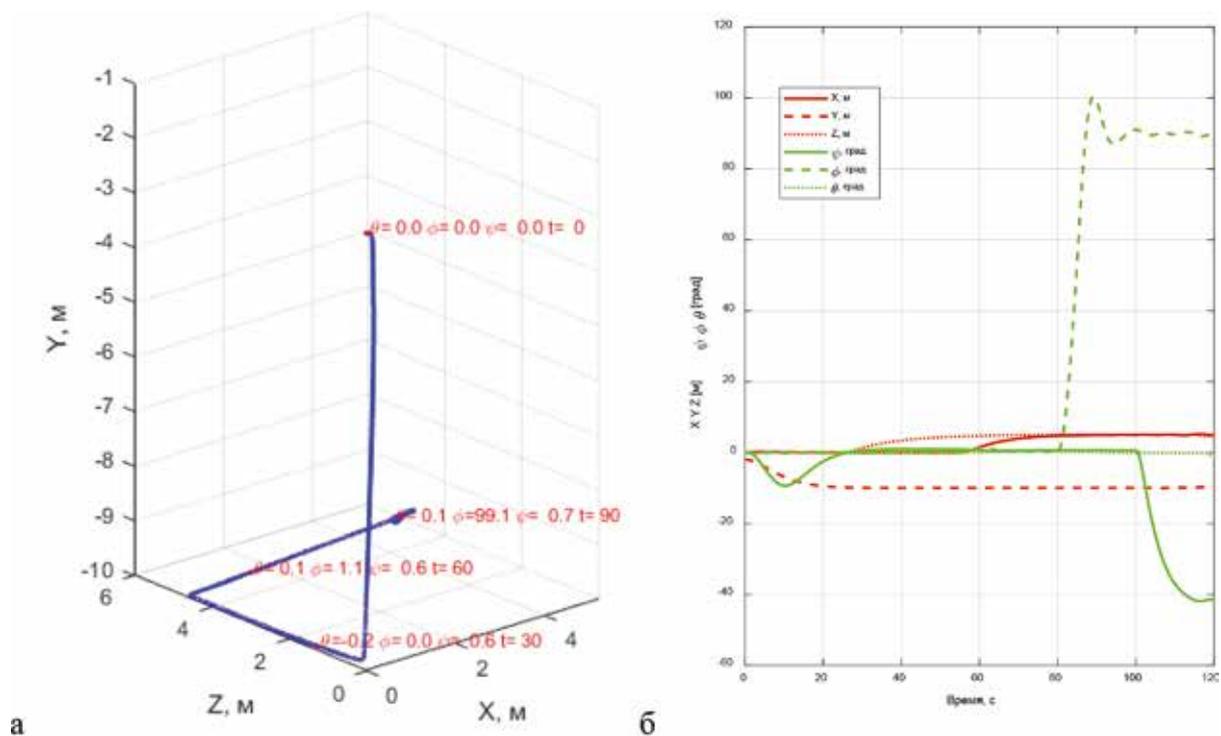


Рис. 10. Режим позиционирования: траектория движения в режиме позиционирования (а), пространственные и угловые параметры движения (б)

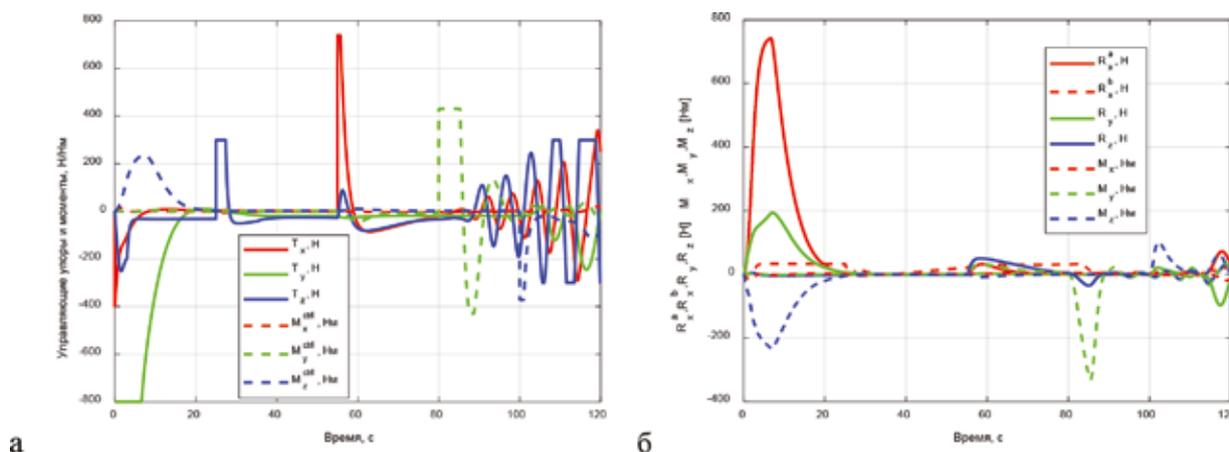


Рис. 11. Режим позиционирования: управляющие силы и моменты (а), силы гидродинамического сопротивления (б)

месте по курсу на 90°, отработка заданного рассогласования по дифференту 45°.

На рис. 10, 11 представлены траектория, параметры движения и возмущающие силы.

Динамические характеристики в режиме позиционирования обусловлены взаимодействием управляющих и возмущающих сил в 3-мерном движении. С учетом переходных процессов по курсу, крену и глубине и действия внешних сил (плавучести и бокового течения) происходит динамическое взаимодействие по всем каналам управления. Так, разворот на месте на 90° и стабилизация дифферента 45° при наличии течения сопровождаются изменением поперечной тяги в виде колебаний с выходом на ограничение. Параметрами регуляторов обеспечивается достаточно быстрое затухание (15–20 с) переходных процессов при отработке начальных рассогласований.

Заключение

Отметим основные положения и результаты работы.

1. Создание ГНПА как нового объекта подводной робототехники приводит к постановке актуальной задачи, связанной с разработкой динамической модели, в которой должны быть отражены функциональные особенности АНПА и ТНПА и их динамические свойства. Перечень основных вопросов разработки включает:

- построение корректной математической модели пространственного движения в типовых обзорно-поисковых режимах и специальных режимах динамического позиционирования при обследовании объектов;

- адаптацию прикладных вычислительных средств комплекса *Simulink* для исследования динамических свойств системы управления ГНПА, применение технологии «виртуальной продувки» для идентификации гидродинамических характеристик ГНПА;

- разработку структуры и математической модели движительно-рулевого комплекса ГНПА, обеспечивающего все многообразие пространственных движений с учетом функциональных особенностей ГНПА;

- оценку динамических свойств ГНПА по результатам вычислительных экспериментов.

2. Результаты исследований и модельных вычислений по перечисленным выше вопросам свидетельствуют о том, что динамика пространственного движения ГНПА, совмещающего в себе функции АНПА и ТНПА, удовлетворяет общим требованиям по маневренности (управляемости), устойчивости по отношению к параметрам вектора состояния и внешним возмущениям. Принятые в динамической модели ГНПА структуры и алгоритмы могут быть взяты за основу при разработке системы управления движением с учетом всех факторов, влияющих на динамику ГНПА. В частности, одним из таких существенных факторов является влияние оптоволоконного кабеля связи при использовании супервизорного режима управления. Исследование этого и других аналогичных вопросов является темой дальнейших исследований.

Работа выполнена по теме госзадания ИПМТ ДВО РАН «Научные исследования и разработки в области новых технологий создания перспективных морских робототехнических комплексов ...», № госрегистрации АААА-А17-117013010055-6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвиенко Ю.В., Костенко В.В., Щербатюк А.Ф., Ремезков А.В. Развитие технологического потенциала автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4(34). С. 4–14.
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М: Наука, 2005. 400 с.
3. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение [отв.ред.Л.В.Киселев], Владивосток: Дальнаука, 2018. 367 с.
4. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Л.: Судостроение, 1973. 511 с.
5. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Медведев А.В. О некоторых задачах динамики и управления пространственным движением АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 13–26.
6. Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 1(13). С. 24–35.
7. Киселев Л.В., Багницкий А.В., Медведев А.В. Идентификация гидродинамических характеристик автономного подводного робота с использованием модельных и экспериментальных данных // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25, № 1 (96). С.78–92.
8. Kiselev L.V., Bagnitskii A.V., Medvedev A.V.. Identification of AUV Hydrodynamic Characteristics Using Model and Experimental Data // Gyroscopy and Navigation. 2017. Vol. 8, No. 3. P. 217–225.
9. An Autonomous Underwater Vehicle using Remote Piloting Technology via 4G Internet. – URL: <https://www.sut.org/wp-content/uploads/2018/06/Aaron-Leather-v2-AUT-Freedom-Rev3-Final-Submission-draft-2-21.10.2019.pdf> (дата обращения: 03.02.2021).
10. Вельтишев В. В. Анализ влияния скошенного потока на рабочие характеристики движителей необитаемых подводных аппаратов // Вест. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2010. №. С. С. 97–106.
11. Пат. 2290338 РФ МПК В63G 8/16, В63Н 20/08. Подводный аппарат повышенной маневренности / Горнак В.Е., Мальцева С.В. – № 2004136450/11, заявл.: 14.12.2004; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36.

Об авторах

Киселев Лев Владимирович, д.т.н., главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: подводная робототехника, автономные и гибридные подводные роботы, системы управления и навигации, динамические модели, траекторное обследование геофизических полей.

Тел.: +7(902)506-16-77

E-mail: levkiselev1@yandex.ru, kiselev@marine.febras.ru

ORCID ID: 0000-0001-9312-9708

Костенко Владимир Владимирович, к.т.н., заведующий лабораторией исполнительных устройств и систем телеуправления, ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: Подводная робототехника, системы управления движением, движительно-рулевые комплексы, динамические модели, буксируемые системы.

Тел.: +7 (984) 145-43-85

E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru

SPIN-код: 2310-3141

ORCID ID: 0000-0002-3821-3787

Resercher ID: AAF-6399-2021

Scopus ID: 57189036440

Медведев Андрей Владимирович – старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: подводная робототехника, вычислительные системы и модели, динамика систем управления, гидродинамика подводных роботов.

Тел.: +7(914)708-10-14

E-mail: auv@list.ru

ORCID ID: 0000-0001-5678-8966

Для цитирования:

Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ГИБРИДНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 1(35). С. 18–30. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_02

SPECIFIC FEATURES OF A HYBRID UNDERWATER VEHICLE MOTION DYNAMIC MODEL

L.V. Kiselev, V.V. Kostenko, A.V. Medvedev

When creating hybrid uninhabited underwater vehicle (HUV), one of the main problems is to ensure the specified dynamic properties, taking into account the features of design and the variety of spatial motion modes. To solve this problem, a dynamic model is being developed based on combining the functions of autonomous and remotely controlled underwater vehicles (AUV / ROV). The main elements in the model structure are: a mathematical model of spatial motion with 6-degrees of freedom, computing means of "virtual hydrodynamics", adaptive motion controllers, a combined propulsion and steering system, and an external environment model. The research task is to determine the parameters of the mathematical model (hydrodynamic characteristics, control and disturbing forces, hydrodynamic drag forces, propulsion and maneuvering characteristics of the vehicle) in the cruising and positioning modes. The HUV "Freedom ROV" (Oceanering, USA) was adopted as a prototype of the HUV for the choice of the geometric shape and basic design parameters. As a result of computational experiments, estimates of the HUV dynamic parameters are obtained, which indicate its performance in the implementation of complex motion modes with the interaction of the entire functional elements. As a consequence, this allows us to develop optimal recommendations for the structure and characteristics of the HUV multitasking information and control system when performing a wide class of underwater technical work.

Key words: autonomous, remotely controlled, hybrid uninhabited underwater vehicle (AUV, ROV, HUV), dynamic and computational models, motion control, hydrodynamics, propulsion and steering systems.

References

1. Matvienko Yu.V., Kostenko V.V., Scherbatyuk A.F., Remezkov A.V. Development of the technological potential of autonomous underwater vehicles. Underwater investigations and robotics. 2020. No. 4(34). P. 4–14.
2. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. and other. *Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tehnologii* [Autonomous underwater robots: systems and technologies]. Moscow: Nauka, 2005. 400 p.
3. Inzartzev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Scherbatyuk A.F. *Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tehnologii, primenenie* [Underwater robotic systems: systems, technologies, application]. *Otv. red: L.V. Kiselev*. Vladivostok: Dalnauka, 2018, 367 p.
4. Vojtkunskij Ja.I., Pershits R.Ja., Titov I.A. *Spravochnik po teorii korablja* [Handbook of ship theory]. L.: Sudostroenie, 1973. 511 p.
5. Kiselev L.V., Inzartzev A.V., Medvedev A.V. On some problems of dynamics and control of spatial motion of the AUV. Underwater investigations and robotics, 2006. No. 2. P. 13–26.
6. Kiselev L.V., Medvedev A.V. *Sravnitel'nyj analiz i optimizacija dinameskikh svoystv avtonomnykh podvodnykh robotov razlichnykh proektov i konfiguracij* [Comparative analysis and optimization of the dynamic properties of autonomous underwater robots of various designs and configurations]. Underwater investigations and robotics, 2012. No. 1(13). P. 24–35.
7. Kiselev L.V., Bagnickij A.V., Medvedev A.V. *Identifikacija gidrodinameskikh harakteristik avtonomnogo podvodnogo robota s ispol'zovaniem model'nyh i jeksperimental'nyh dannyh* [Identification of hydrodynamic characteristics of an autonomous underwater robot using model and experimental data]. *Girokopiya i navigacija* [Gyroscopy and Navigation]. 2017. Vol. 25. No. 1 (96). P. 78–92.
8. Kiselev L. V., Bagnitckii A. V., Medvedev A. V. Identification of AUV Hydrodynamic Characteristics Using Model and Experimental Data. *Girokopiya i navigacija* [Gyroscopy and Navigation], 2017. Vol. 8, No. 3. P. 217–225.
9. An Autonomous Underwater Vehicle using Remote Piloting Technology via 4G Internet. – URL: <https://www.sut.org/wp-content/uploads/2018/06/Aaron-Leather-v2-AUT-Freedom-Rev3-Final-Submission-draft-2-21.10.2019.pdf> (usage date: 03.02.2021).
10. Veltishhev V.V. *Analiz vlijaniya skoshennogo potoka na rabochie harakteristiki dvizhitelej neobitaemykh podvodnykh apparatov* [Analysis of the effect of a canted stream on the operating characteristics of the propulsion devices of unmanned underwater vehicles]. *Vest. MGTU im. N.Je. Bauman*. *Seriya: Mashinostroenie*. 2010. No. S. P. 97–106.
11. Gornak V.E., Malceva S.V. *Podvodnyj apparat povyshennoj manevrennosti* [High maneuverability underwater vehicle] patent RF No. 2290338, Bul. No. 17 at 20.06.2011.

Recommended citation:

Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V. SPECIFIC FEATURES OF A HYBRID UNDERWATER VEHICLE MOTION DYNAMIC MODEL. Underwater Investigation and Robotics. 2021. No. 1(35). P. 18–30. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_02

About the authors

KISELEV Lev Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences.
Chief Researcher.
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences
Address: 5a Sukhanova st., Vladivostok, Russia
Research interests: underwater robotics, autonomous and hybrid
underwater robots, control and navigation systems, dynamic
models, trajectory survey of geophysical fields.
Phone: +7(902)506-16-77
E-mail: levkiselev1@yandex.ru, kiselev@marine.febras.ru
ORCID ID: 0000-0001-9312-9708

KOSTENKO Vladimir Vladimirovich, Leading Researcher PhD
in Engineering Science, Head of Laboratories,
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences
Address: 5a Sukhanova st., Vladivostok, Russia
Research interests: Underwater robotics, motion control systems,
propulsion and steering systems, dynamic models, towed systems.
Phone: +7 (984) 145-43-85
E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru
SPIN-код: 2310-3141
ORCID ID: 0000-0002-3821-3787
Resercher ID: AAF-6399-2021
Scopus ID: 57189036440

MEDVEDEV Andrey Vladimirovich, senior researcher
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences
Address: 5a Sukhanova st., Vladivostok, Russia
Research interests: underwater robotics, computing systems
and models, dynamics of control systems, hydrodynamics of
underwater robots.
Phone: +7(914)708-10-14
E-mail: auv@list.ru
ORCID ID: 0000-0001-5678-8966

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПРОВОДКИ СУДОВ ЧЕРЕЗ ЗАМИНИРОВАННЫЙ РАЙОН

В.С. Быкова, А.И. Машошин, И.В. Пашкевич

Приведено описание алгоритмов маневрирования автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) при проходе через заминированный район и при обеспечении прохода судна через заминированный район. Обе задачи решаются путём обнаружения мин разных типов с использованием гидроакустических и магнитометрических средств поиска и классификации подводных объектов и их обхода на безопасном расстоянии. Классификация обнаруженных подводных объектов осуществляется на классы «миноподобный объект» и «прочие объекты». Использование класса «миноподобный объект», который включает как собственно мины, так и объекты, не отличимые от мин, на дистанциях их обнаружения средствами поиска мин позволяет не сближаться с обнаруженными подводными объектами на дистанцию их уверенной классификации с использованием высокочастотной гидроакустической и телевизионной аппаратуры и тем самым повысить безопасность АНПА и сократить время прохода через заминированный район. Алгоритм проводки судна (судов) через заминированный район учитывает тот факт, что минимальная дистанция безопасного сближения типового судна с миной многократно превышает дистанции обнаружения мин разных типов, что не позволяет АНПА найти безопасный для судна проход через заминированный район путём его однократного пересечения и требует сложного маневрирования АНПА. Кроме того, учитываются ошибки позиционирования АНПА и судна. Алгоритмы предназначены для реализации в системе управления АНПА.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, морская мина, средства поиска морских мин, маневрирование АНПА при проходе через заминированный район.

Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством исследования и освоения океана [1, 2]. Также они широко применяются в военных целях [3–5].

Одной из задач, возлагаемых на АНПА, является борьба с минной опасностью [3–6], которая включает:

- поиск и уничтожение мин в заминированном районе;
- обеспечение собственной безопасности при проходе через заминированный район либо при работе в этом районе;
- обеспечение проводки судов (включая подводные лодки) через заминированный район.

Минная опасность на море возникает как следствие войн, локальных конфликтов и угрозы их возникновения. Ввиду этого борьба с минной опасно-

стью актуальна как в военное время, так и в мирное время после завершения конфликтов либо угрозы их возникновения.

Для борьбы с минной опасностью традиционно использовались тральщики. Однако ввиду изобретения мин, устойчивых к тралению, в последние десятилетия на их место пришли противоминные корабли, которые, не отказываясь от траления, ориентированы в первую очередь на поиск и уничтожение отдельных мин [7].

Современные морские мины делятся на плавающие, якорные, донные и заиленные (самозакапывающиеся в грунт) [8, 9]. Разновидностью донных мин являются мины-торпеды. Наибольшую трудность вызывает обнаружение донных и заиленных мин, но ещё большую сложность вызывает их классификация, поскольку их трудно отличить от разнообраз-

ных донных и заиленных объектов естественного и искусственного происхождения.

Морские мины оснащены взрывателями, реагирующими на изменение гидроакустического, магнитного либо сейсмического поля. Для надёжности срабатывания мины, как правило, оборудуются несколькими типами взрывателей одновременно.

Для поиска и классификации якорных и донных мин применяются высокочастотные гидролокаторы (в частности, вперёдсмотрящие гидролокаторы, многолучевые эхолоты, гидролокаторы бокового обзора), магнитометры и телевизионная аппаратура [10,11]. Поиск заиленных мин осуществляется низкочастотными гидролокаторами (профилографами) и магнитометрами [12]. Учитывая, что заранее, как правило, неизвестно, какие мины установлены в районе, приходится одновременно осуществлять поиск всех типов мин с применением комплекса поисковой аппаратуры.

Поскольку дальность эффективного обнаружения и классификации донных и заиленных мин лежит в пределах от десятков до сотен метров, необходимо, чтобы носители технических средств их поиска и классификации двигались в непосредственной близости от дна. Для этого современные противоминные корабли оснащаются телеуправляемыми и буксируемыми подводными аппаратами, заглубляемыми на нужную глубину.

АНПА можно рассматривать в качестве дальнейшего развития средств борьбы с минной опасностью, поскольку они имеют ряд преимуществ перед противоминными кораблями:

- исключают гибель людей при взрыве мины;
- обладают более низким уровнем физических полей, на которые реагируют взрыватели морских мин;
- способны маневрировать на оптимальной глубине для поиска и классификации мин.

Ввиду этого создание специализированных АНПА для борьбы с минной опасностью весьма актуально.

Для уничтожения мин применяются специальные маломощные заряды, которые устанавливаются вблизи от мин и взрываются по команде, передаваемой по гидроакустическому каналу. В этом случае функции АНПА, осуществляющего поиск и классификацию мин, ограничиваются установкой акустического маяка в месте расположения обнаруженной мины, по которому наводится АНПА – уничтожитель мин.

Вопросам обнаружения и классификации якорных и донных мин посвящено большое число публикаций, например, [13–27], из анализа которых можно

сделать вывод, что на сегодняшний день наиболее эффективными методами решения задачи являются использование гидролокаторов с синтезированной апертурой и применение нейросетевых алгоритмов с глубоким обучением. Публикации, посвящённые поиску заиленных мин, достаточно редкие.

При поиске мин самой сложной задачей является их классификация, которая должна отличить мину от разнообразных малогабаритных донных предметов естественного и искусственного происхождения. Для надёжной классификации мин применяются либо очень высокочастотные гидролокаторы с рабочей частотой в районе одного мегагерца, либо телекамеры. В качестве классификационных признаков мин используются: их геометрический размер, отстояние от дна, характерная форма, эквивалентный радиус, акустическая жёсткость. Эффективным методом классификации мин является регулярное обновление карты расположения донных объектов в назначенном районе с выявлением новых донных объектов и их углублённой классификацией.

Для надёжной классификации мин необходимо сближение с обнаруженным объектом на расстояние в десятки метров и обход вокруг него, что, с одной стороны, небезопасно, а с другой стороны, требует большого времени. При решении задачи классификации с целью уничтожения мин такие процедуры необходимы. В задачах, не связанных с уничтожением мин, вводится класс «миноподобный объект», включающий мины и объекты, неотличимые от мин на дистанциях их обнаружения. Это позволяет не сближаться с обнаруженными объектами на дистанцию их уверенной классификации. Заметим, что при отнесении обнаруженного объекта к классу «миноподобный объект» должны приниматься такие же действия, как и при обнаружении мины.

Для решения перечисленных выше задач борьбы с минной опасностью система управления АНПА должна обеспечить соответствующее маневрирование. Вопросы маневрирования АНПА при решении различных задач рассмотрены в значительном числе работ, например [1, 28, 29]. При решении задачи поиска и уничтожения мин в заминированном районе, если известны только границы района, выбор способа маневрирования трудностей не вызывает: им может быть любой способ, описанный в литературе и обеспечивающий просмотр всей площади района, например, движение параллельными галсами (по мандру) с расстоянием между галсами, равным ширине просматриваемой полосы.

При проходе АНПА через заминированный район и при проводке судов через него требуется более

сложное маневрирование. Найти его описание в доступных публикациях не удалось. Ввиду этого целью работы является описание разработанных авторами алгоритмов маневрирования АНПА при решении этих двух задач.

1. Алгоритм маневрирования АНПА при проходе через заминированный район

Пусть АНПА должен пересечь район, в котором, предположительно, установлены мины, заданным генеральным курсом $K_{AUV/gen}$.

На АНПА, оборудованный средствами автономной навигации, установлены гидроакустические средства обнаружения мин всех типов, обеспечивающие гарантированную (т.е. минимальную) дистанцию обнаружения мины D_{det} .

Классификация обнаруженных объектов должна осуществляться на классы «миноподобный объект» и «не мина». (Для краткости изложения в дальнейшем миноподобный объект будем называть миной).

Предполагается, что физические поля АНПА таковы, что приближение АНПА к мине на дистанцию её обнаружения D_{det} (но не менее) безопасно для АНПА.

Алгоритм управления маневрированием АНПА должен обеспечивать пересечение района, минимально отклоняясь от генерального курса.

Выполнение данного критерия означает следующее:

- при входе в район АНПА движется заданным генеральным курсом;
- при обнаружении мины АНПА обходит её, не приближаясь к ней. Направление обхода выбирается из условия минимального времени обхода;
- после обхода мины АНПА ложится на генеральный курс.

Иллюстрация реализации данного алгоритма приведена на рис. 1. Рис. 1, а показывает случай расположения мин на значительном удалении друг

от друга. Однако возможны случаи, когда мины находятся в непосредственной близости друг от друга и образуют так называемые ловушки, для преодоления которых требуется более сложное маневрирование АНПА. Пример такой ловушки изображён на рис. 1, б. АНПА обнаруживает 1-ю мину и начинает её обходить. При обходе обнаруживает 2-ю мину и при её обходе обнаруживает 3-ю мину, обходить которую приходится курсом, обратным генеральному курсу. Заметим, что при обнаружении 2-й мины напрашивается выбор курса, обеспечивающего проход между 1-й и 2-й минами. Однако такой курс нарушает условие не приближаться к обнаруженной мине.

Заметим, что при самостоятельном проходе АНПА через заминированный район не предъявляются высокие требования к точности навигации АНПА, поскольку реализуется простое правило маневрирования: обнаружив мину, сразу поверни на курс, перпендикулярный линии пеленга на неё.

2. Алгоритм маневрирования АНПА при проводке судна через заминированный район

Более сложной задачей является проводка судов (включая подводные лодки) через заминированный район. Традиционно эта задача решалась при помощи тральщика, который двигался впереди, буксируя трал [30, 31]. Однако с некоторых пор такой способ проводки стал неэффективным ввиду создания тралостойчивых мин и существенного увеличения радиуса их реагирования. Поэтому в настоящее время единственным способом проводки судов через заминированный район является обнаружение мин, установленных в районе, и прокладка маршрута судна на безопасном расстоянии от них. Рассмотрим решение этой задачи с использованием АНПА.

Перед АНПА, оборудованным средствами высокоточной автономной навигации и средствами обнаружения мин различных типов, стоит задача най-

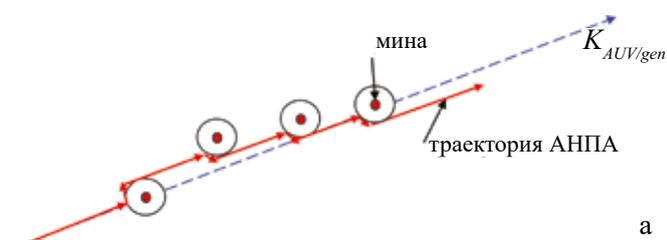


Рис. 1. Траектория движения АНПА при проходе через заминированный район (окружности вокруг мин показывают дистанцию её обнаружения гидроакустическими средствами АНПА)

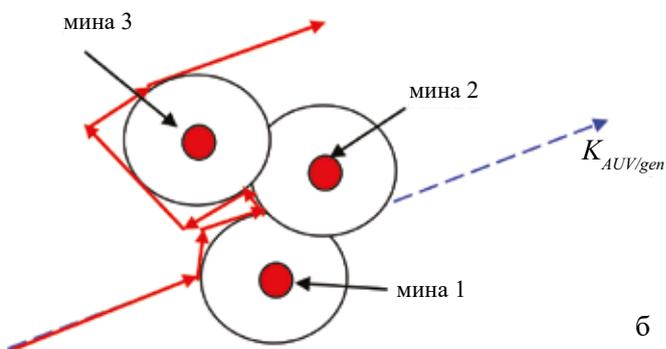
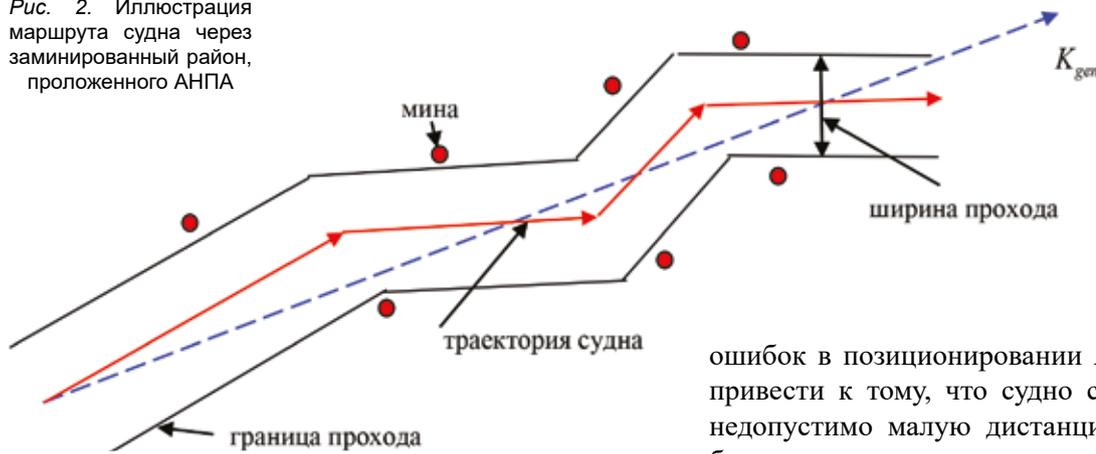


Рис. 2. Иллюстрация маршрута судна через заминированный район, проложенного АНПА



ти безопасный для проводимого судна проход через заминированный район шириной W , превышающей удвоенную минимально допустимую дистанцию приближения судна кmine R_{dop} . При этом судно должно минимально отклоняться от заданного генерального курса K_{gen} (рис. 2).

При разработке алгоритма маневрирования АНПА в этом случае необходимо учесть следующие факторы.

1. Минимально допустимая дистанция приближения судна кmine R_{dop} , как правило, существенно (до десяти раз и более) превышает гарантированную дистанцию обнаружения мины D_{det} . Данный фактор значительно усложняет алгоритм маневрирования АНПА, поскольку не позволяет найти безопасный проход через заминированный район путём однократного прохода АНПА по нему. АНПА вынужден искать проход, осматривая его на всю ширину, двигаясь галсами, перпендикулярными заданному генеральному курсу судна.

2. Существенными факторами, влияющими на безопасность проводки судна, являются точность прокладки маршрута, зависящая от точности позиционирования АНПА в процессе прокладки, и точность движения судна по этому маршруту, определяемая точностью позиционирования судна в процессе движения через заминированный район. Наличие

ошибок в позиционировании АНПА и судна может привести к тому, что судно сблизится с миной на недопустимо малую дистанцию и подорвётся. Избежать этого можно, если минимально допустимую дистанцию приближения судна кmine R_{dop} увеличить на сумму предельных ошибок позиционирования АНПА ($\Delta R_{max/AUV}$) и судна ($\Delta R_{max/ship}$), т.е.

$$R_{min} = R_{dop} + \Delta R_{max/AUV} + \Delta R_{max/ship}, \quad (1)$$

где R_{min} – минимально допустимая дистанция приближения судна кmine с учётом ошибок позиционирования АНПА и судна.

Тогда ширину искомого прохода через район можно рассчитать по формуле:

$$W = 2 \cdot R_{min} \quad (2)$$

При этом предельные ошибки позиционирования АНПА и судна должны рассчитываться с учётом характеристик их инерциальных навигационных систем и лага, характеристик течения, времени нахождения в районе, возможности выполнения обсервации в процессе прохода через район.

В результате взаимодействие АНПА с проводимым судном выглядит следующим образом. При подходе к заминированному району судно стопорит ход, спускает на воду АНПА и ложится в дрейф в ожидании завершения работы АНПА по поиску безопасного прохода. АНПА согласует свои координаты с координатами судна и начинает маневрировать в поисках

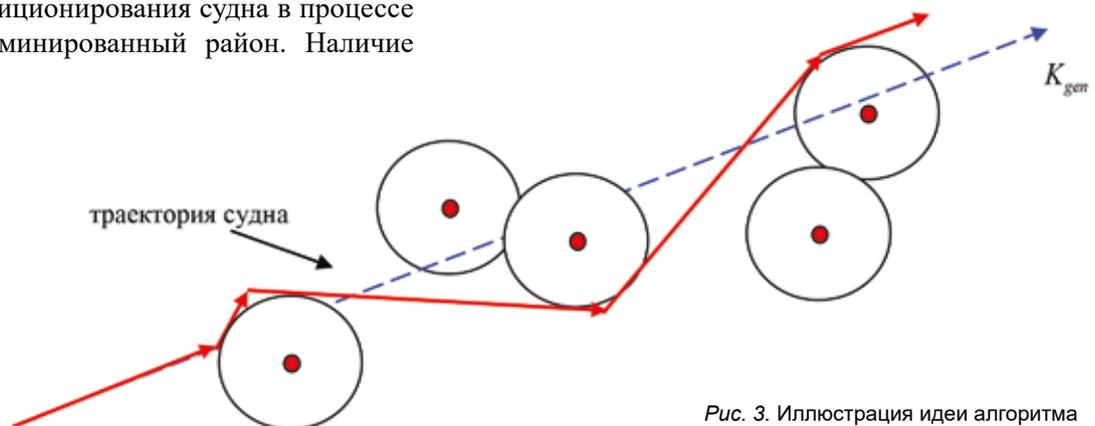


Рис. 3. Иллюстрация идеи алгоритма

прохода для судна, удовлетворяющего приведённым выше требованиям. По завершении построения прохода АНПА всплывает на поверхность, ложится в дрейф и по радио сообщает на судно координаты обнаруженных мин и траекторию движения судна через заминированный район. Судно, получив эту информацию, начинает движение по траектории, полученной от АНПА. Выйдя из заминированного района, судно берёт АНПА на борт. Если заминированный район достаточно велик, проход судна через него может быть организован в несколько этапов с реализацией на каждом этапе описанного взаимодействия между судном и АНПА.

Идея алгоритма маневрирования АНПА в рассматриваемом случае состоит в том, чтобы проложить кратчайший маршрут судна, при котором судно не приближается к минам на расстояние, меньшее чем R_{min} . Эта идея проиллюстрирована на рис. 3, на котором радиусы окружностей, построенных вокруг мин, равны D_{det} (меньшей) и R_{min} (большой).

Рассмотрим, как должен маневрировать АНПА при прокладке маршрута, изображённого на рис. 3. Для начала подробно рассмотрим маневрирование АНПА до и после обнаружения первой мины (рис. 4). Обозначения на рис. 4: пунктирная линия изображает генеральный курс судна, чёрные сплошные линии – границы прохода, синяя линия – траектория АНПА, красная линия – траектория судна, красная точка – мина, радиус меньшей окружности равен дистанции обнаружения мины, радиус большей окружности – минимально допустимой дистанции между судном и миной с учётом возможных ошибок позиционирования АНПА и судна R_{min} .

В точке t_0 АНПА начинает движение галсами, перпендикулярными заданному генеральному курсу прохода через район (синяя линия). Длина каждого галса равна заданной ширине прохода за вычетом удвоенной минимальной дис-

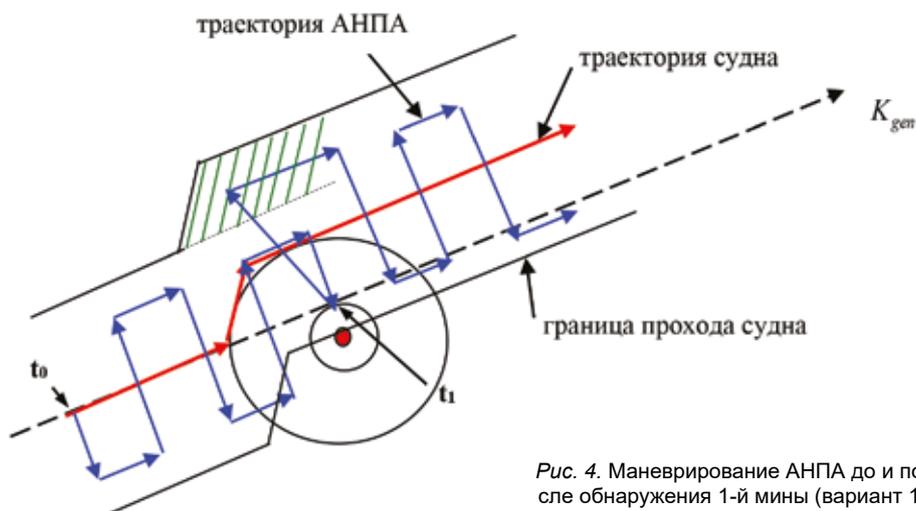


Рис. 4. Маневрирование АНПА до и после обнаружения 1-й мины (вариант 1)

танции обнаружения мины D_{det} . Расстояние между галсами равно удвоенной минимальной дистанции обнаружения мины. Одновременно с движением система управления АНПА строит траекторию движения судна (красная линия).

В точке t_1 АНПА, находясь от первой мины на дистанции её обнаружения, обнаруживает её. Система управления АНПА строит маршрут обхода судном обнаруженной мины, состоящий из двух галсов, проведённых по касательным к окружности большего радиуса. Причём курс, соответствующий первому галсу, перпендикулярен линии пеленга на обнаруженную мину, а курс, соответствующий второму галсу, равен генеральному курсу судна. Одновременно с маршрутом обхода система управления строит границы прохода в процессе обхода мины. Далее система управления АНПА проверяет, вся ли площадь прохода обследована на предмет наличия мин. В результате проверки устанавливает, что заштрихованная зелёным цветом

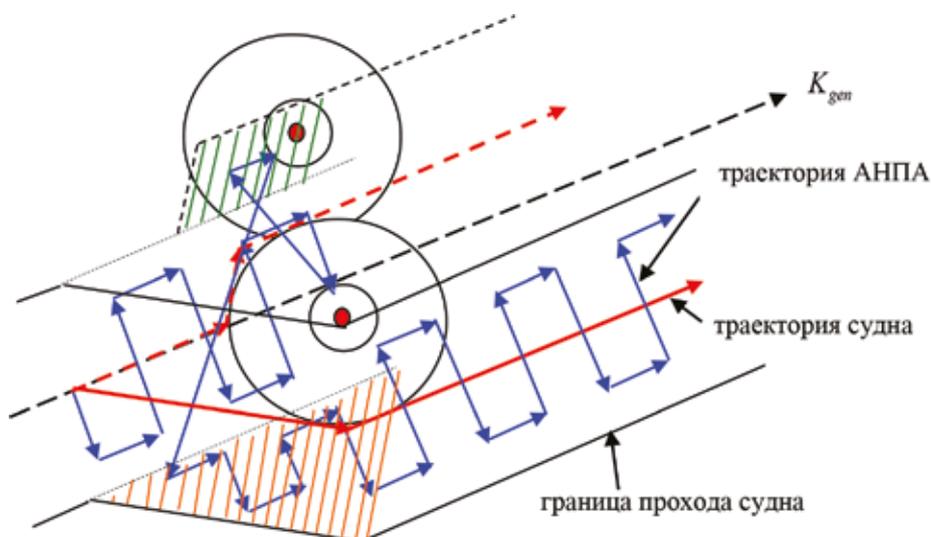


Рис. 5. Маневрирование АНПА до и после обнаружения 1-й мины (вариант 2)

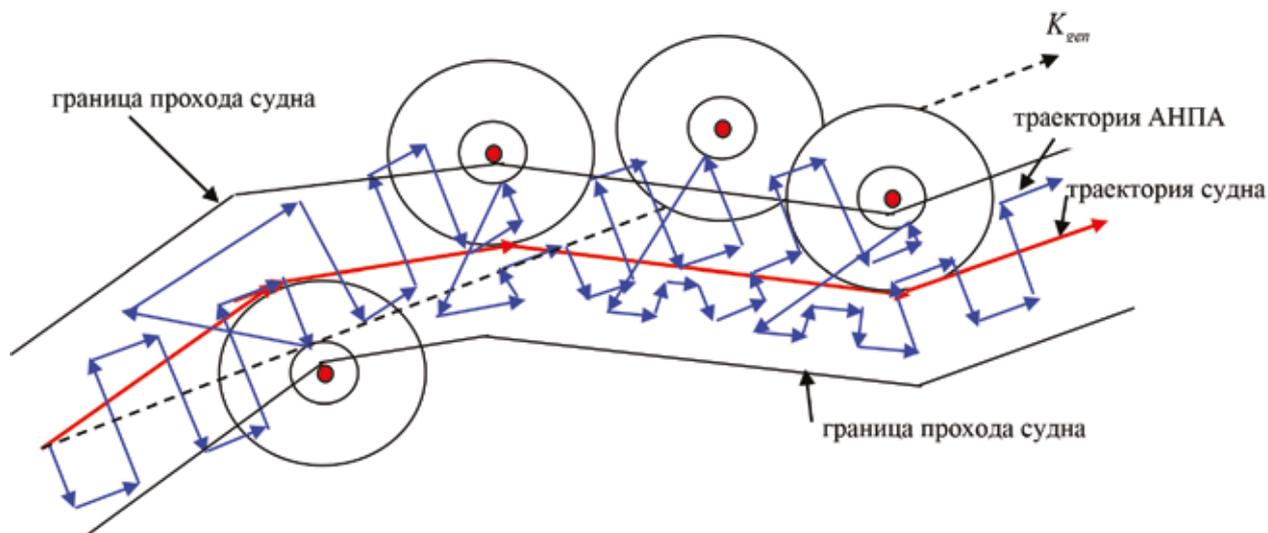


Рис. 6. Маневрирование АНПА при проходе заминированного района

область прохода не обследована. Система управления рассчитывает траекторию АНПА, обеспечивающую просмотр необследованной части прохода, и инициирует движение АНПА по этой траектории. После завершения просмотра не обследованной части прохода АНПА начинает маневрировать параллельными галсами, но уже в новых границах прохода.

Ситуация усложняется, если при просмотре необследованной части прохода будет обнаружена новая мина (рис. 5). В этом случае система управления АНПА корректирует траекторию судна при обходе 1-й обнаруженной мины (траектория судна, которая была построена до обнаружения 2-й мины, показана штриховой красной линией, а новая траектория – сплошной красной линией). Также система управления АНПА выявляет необследованную часть прохода судна, соответствующую новой траектории судна (заштрихована на рис. 5 светло коричневым цветом) и рассчитывает траекторию АНПА для её обследования с переходом на стандартное движение параллельным галсами поперёк построенной траектории судна. Если в процессе осмотра необследованной части прохода будет обнаружена новая мина, описанные действия будут повторены.

Описанный алгоритм маневрирования АНПА реализуется при обнаружении каждой новой мины. На рис. 6 показаны маневрирование АНПА и построенный маршрут судна при проходе через район, в котором обнаружено 4 мины. Из рассмотрения рис. 6 следует, что при обнаружении каждой новой мины АНПА вынужден поворачивать назад для просмотра необследованной части прохода, построенного в результате обхода судном обнаруженной мины.

После преодоления всего заминированного района, как было отмечено выше, АНПА передаёт суд-

ну его маршрут и координаты обнаруженных мин.

Представляет интерес оценка времени поиска прохода через заминированный район. Как видно из рис. 6, это время зависит от размера района вдоль заданного генерального курса L , скорости АНПА V , минимально допустимой дистанции приближения судна к мине R_{min} , дистанции обнаружения мины D_{det} и количества обнаруженных мин N . Рассмотрим крайний случай, когда при поиске прохода не обнаружено ни одной мины. Тогда нетрудно показать, что время поиска прохода T составит

$$T = \frac{L}{V} \cdot \frac{R_{min}}{D_{det}}, \quad (3)$$

т.е. время поиска прохода как минимум в $\frac{R_{min}}{D_{det}}$ раз превышает время пересечения района генеральным курсом.

При обнаружении N мин время поиска прохода приблизительно составит величину

$$T \approx \frac{L + 2 \cdot R_{min} \cdot N}{V} \cdot \frac{R_{min}}{D_{det}}. \quad (4)$$

Поскольку отношение $\frac{R_{min}}{D_{det}}$ может достигать десяти и более и, как следствие, время T может быть достаточно большим, актуален поиск путей сокращения этого времени. В первую очередь напрашивается применение для поиска прохода через заминированный район группы АНПА. Это в принципе возможно и целесообразно, но потребует разработки достаточно сложных алгоритмов группового управления АНПА с применением сетевой гидроакустической связи и высокоточного взаимного позиционирования АНПА [32]. Авторы планируют решить эту задачу в своих последующих работах.

Заключение

Одной из задач, возлагаемых на АНПА как в военное, так и в мирное время, является борьба с минной опасностью, состоящая как в поиске и уничтожении морских мин, так и в обеспечении собственного прохода, а также проводки судов через заминированный район. Для решения этих задач АНПА оснащаются средствами высокоточной автономной навигации и средствами поиска разного типа мин, а в систему управления АНПА закладываются алгоритмы маневрирования АНПА при решении этих задач.

В работе приведено описание реализуемых системой управления АНПА алгоритмов маневрирования АНПА при проходе АНПА через заминированный район и при проводке судна через заминированный район с учётом минимально безопасной дистанции приближения судна к мине, гарантированной дистанции обнаружения мины и точности позиционирования АНПА и судна.

В последующих работах авторы планируют рассмотреть алгоритмы управления группой АНПА при проводке судов через заминированный район.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253).

ЛИТЕРАТУРА

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк [отв. ред. Л.В. Киселев]. Владивосток: Дальнаука. 2018. 368 с.
2. Боженов Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4, № 1. С. 4–68.
3. Jane's unmanned maritime vehicle. 2019-2020 / Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. Coulsdon, Surrey, UK, 2020.
4. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. 304 с.
5. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // *Зарубежное военное обозрение*. 2013. № 5. С. 79–88.
6. Greenlaw J. Sea mines and naval mine countermeasures: are autonomous underwater vehicles the answer, and is the Royal Canadian Navy ready for the new paradigm? Canadian forces college. Toronto, Ontario, Canada. 2013.
7. Jane's fighting ships. 2019-2020 / Ed. Alex Pape. IHS Markit. Coulsdon, Surrey, UK. 2020.
8. Naval mine. – https://en.wikipedia.org/wiki/Naval_mine (дата обращения: 03.03.2021).
9. How do naval mines work. – <https://interestingengineering.com/how-do-naval-mines-work> (дата обращения: 03.03.2021).
10. Naval sonar ASW and mine hunting. – <https://www.kongsberg.com/maritime/products/naval-systems/ASW> (дата обращения: 03.03.2021).
11. Chapple P.B. Unsupervised detection of mine-like objects in seabed imagery from autonomous underwater vehicles // *Proc. IEEE Oceans Conf.* 2009. P. 1–6.
12. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Результаты применения акустического профилографа для мониторинга морских акваторий с использованием алгоритмов синтезирования и фокусировки // *Подводные исследования и робототехника*. 2014. № 1(17). С. 33–38.
13. Williams D.P. Underwater target classification in synthetic aperture sonar imagery using deep convolutional neural networks // *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition. Tlaquepaque, Jalisco, Mexico*. 2016. P. 2497–2502.
14. Zhu P., Isaacs J., Fu B., Ferrari S. Deep learning feature extraction for target recognition and classification in underwater sonar images. *Proc. IEEE Annual Conf. Decision and Control. Melbourne, Australia*. 2017. P. 2724–2731.
15. Denos K., Ravaut M., Fagette A., Lim H. Deep learning applied to underwater mine warfare // *Proc. IEEE Oceans Conf. Aberdeen, Scotland*. 2017. P. 1–7.
16. Chapple P.B., Dell T., Bongiomo D. Enhanced detection and classification of mine-like objects using situational awareness and deep learning // *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition. Island of Skiathos, Greece*. 2017. P. 529–536.
17. Williams D.P., Hamona R., Gergb I.D. On the benefit of multiple representations with convolutional neural networks for improved target classification using sonar data // *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition. Hersonissos, Crete*. 2019. P. 187–194.
18. Hayes M., Gough P. Broad-band synthetic aperture sonar // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1992. V.17 (1). P.80–94.
19. Plotnick D., Marston T. Utilization of aspect angle information in synthetic aperture images // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. 2018. Vol. 56 (9). P. 5424–5432.
20. Williams D. Exploiting phase information in synthetic aperture sonar images for target classification // *Proc. IEEE Oceans Conf. Kobe, Japan*. 2018. P. 1–6.
21. Williams D. Underwater target classification in synthetic aperture sonar imagery using deep convolutional neural networks // *Proc. of ICPR*. 2016.
22. Emigh M., Marchand B., Cook M., Prater J.. Supervised deep learning classification for multi-band synthetic aperture sonar // *Proc. 4-th Intern. Conf. on SAS/SAR*. 2018. Vol. 40. P. 140–147.
23. Gerg I., Williams D. Additional representations for improving synthetic aperture sonar classification using convolutional neural networks // *Proc. 4-th Intern. Conf. on SAS/SAR*. 2018. Vol. 40. P. 11–22.
24. Carmichael D., Linnett L., Clarke S., Calder B. Seabed classification through multifractal analysis of sidescan sonar imagery // *IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation*. 1996. Vol. 143(3). P. 140–148.
25. Kohntopp D., Lehmann B., Kraus D., Birk A. Seafloor classification for mine countermeasures operations using synthetic aperture sonar images // *Proc. IEEE Oceans Conf. Aberdeen, Scotland*. 2017. P. 1–5.
26. Groen J., Coiras E. Del Rio Vera J., Evans B. Model-based sea mine classification with synthetic aperture sonar // *IEE Proc. Radar, Sonar, Navigation*. 2010. Vol. 4 (1). P. 62–73.
27. Williams D.P., Hamon R., Gerg I. On the benefit of multiple representations with convolutional neural networks for improved target classification using sonar data // *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition. Hersonissos, Crete*. 2019.
28. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в акваториях различных типов // *Подводные исследования и робототехника*. 2016. № 2 (22). С. 25–35.
29. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // *Шестая Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана» (ТПОМО-6)*. Владивосток, 2015. С. 450–454.
30. Плехов А.М. Словарь военных терминов, М.: Воениздат, 1988. 337с.
31. Хвоц В.А. Тактика ПЛ. М.: Воениздат. 1989. 264 с.
32. Кебал К.Г., Машоин А.И., Мороз Н.В. Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования // *Гирроскопия и навигация*. 2019. Т. 27, № 2 (105). С.106–135.

Об авторах

БЫКОВА Валентина Сергеевна, инженер-программист
АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"

Области научных интересов: системы распознавания и управления

Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30

E-mail: zvs2011@yandex.ru

Тел.: +7(921)350-22-98

ORCID ID: 0000-0003-1633-2758

МАШОШИН Андрей Иванович, д.т.н., профессор
начальник научно-исследовательского центра

АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"

Области научных интересов: гидроакустика, системы распознавания и управления, моделирование, робототехника

Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30

E-mail: aimashoshin@mail.ru

Тел.: +7(921)763-23-45

ORCID ID: 0000-0002-4785-966X

ПАШКЕВИЧ Иван Владимирович, главный специалист
АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"

Области научных интересов: гидроакустика, робототехника,

Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, д. 30

E-mail: iv@bk.ru

Тел.: +7(911)933-00-06

ORCID ID: 0000-0002-6706-5592

Для цитирования:

Быкова В.С., Машошин А.И., Пашкевич И.В. ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПРОВОДКИ СУДОВ ЧЕРЕЗ ЗАМИНИРОВАННЫЙ РАЙОН // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 1(35). С. 31–40. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_03



THE USE OF THE AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE FOR NAVIGATING A SHIP THROUGH A MINED AREA

V.S. Bykova, A.I. Mashoshin, I.V. Pashkevich

The article describes the algorithms for maneuvering an Autonomous underwater vehicle (AUV) when passing through a mined area and when ensuring the passage of a vessel through a mined area. Both tasks are solved by detecting different types of mines using hydroacoustic and magnetometric means of searching and classifying underwater objects and bypassing of the mines at a safe distance. To reduce the time required to solve both tasks, the detected underwater objects are classified into the "mine-like object" and "other objects" classes. The use of the "mine-like object" class, which includes both the actual mines and objects that are indistinguishable from mines at the distances of their detection by means of mine search, allows you to avoid approaching detected underwater objects at a distance of their confident classification using high-frequency sonar and television equipment, and thereby increase the safety of the AUV and reduce the time of passage through the mined area. The algorithm ensuring the passage of a vessel through the mined area takes into account the fact that the minimum safe distance between vessel and mine greatly exceeds the range of detection of mines of different types that does not allow AUV to find a safe vessel passage through the mined area by a single crossing and requires complex maneuvering of the AUV. Algorithms are intended for implementation in the AUV control system.

Keywords: Autonomous underwater vehicle, sea mine, means of searching for sea mines, maneuvering AUV when passing through a mined area.

Recommended citation:

Bykova V.S., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V. THE USE OF THE AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE FOR NAVIGATING A SHIP THROUGH A MINED AREA. *Underwater Investigation and Robotics*. 2021. No. 1 (35). P. 31–40. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_03

References

- Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. *Podvodnye robotekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye*. [ed. by L.V. Kiselev]; Institute for Marine Technology Problems FEB RAS. Vladivostok, 2018. 368 p.
- Bozhenov Yu.A. *Ispol'zovanie avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlya issledovaniya Arktiki i Antarktiki. Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. 2011. Vol. 4, No 1. P. 4–68.
- Jane's unmanned maritime vehicle. 2019–2020. Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. 2020.
- Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu. *Ugroza iz glubiny: XXI vek*. Khabarovsk: *Khabarovskaya kraevaya tipografiya*, 2011. 304 p.
- Belousov I. *Sovremennye i perspektivnye neobitaemye podvodnye apparaty VMS SSHA. Zarubezhnoye voennoye obozreniye*. 2013. No. 5. P. 79–88.
- Greenlaw J. Sea mines and naval mine countermeasures: are autonomous underwater vehicles the answer, and is the Royal Canadian Navy ready for the new paradigm? *Canadian forces college*. 2013.
- Jane's fighting ships. 2019–2020. Ed. Alex Pape. IHS Markit. 2020.
- Naval mine. https://en.wikipedia.org/wiki/Naval_mine.
- How do naval mines work. <https://interestingengineering.com/how-do-naval-mines-work>.
- Naval sonar ASW and mine hunting. <https://www.kongsberg.com/maritime/products/naval-systems/ASW>.
- Chapple P.B. Unsupervised detection of mine-like objects in seabed imagery from autonomous underwater vehicles. *Proc. IEEE Oceans Conf.* 2009. P. 1–6.
- Kasatkin B.A., Kosarev G.V. The application results of sea water areas monitoring with acoustic profiler using algorithms of synthesizing and focusing. *Underwater Investigations and Robotics*. 2014. No. 1(17). P. 33–38.
- Williams D.P. Underwater target classification in synthetic aperture sonar imagery using deep convolutional neural networks. *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition*. 2016. P. 2497–2502.
- Zhu P., Isaacs J., Fu B., Ferrari S. Deep learning feature extraction for target recognition and classification in underwater sonar images. *Proc. IEEE Annual Conf. Decision and Control*. 2017. P. 2724–2731.
- Denos K., Ravaut M., Fagette A., Lim H. Deep learning applied to underwater mine warfare. *Proc. IEEE Oceans Conf.* 2017. P. 1–7.
- Chapple P.B., Dell T., Bongiorno D. Enhanced detection and classification of mine-like objects using situational awareness and deep learning. *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition*. 2017. P. 529–536.

17. Williams D.P., Hamona R., Gergb I.D. On the benefit of multiple representations with convolutional neural networks for improved target classification using sonar data. Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition. 2019. P. 187–194.
18. Hayes M., Gough P. Broad-band synthetic aperture sonar. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1992. Vol. 17(1). P. 80–94.
19. Plotnick D., Marston T. Utilization of aspect angle information in synthetic aperture images. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2018. Vol. 56(9). P. 5424–5432.
20. Williams D. Exploiting phase information in synthetic aperture sonar images for target classification. Proc. IEEE Oceans. 2018. P. 1–6.
21. Williams D. Underwater target classification in synthetic aperture sonar imagery using deep convolutional neural networks. Proc. of ICPR. 2016.
22. Emigh M., Marchand B., Cook M., Prater J. Supervised deep learning classification for multi-band synthetic aperture sonar. Proc. 4th International Conference on SAS/SAR. 2018. Vol. 40. P. 140–147.
23. Gerg I., Williams D. Additional representations for improving synthetic aperture sonar classification using convolutional neural networks. Proc. 4th International Conference on SAS/SAR. 2018. Vol. 40. P. 11–22.
24. Carmichael D., Linnett L., Clarke S., Calder B. Seabed classification through multifractal analysis of sidescan sonar imagery. IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation. 1996. Vol. 143(3). P. 140–148.
25. Kohntopp D., Lehmann B., Kraus D., Birk A. Seafloor classification for mine countermeasures operations using synthetic aperture sonar images. Proc. OCEANS. 2017. P. 1–5.
26. Groen J., Coiras E. Del Rio Vera J., Evans B. Model-based sea mine classification with synthetic aperture sonar. IEE Proc. Radar, Sonar, Navigation. 2010. Vol. 4(1). P. 62–73.
27. Williams D.P., Hamon R., Gerg I. On the benefit of multiple representations with convolutional neural networks for improved target classification using sonar data. Proc. Underwater Acoustics Conference, 2019.
28. Inzartsev A.V., Bagnitckii A.V. Motion path planning and implementation for AUV when monitoring in various types of water areas. Underwater Investigations and Robotics. 2016. No. 2 (22). P. 25–35.
29. Inzartsev A.V., Bagnitckii A.V. *Algoritmy obhoda lokal'nyh donnykh ob'ektov dlya avtonomnogo podvodnogo robota. Shestaya vseros. nauch.-tekhn. konf. «Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana»*. Vladivostok. 2015. P. 450–454.
30. Plekhov A.M. *Slovar' voennykh terminov*, M.: Voenizdat, 1988. 337 p.
31. Hvoshch V.A. Taktika PL. M.: Voenizdat, 1989. 264 p.
32. Kebkal K.G., Mashoshin A.I., Moroz N.V. Solutions for underwater communication and positioning network development. Gyroscopy and Navigation. 2019. Vol. 27. № 2 (105). P. 106–135.

About the authors

BYKOVA Valentina Sergeevna, program engineer
 JSC «Concern «Elektropribor»
Scientific interests in pattern recognition and control systems,
Address: 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30
E-mail: zvs2011@yandex.ru
Phone: +7(921)350-22-98
ORCID ID: 0000-0003-1633-2758

MASHOSHIN Andrei Ivanovich, Dr. Sc., professor, chief of the research center
 JSC «Concern «Elektropribor»
Scientific interests in underwater acoustics, pattern recognition and control systems
Address: 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30
E-mail: aimashoshin@mail.ru
Phone: +7(921)763-23-45
ORCID ID: 0000-0002-4785-966X

PASHKEVICH Ivan Vladimirovich, chief specialist
 JSC «Concern «Elektropribor»
Scientific interests in underwater acoustics and control systems
Address: 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30
E-mail: iv@bk.ru
Phone: +7(911)933-00-06
ORCID ID: 0000-0002-6706-5592



МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ В ЗАДАЧЕ АВТОНОМНОГО НАВИГАЦИОННОГО СЧИСЛЕНИЯ

А.Ю. Соколов, А.В. Моторин

Рассматривается задача оценивания и коррекции погрешностей координат места, вырабатываемых счислением с использованием относительного лага. Задача решается по данным инерциального гироскопического корректора, построенного по принципу одноканальной инерциальной вертикали на одном неуправляемом гироскопе, с помощью методов оптимальной и субоптимальной калмановской фильтрации. Известно, что основная погрешность счисляемых координат места вызвана методической погрешностью относительного лага, обусловленной его нечувствительностью к изменчивости морских течений. В работе уделяется внимание особенностям решения задачи коррекции, когда течения имеют преимущественно приливной характер. Показано, что в этом случае оценки погрешностей счисляемых координат места могут быть получены только с использованием процедур, позволяющих решить задачу в нелинейной постановке. С применением нелинейных фильтров использование одного гироскопического корректора обеспечивает высокоточную поддержку навигационного счисления и автономное решение навигационной задачи, без использования информации других навигационных средств.

Ключевые слова: инерциальная навигационная система, инерциальная вертикаль, навигационное счисление, лаг

Введение

В работе рассматривается задача коррекции системы навигационного счисления по данным инерциального гироскопического корректора. В основе принципа построения корректора лежит новый метод обеспечения невозмущаемости вертикали инерционными ускорениями. Этот метод был впервые представлен в [1] и получил в итоге название «метод одноканальной вертикали (ОВ) с корректируемым маятником (КМ)» [2]. Сама же идея построения инерциального корректора, работающего по схеме ОВКМ, была впервые изложена в работе [3]. Система счисления при этом реализуется с опорой на относительный лаг и данные курса, вырабатываемого корректором. Наиболее значимой погрешностью такого способа счисления является методическая погрешность лага, обусловленная наличием неучитываемых течений. Поскольку при решении навигационных задач в морях приливного типа или вблизи прибрежной зоны скорости приливных течений значительно больше скорости постоянных непериодических течений [4–6], то актуальным становится их оценивание

и учет при решении задачи счисления. Этим вопросам и посвящена настоящая статья.

■ Задача коррекции

Использование инерциального корректора, работающего по схеме ОВКМ, позволяет обеспечить высокоточную поддержку навигационного счисления, обеспечивая при этом полную автономность и сокращение числа используемых для этого чувствительных элементов (неуправляемых гироскопов (НГ)) до одного, по сравнению с классической инерциальной навигационной системой (ИНС) [7]. Принципиальное отличие системы с ОВКМ от ИНС заключается в использовании измерителя ускорений, а не гироскопа в качестве источника второго наблюдаемого вектора при решении задачи ориентации методом TRIAD [8]. Первый (опорный) – вектор кинетического момента НГ, ориентированный параллельно плоскости экватора Земли. Второй – вектор силы тяжести, совпадающий с вертикалью места и вычисляемый по данным акселерометров. При реализации такой схемы углы ориентации оказываются возмущёнными. Однако

выбор в качестве опорного вектора кинетического момента в алгоритме TRIAD позволяет измерить угловое положение объекта в плоскости, содержащей оба наблюдаемых вектора (обозначим этот угол φ') с опорой только на данные НГ без привлечения информации, искажённой инерционными ускорениями.

Измеряемый ОБКМ угол связан с географическими координатами места соотношением:

$$\cos \varphi' = \cos \varphi \cos \lambda_*, \quad (1)$$

где φ – географическая широта места; λ_* – угол инерциальной долготы места, равный:

$$\lambda_* = \lambda + \Omega t,$$

где λ – географическая долгота места; Ω – угловая скорость вращения Земли; t – гринвичское время.

Соотношение (1) позволяет сформировать разностное измерение:

$$z = \cos \varphi'_{изм} - \cos \varphi'_{расч}, \quad (2)$$

где $\varphi'_{изм}$ – угловая координата объекта, измеряемая контуром ОБ; $\varphi'_{расч}$ – угловая координата объекта, рассчитываемая по известным координатам места в соответствии с (1). Разностное измерение (2) содержит погрешности выработки счислимых координат $\Delta\varphi, \Delta\lambda$. Его модель, с точностью до погрешности хранения инерциального направления и построения вертикали, может быть представлена в виде:

$$z = \Delta\varphi \sin \varphi \cos \lambda_* + \Delta\lambda \cos \varphi \sin \lambda_* + v, \quad (3)$$

где v – погрешность измерения, обусловленная инструментальной погрешностью относительного лага. Предполагается, что эта погрешность носит белозумный характер.

Измерение (3) может использоваться для непрерывной автономной коррекции погрешностей счислимых координат места. При этом, несмотря на то что курс вырабатывается с погрешностью, обусловленной упомянутым выше влиянием инерционных ускорений, в счислимых координатах места её удаётся скомпенсировать с использованием информации об ускорении, вырабатываемом в канале ОБ, и скорости от внешнего источника и организовать счисление по принципу корректируемого маятника [9].

Рассмотрим следующие две модели течения:

- в общем случае модель течений задаётся случайным марковским процессом первого порядка [10] с параметрами СКО $\sigma_T = 0,1$ м/с и интервалом корреляции $\tau_{кор} = 2$ ч. Модель погрешностей счисления имеет вид:

$$\begin{cases} \Delta\dot{\varphi} = \frac{v_{N_T}}{R_\varphi}, \\ \Delta\dot{\lambda} \cos \varphi = \frac{v_{E_T}}{R_\lambda}, \\ \dot{v}_{N_T} = -\alpha_T v_{N_T} + \sigma_T \sqrt{2\alpha_T} n_1(t), \\ \dot{v}_{E_T} = -\alpha_T v_{E_T} + \sigma_T \sqrt{2\alpha_T} n_2(t), \end{cases} \quad (4)$$

где v_{E, N_T} – неизвестные составляющие скорости течения в проекции на восточную (E) и северную (N) оси горизонтной географической системы координат; α_T – величина, обратная интервалу корреляции $\tau_{кор}$; $n_{1,2}(t)$ – центрированные некоррелированные между собой белые шумы единичной интенсивности; $R_{\varphi, \lambda}$ – радиусы кривизны нормальных сечений земного эллипсоида;

- течения имеют приливной характер с периодом, приблизительно равным 12 ч. [4]. В этих условиях модель погрешностей счислимых координат (4) может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} \Delta\dot{\varphi} = \frac{v_{N_T}}{R_\varphi} \sin(2\Omega t + \varepsilon), \\ \Delta\dot{\lambda} \cos \varphi = \frac{v_{E_T}}{R_\lambda} \sin(2\Omega t + \varepsilon + \delta\varepsilon), \end{cases} \quad (5)$$

где v_{E, N_T} – постоянные амплитуды гармонических составляющих скорости течения; ε – неизвестная начальная фаза северной составляющей скорости течения; $\delta\varepsilon$ – постоянная известная разность фаз между составляющими скорости течения. Допущение об известном значении $\Delta\varepsilon$ сделано на основании экспериментальных данных, которые будут представлены чуть позже.

Задача коррекции заключается в оценивании погрешностей системы счисления, описываемых уравнениями (4), (5) по измерению (3). Вектор состояния для модели (4) имеет вид:

$$[x] = [\Delta\varphi \quad \Delta\lambda \quad v_{N_T} \quad v_{E_T}]^T. \quad (6)$$

Для модели (5) получим следующий вектор состояния:

$$[x] = [\Delta\varphi \quad \Delta\lambda \quad v_{N_T} \quad v_{E_T} \quad \varepsilon]^T. \quad (7)$$

Нетрудно заметить, что уравнения (5) относительно компонент вектора состояния (7) носят нелинейный характер.

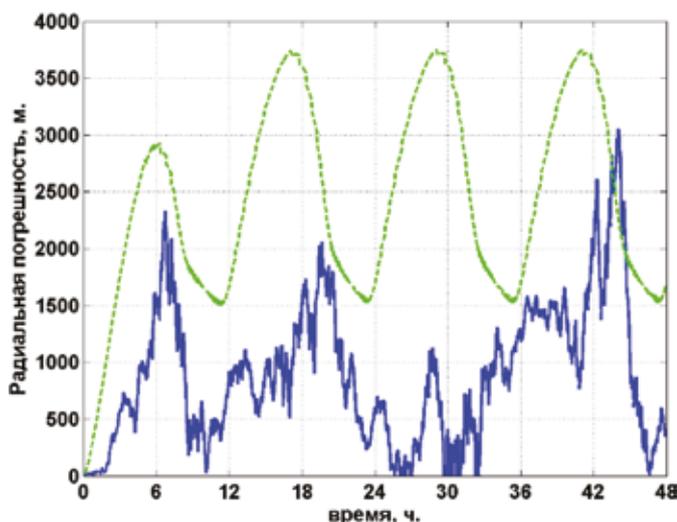


Рис. 1. Радиальная погрешность (синяя кривая – действительная погрешность по результатам моделирования оценочного канала ФК; зелёная кривая – среднеквадратическая погрешность по результатам моделирования ковариационного канала ФК ($P = 0.997$))

■ Решение задачи оценивания в случае марковской модели течения

Для оценивания вектора состояния (6) с моделью (4) по измерению (3) воспользуемся фильтром Калмана (ФК), широко применяемым в задачах коррекции инерциальных систем [11, 12]. Впервые результаты такого моделирования были представлены в работе [13]. На рис. 1 приводятся погрешности оценивания $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda\cos(\varphi)$ в форме действительной радиальной погрешности местоположения (R) и её среднеквадратического значения с заданной вероятностью $P = 0.997$ ($R_{99,7}$), которые рассчитываются по формулам:

$$R = \sqrt{(\Delta\varphi - \Delta\hat{\varphi})^2 R_\varphi^2 + (\Delta\lambda - \Delta\hat{\lambda})^2 (R_\lambda \cos\varphi)^2}, \quad (8)$$

$$R_{99,7} = k_P \sqrt{\sigma_{\Delta\varphi}^2 + \sigma_{\Delta\lambda \cos\varphi}^2}, \quad (9)$$

где $\Delta\hat{\varphi}$, $\Delta\hat{\lambda}$ – оценки величин $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$, полученные по данным оценочного канала ФК; $\sigma_{\Delta\varphi, \Delta\lambda \cos\varphi}$ – СКО погрешностей оценивания величин $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$, полученные по данным ковариационного канала ФК; k_P – коэффициент, выбираемый из табл. 4.14 [14].

Следует отметить, что точность оценивания радиальной погрешности местоположения, которая, как это следует из рис. 1, по результатам моделирования составила около 3,5 км, практически не зависит от величины интервала корреляции (при изменении $\tau_{\text{кор}}$ в диапазоне от 2 до 27 ч), а определяется величиной СКО скорости течения и пропорционально увеличивается с возрастанием его значения. Периодическое изменение точности оценивания по данным

ковариационного канала обусловлено особенностями используемого измерения. Как это следует из модели измерения (3), дважды за сутки каждая из составляющих $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ не вносит вклад в измерение при $\cos \lambda_*$ и $\sin \lambda_*$, равных 0, соответственно. В эти моменты работает только прогнозная часть ФК, что не позволяет уточнить изменяющуюся в эти моменты скорость течения.

Полученная по результатам моделирования погрешность местоположения сопоставима с погрешностью одноимённого параметра для современных бесплатформенных ИНС [15]. Конечно, рассмотренный пример не является полноценным с той точки зрения, что погрешность приводится с точностью до ошибок самого корректора. Однако случайная составляющая дрейфа ИГ и другие погрешности корректора [16] существенно меньше рассмотренной случайной составляющей методической погрешности относительного лага, поэтому не приведут к значительному увеличению уровня погрешности коррекции счислимых координат.

■ Решение задачи оценивания в линейной постановке в случае приливной модели течения

Марковская модель течений является общей и при рассмотрении применительно к определённым районам плавания может быть конкретизирована. Как уже было сказано, при решении навигационных задач в морях приливного типа или вблизи прибрежной зоны скорости постоянных непериодических течений значительно меньше скорости приливных течений. Рассмотрим задачу оценивания погрешностей счисления по относительному лагу, вызванных приливной составляющей скорости течения.

Для составления модели приливного течения, используемой при постановке задачи оценивания, рассматривается район Обской губы. Суммарные течения в Обской губе слагаются из квазипостоянных, приливных и ветровых течений [17]. Если скорость квазипостоянных (стоковых) течений находится в пределах 0,1–0,2 м/с от севера к югу, а ветровые течения не всегда образуются из-за значительного ледового покрова, то скорость приливных течений может достигать 0,5 м/с. При этом приливные течения имеют главным образом полусуточный характер (в большинстве случаев период равен 12 ч. 25,2 мин. [18]), что может сказаться на их наблюдаемости при использовании измерения (3).

На рис. 2 и 3 представлены данные по составляющим течения в южной части Обской губы, полу-

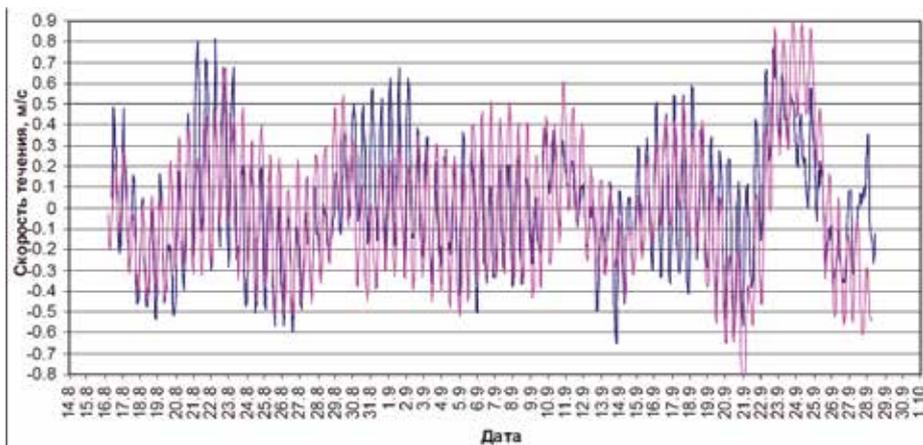


Рис. 2. Скорость зональной составляющей течения по результатам наблюдений (синий цвет), модельная (фиолетовый)

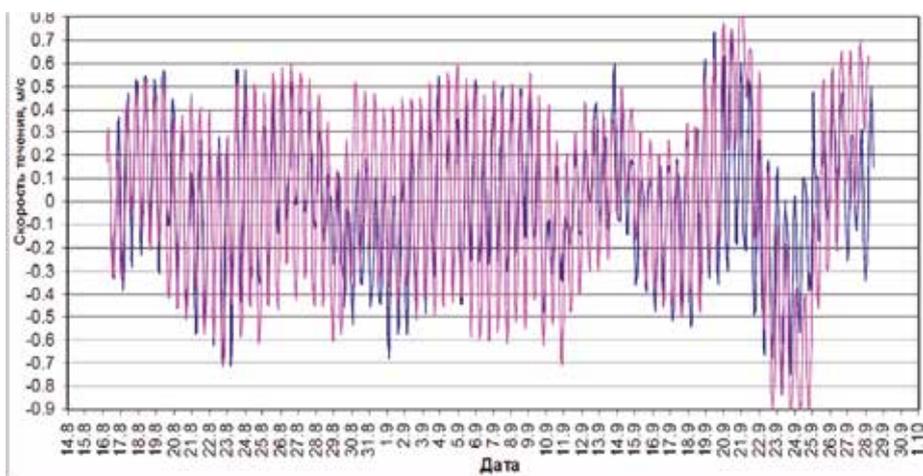


Рис. 3. Скорость меридиональной составляющей течения по результатам наблюдений (синий цвет), модельная (фиолетовый)

ченные по результатам измерений автоматическими буйковыми станциями в 2012 году [19].

Из графиков, представленных на рис. 2 и 3, следует, что течения имеют отчётливо выраженный суточный период и постоянную разность фаз между зональной и меридиональной составляющими за всё время наблюдения (с 15.08.2012 по 29.09.2012), равную π . Исходя из этого модель погрешностей числения, обусловленных приливной составляющей скорости течения, можно приближённо представить в виде (5), приняв $\delta\varepsilon = \pi$. Понятно, что модель (5) вполне адекватно описывает погрешность приливной составляющей течения лишь на небольших интервалах наблюдения – до 6 ч. При рассмотрении на больших интервалах времени необходимо учитывать изменение амплитуд v_{E,N_T} гармонических составляющих.

Следует также обратить внимание, что модель (5) может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} \Delta\varphi = \frac{V_{N_T}^{(1)}}{R_\varphi} \cos(2\Omega t) + \frac{V_{N_T}^{(2)}}{R_\varphi} \sin(2\Omega t), \\ \Delta\lambda \cos\varphi = -\frac{V_{E_T}^{(1)}}{R_\lambda} \cos(2\Omega t) - \frac{V_{E_T}^{(2)}}{R_\lambda} \sin(2\Omega t), \end{cases} \quad (10)$$

где $V_{E,N_T}^{(1)} = v_{E,N_T} \sin \varepsilon$, $V_{E,N_T}^{(2)} = v_{E,N_T} \cos \varepsilon$ – неизвестные константы.

Введем вектор состояния:

$$x = \left[\Delta\varphi \quad \Delta\lambda \quad V_{N_T}^{(1)} \quad V_{N_T}^{(2)} \quad V_{E_T}^{(1)} \quad V_{E_T}^{(2)} \right]^T. \quad (11)$$

Нетрудно заметить, что относительно такого вектора задача оценивания по измерению (3) является линейной и может быть легко решена с помощью ФК. Описанный прием сведения нелинейной задачи к линейной зачастую используется при решении задач, связанных с обработкой навигационной информации, и нередко оказывается достаточно эффективным [20–22].

На рис. 4 приведён результат моделирования задачи оценивания вектора (11) по измерению (3). Результат также представлен в виде радиальной погрешности местоположения и её среднеквадратического значения, которые рассчитывались по формулам (8), (9) соответственно.

Для наглядности представления полученного результата график радиальной погрешности местоположения на рис. 4 приведён для интервала времени

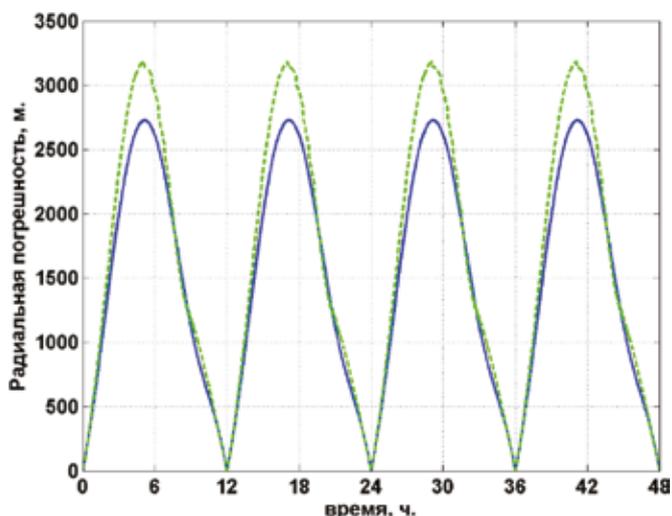


Рис. 4. Радиальная погрешность местоположения по результатам моделирования в условиях приливных течений (синий цвет – действительная погрешность по результатам моделирования оценочного канала ФК; зелёный – среднеквадратическая погрешность по результатам моделирования ковариационного канала ФК ($P = 0.997$))

моделирования 48 ч. При моделировании задавались следующие параметры приливной составляющей скорости течения: $v_{E_T} = v_{N_T} = 0.5$ м/с; $\varepsilon = 30^\circ$. Величины этих параметров для выбора начального значения вектора состояния ФК (11) были следующими: $v_{N_T} = 0.2$ м/с; $v_{E_T} = 0.8$ м/с; $\varepsilon = 50^\circ$. Соответствующие разности $\Delta v_{N_T} = -0.3$ м/с, $\Delta v_{E_T} = 0.3$ м/с, $\Delta\varepsilon = 20^\circ$ по уровню ЗСКО определяют начальную матрицу ковариации ФК. Такой выбор начального значения для ФК обусловлен возможностью использования априорной информации о параметрах приливного течения, которые могут быть вычислены по картам и таблицам, содержащимся в атласах приливных течений [23]. При уменьшении априорной погрешности вектора состояния результирующая радиальная погрешность местоположения, получаемая в результате работы ФК, также уменьшится. Так, при $\Delta v_{N_T} = \Delta v_{E_T} = 0.1$ м/с и $\Delta\varepsilon = 20^\circ$ получим максимальный уровень радиальной погрешности не более 1 км.

Как следует из результатов проведённого моделирования, при использовании линейного субоптимального фильтра для обработки измерения (3) не удаётся получить постоянную установившуюся оценку погрешности счисления в случае, когда период приливной составляющей скорости течения кратен 12 ч. Кроме того, получающиеся в результате оценки составляющих скорости течения, содержащихся в векторе состояния (11), имеют постоянную погрешность оценивания. С целью анализа причин, из-за которых не удаётся разделить компоненты погрешности, проинтегрируем систему (5) и подставим

получившиеся выражения для $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda \cos\varphi$ в модель измерения (3). Получим:

$$z = \frac{V_{N_T}^{(2)} \sin\varphi - V_{E_T}^{(1)}}{4\Omega R_\Omega} \sin(\Omega t - \lambda) + \frac{V_{N_T}^{(2)} \sin\varphi + V_{E_T}^{(1)}}{4\Omega R_\Omega} \sin(3\Omega t + \lambda) - \frac{V_{N_T}^{(1)} \sin\varphi + V_{E_T}^{(2)}}{4\Omega R_\Omega} \cos(\Omega t - \lambda) - \frac{V_{N_T}^{(1)} \sin\varphi - V_{E_T}^{(2)}}{4\Omega R_\Omega} \cos(3\Omega t + \lambda) - \Delta_0 + v, \quad (12)$$

где R_Ω – радиус сферической Земли, введенный для упрощения представления выражения (12); $\Delta_0 = \Delta\varphi_0 \sin\varphi \cos\lambda_* + \Delta\lambda_0 \cos\varphi \sin\lambda_*$ – суммарная погрешность местоположения в начальный момент времени.

Из выражения (12) следует, что составляющие скорости, включённые нами в вектор (11), неразделимы между собой в измерении (3) и не могут быть оценены ФК, так как являются амплитудами гармоник с одинаковой частотой и фазой. Таким образом невозможно повысить точность решения задачи оценивания вектора (11) по измерению (3) в линейной постановке.

Для получения оптимальных в среднеквадратическом смысле оценок вектора (7), соответствующего модели (5), в рассматриваемой задаче могут быть использованы методы нелинейной фильтрации [20, 24–26]. Поскольку общего алгоритма решения таких задач, в отличие от линейных, не существует, успех в применении этих методов в значительной степени зависит от учета специфики решаемых задач. Рассмотрим решение задачи оценивания с использованием обобщённого ФК (ОФК), часто используемого при решении нелинейных задач коррекции [28]. В этом случае задача оценивания вектора (7) по измерению (3) решается после разложения уравнений системы (5) в ряд Тейлора до членов первого порядка:

$$\begin{cases} \delta\Delta\dot{\varphi} \approx \frac{\sin(\omega_T)}{R_\varphi} \Delta v_{N_T} + \frac{v_{N_{TЛ}} \cos(\omega_T)}{R_\varphi} \Delta\varepsilon, \\ \delta\Delta\dot{\lambda} \cos\varphi \approx -\frac{\sin(\omega_T)}{R_\lambda} \Delta v_{E_T} - \frac{v_{E_{TЛ}} \cos(\omega_T)}{R_\lambda} \Delta\varepsilon, \end{cases} \quad (13)$$

где $\delta\Delta\varphi$, $\delta\Delta\lambda$, $\Delta v_{E, N_T}$, $\Delta\varepsilon$ – составляющие погрешности выбора точки линеаризации вектора (7); $\omega_T = 2\Omega t + \varepsilon_j$; $v_{E, N_{TЛ}}$, $\varepsilon_{Л}$ – значения составляющих вектора (7) в точке линеаризации.

Система (13) является линейной относительно погрешности выбора точки линеаризации вектора (7):

$$[\Delta x] = [\delta\Delta\varphi \quad \delta\Delta\lambda \quad \Delta v_{N_T} \quad \Delta v_{E_T} \quad \Delta\varepsilon]^T +, \quad (14)$$

оценка которого может быть получена по следующему измерению:

$$\Delta z = \delta\Delta\varphi \sin\varphi \cos\lambda_* + \delta\Delta\lambda \cos\varphi \sin\lambda_*, \quad (15)$$

где $\Delta z = z - \Delta\varphi_{Л} \sin\varphi \cos\lambda_* - \Delta\lambda_{Л} \cos\varphi \sin\lambda_*$ из уравнения (3), где $\Delta\varphi_{Л}, \Delta\lambda_{Л}$ – значения погрешностей $\Delta\varphi, \Delta\lambda$, вычисляемые в точке линеаризации.

На рис. 5 приведён график радиальной погрешности местоположения, полученный в результате моделирования задачи оценивания вектора (14) по измерению (15). Радиальная погрешность вычислялась в этом случае следующим образом:

$$R = \sqrt{(\Delta\varphi - \Delta\varphi_{cor})^2 R_\varphi^2 + (\Delta\lambda - \Delta\lambda_{cor})^2 (R_\lambda \cos\varphi)^2}, \quad (16)$$

где $\Delta\varphi_{cor} = \Delta\varphi_{Л} + \delta\Delta\hat{\varphi}$; $\Delta\lambda_{cor} = \Delta\lambda_{Л} + \delta\Delta\hat{\lambda}$; $\delta\Delta\hat{\varphi}, \delta\Delta\hat{\lambda}$ – оценки величин $\delta\Delta\varphi, \delta\Delta\lambda$, полученные по результатам моделирования оценочного канала фильтра.

Как следует из графика радиальной погрешности, приведённого на рис. 5, результат решения задачи оценивания приливных течений с помощью ОФК по измерению (3) существенно точнее решения этой же задачи в упрощённой линейной постановке. Здесь следует отметить, что точность оценивания сильно зависит от действительных параметров течения. Результат, представленный синим графиком на рис. 5, был получен для погрешностей выбора точки линеаризации, соответствующих начальным

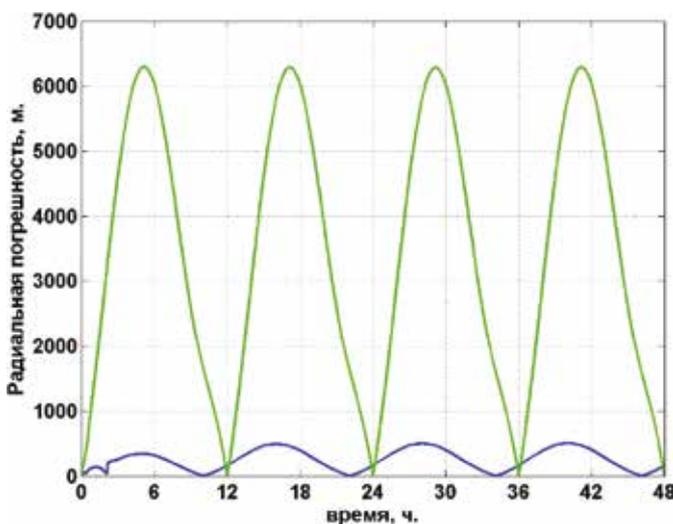


Рис. 5. Радиальная погрешность местоположения по результатам моделирования оценочного канала ОФК в условиях приливных течений для двух различных начальных значениях точки линеаризации

погрешностям вектора состояния в предыдущей рассмотренной линейной задаче (рис. 4): $\Delta v_{N_T} = -0.3$ м/с; $\Delta v_{E_T} = 0.3$ м/с; $\Delta\varepsilon = 20^\circ$. Зелёный график показывает погрешность оценивания для следующих значений начальных ошибок точки линеаризации: $\Delta v_{N_T} = -0.3$ м/с; $\Delta v_{E_T} = 0.3$ м/с; $\Delta\varepsilon = -20^\circ$. Качество оценивания вектора (14) с помощью ОФК может быть обеспечено только при точной начальной настройке фильтра исходя из априорных справочных данных.

Рассмотрим решение задачи с использованием другого нелинейного алгоритма, основанный на процедуре частичного аналитического интегрирования. Особенность рассматриваемой задачи заключается в том, что ее нелинейность порождена нелинейностью уравнений относительно только одной компоненты – неизвестной начальной фазы ε . При ее фиксации задача становится линейной. В этом случае при синтезе оптимального алгоритма фильтрации эффективным оказывается использование процедур частичного аналитического интегрирования с последующим применением метода сеток или метода Монте-Карло [20, 21], также используемого при решении задач коррекции [28, 29]. Заметим, что эта задача может трактоваться как задача адаптивного оценивания относительно неизвестной фазы и в этом смысле подпадает под задачи, обсуждаемые, например, в работах [30, 31]. Идея построения фильтра состоит в том, что при фиксировании неизвестного параметра ε задача оценивания (5) по измерению (3) становится линейной. Задавшись набором гипотез для этого параметра, можно построить банк ФК, результатом решения которых будет набор частных оценок погрешностей координат и составляющих скоростей течения. В то же время невязки банка ФК позволяют сформировать аппроксимацию функции правдоподобия для нелинейного параметра ε . С ее использованием можно получить оптимальную байесовскую оценку как самого ε , так и остальных составляющих вектора состояния (7).

В работе было проведено моделирование решения задачи с использованием алгоритмов фильтрации на основе частичного аналитического интегрирования. Результаты в виде радиальной погрешности местоположения, рассчитанной по формулам (8), (9), представлены на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что точность оценивания погрешностей счислимых координат при использовании такого нелинейного алгоритма существенно превышает точность при использовании ФК (см. рис. 4) и сопоставима с точностью решения этой же задачи с использованием ОФК. Таким образом, для решения рассматриваемой задачи с приемлемой точностью

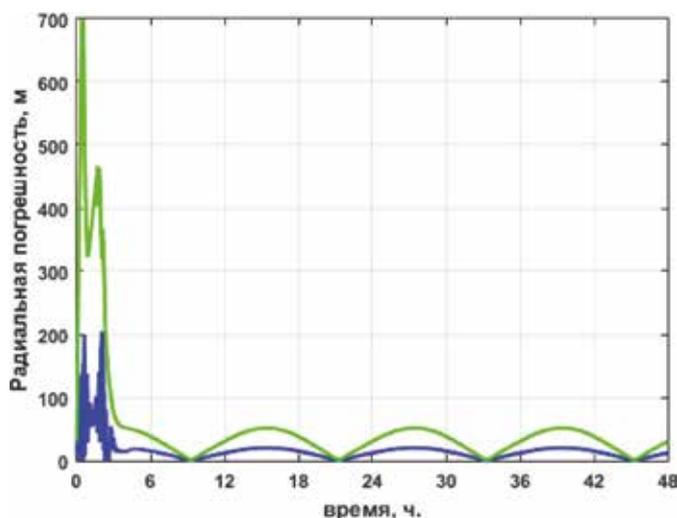


Рис. 6. Радиальная погрешность местоположения по результатам моделирования оценочного канала в фильтре с использованием нелинейного алгоритма на основе процедур частичного аналитического интегрирования в условиях приливных течений (синий цвет — действительная погрешность по результатам моделирования оценочного канала; зеленый — среднеквадратическая погрешность по результатам моделирования ковариационного канала)

существует необходимость прибегать к нелинейной постановке и соответствующим нелинейным алгоритмам.

Заключение

Рассмотрена задача автономной коррекции погрешностей навигационного счисления по относительному лагу с опорой на данные одnogирскопного инерциального гироскопического корректора, построенного по принципу одноканальной инерциальной вертикали. Основная погрешность счисления вызвана методической погрешностью лага, состоящей в его нечувствительности к изменчивости морских течений. В статье приводятся две модели течения:

общая марковская, в которой скорость течения описывается случайным марковским процессом, и упрощенная приливная модель течений, в которой все параметры скорости течения являются случайными константами. Проведенное моделирование задачи коррекции счисления показало, что в случае с марковской моделью оптимальные оценки параметров течения могут быть получены с помощью фильтра Калмана при линейной постановке задачи оценивания. Потенциальная точность коррекции составила в этом случае 3,5 км по радиальной погрешности местоположения.

При использовании модели приливного течения погрешность коррекции существенно уменьшилась и составила не более 100 м в установившемся режиме фильтра. Для получения такого результата появилась необходимость прибегать к нелинейным методам фильтрации, среди которых были рассмотрены обобщенный фильтр Калмана и методы, основанные на применении процедур частичного аналитического интегрирования. Наиболее надежными с точки зрения точности полученных оценок являются последние, так как результат работы обобщенного фильтра существенно зависит от погрешности априорной информации о скорости течения, используемой для выбора точки линеаризации.

Полученные результаты показывают принципиальную возможность применения рассматриваемого одnogирскопного корректора при решении навигационной задачи вблизи прибрежной зоны, где преобладают приливные течения. Как пример можно рассмотреть задачу навигации необитаемых подводных аппаратов, интервал автономной работы которых составляет до 6 ч. Однако из-за специфики метода ОВКМ, лежащего в основе принципа построения такого корректора, подобные системы пока не нашли своего применения наряду с известными на сегодня и зарекомендовавшими себя ИНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биндер Я.И. О построении горизонтного трёхгранника в гироскопических системах ориентации, предназначенных для поддержки навигационного счисления. Ч. 1. Принцип гироскопического ориентирования с корректируемым маятником. Схема реализации на свободном гироскопе // Гироскопия и навигация. 2014. № 4 (87). С. 69–84.
2. Биндер Я.И., Литманович Ю.А., Падерина Т.В. Развитие методов решения задач навигации на базе инерциального подхода // XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сб. материалов (Санкт-Петербург, 28–30 мая 2018 г.) / Государственный научный центр РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон». СПб, 2018. С. 237–248
3. Биндер Я.И. Счисление пути с использованием гиросимутгоризонта на одном свободном гироскопе с экваториальной ориентацией // Гироскопия и навигация. 2016. № 3 (94). С. 38–54
4. Попов С.К. Влияние морского льда на приливные колебания уровня моря и скорости течений в Баренцевом и Белом морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4. С. 137–155.
5. Зимин А.В. Закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в Белом море // Уч. зап. Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. Вып. 44. С. 104–119.
6. Лотция Белого моря: Гидрометеорологический очерк. — URL: rivermaps.ru/doc/beloe/beloe-3.htm (дата обращения: 20.06.2020).

7. Дмитриев С.П., Зиненко В.М., Литвиненко Ю.А. Анализ коррекции и демпфирования инерциальной навигационной системы средней точности с использованием относительного лага / Гироскопия и навигация. 2012. № 2 (77). С. 28–33.
8. Lerner G.M. Three-axis attitude determination from vector observations // Spacecraft Attitude Determination and Control. 1978. P. 420–428.
9. Binder Y., Litmanovich Y., Paderina T. An alternative approach to eliminate the motion induced disturbances in dead-reckoning navigation // DGON Inertial Sensors and Systems (ISS): Proceedings. Karlsruhe, Germany, 2016. P. 20.
10. Емельянцева Г. И., Степанов А. П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2016. 394 с.
11. Kalman R.E., Bucy R.S. New results in linear filtering and prediction theory // J. Basic Eng. 1961. Vol. 83. No. 1. P. 95–108.
12. Степанов О.А. Методы обработки навигационной измерительной информации. СПб: Университет ИТМО, 2017. 196 с.
13. Binder Y., Litmanovich Y., Paderina T. An alternative method for compensation of the motion induced disturbances of the vertical. Application for the navigation problems // Proceedings of the ION Pacific PNT Conference. Hawaii, Honolulu 2017. P. 745–756.
14. Мореходные таблицы (МТ-2000). М.: Главное управление навигации и океанографии министерства обороны РФ, 2002. 575 с.
15. iXblue. Inertial Navigation for Naval Forces. Overview. – URL: <https://www.ixblue.com/products/range/inertial-navigation-naval-forces> (дата обращения: 29.01.2021)
16. Биндер Я.И., Падерина Т.В., Литманович Ю.А. Методические погрешности схем навигационного счисления на одном свободном гироскопе // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27, № 3. С. 53–70.
17. Дианский Н.А., Фомин В.В., Грузинов В.М. Оценка влияния подходного канала к порту Сабетта на изменение гидрологических условий Обской губы с помощью численного моделирования // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 18–29.
18. Прилив и отлив. – URL: https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Прилив_и_отлив (дата обращения: 07.07.2020)
19. Математическое моделирование влияния судового морского канала в северной части Обской губы на гидродинамический и термохалинный режим Обской губы: научно-технический отчет (сокращенный вариант). М., 2015 г. 30 с. – URL: https://wwf.ru/upload/iblock/b74/2015_12_16_short_rep.pdf (дата обращения: 07.07.2020)
20. Степанов О. А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб: ГНИЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2003. 370 с.
21. Степанов О. А., Моторин А. В. Методы адаптивного оценивания в задачах обработки навигационной информации // Материалы XIII все-рос. совещ. по проблемам управления. М., 2019. С. 1359–1366.
22. Цодокова В. В., Моторин А. В. Расчет характеристики точности в задаче оценивания параметров преобразования координат звезд // Изв. Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Т. 6. С. 129–141.
23. Рульков Д.И. Навигация и лоция. М.: Транспорт, 1973. 232 с.
24. Sarkka S. Bayesian Filtering and Smoothing. Cambridge University Press, 2013.
25. Lainiotis D.G. Partitioning: A unifying framework for adaptive systems. I: Estimation. II: Control // IEEE Trans. 1976. Vol. 64, No. 8. P. 1126–1140
26. Hendebay G., Karlsson R., Gustafsson F. The Rao-Blackwellized particle filter: A filter bank implementation // EURASIP J. Adv. Signal Process. 2010. Vol. 2010.
27. Al Bitar N., Gavrilov A.I. Comparative Analysis of Fusion Algorithms in a Loosely-Coupled Integrated Navigation System on the Basis of Real Data Processing // Gyroscopy Navig. 2019. Vol. 10. P. 231–244.
28. Степанов О. А., Носов А. С. Алгоритм коррекции навигационной системы по данным карты и измерителя, не требующий предварительного оценивания значений поля вдоль пройденной траектории // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 2 (109). С. 70–90.
29. Степанов О.А., Торопов А.Б. Применение последовательных методов Монте-Карло с использованием процедур аналитического интегрирования при обработке навигационной информации // Сборник XII всероссийского совещания по проблемам управления. М., 2014. С. 3324–3337.
30. Motorin A.V., Stepanov O.A. Designing an error model for navigation sensors using the Bayesian approach // 2015 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI). San Diego, CA, 2015. P. 54–58.
31. Степанов О.А., Моторин А.В. Адаптивные задачи оценивания и методы их решения при обработке навигационной информации // Навигация и управление движением: сборник тезисов докладов Международного семинара (Самара, 28 сентября – 2 октября 2020 г.) / Под общ. ред. д-ра тех. наук И.В. Белоконова; Самарский университет. – Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2020. С. 14–17.

Об авторах

СОКОЛОВ Аркадий Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
 АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»
Адрес: 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая посадская, д. 30
Область научных интересов: навигация, инерциальные навигационные системы, гироскопия
Тел.: +7(911)100-33-16
E-mail: sau_89@bk.ru
ORCID ID: 0000-0002-2073-6096 (<https://orcid.org/0000-0002-2073-6096>)

МОТОРИН Андрей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
 АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»
Адрес: 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая посадская, д. 30
 доцент
 Университет ИТМО
Адрес: Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49
Область научных интересов: комплексная обработка информации, идентификация, нелинейная фильтрация
Тел.: +7(911)837-26-26
E-mail: motorin.a@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-2093-5079 (<https://orcid.org/0000-0002-2093-5079>)

Для цитирования:

Соколов А.Ю., Моторин А.В. МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ В ЗАДАЧЕ АВТОНОМНОГО НАВИГАЦИОННОГО СЧИСЛЕНИЯ // Подводные исследования и робототехника. 2021. No. 1(35). P. 41–50. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_04

SEA CURRENTS ESTIMATION METHODS FOR THE DEAD RECKONING

A.U. Sokolov, A.V. Motorin

The paper considers the estimation and correction of coordinates, which are obtained by dead reckoning with an electromagnetic log. The problem is solved according to the data of the inertial gyroscope corrector, which is based on one uncontrolled gyroscope according to the single-channel inertial vertical principle using methods of the optimal and suboptimal Kalman filtering. It is known that the main dead reckoning error is caused by the error of electromagnetic log resulting from its non-sensitivity to sea currents variability. The work focuses on features of correction problem solving when currents are mainly tidal. In this case, it is demonstrated that error estimations of dead reckoning coordinates are available only using procedures allowing to solve the problem in a non-linear statement. Using non-linear filters, the use of a single-gyroscope corrector provides high-precision support for dead reckoning and autonomous solving of the navigational problem with no data of other navigation means.

Keywords: Inertial navigation system, Inertial vertical, dead reckoning, log.

References

1. Binder, Y.I. Construction of a geographically oriented horizon trihedron in gyroscopic orientation systems intended to aid navigation dead reckoning part 1. Gyroscopic orientation with a correctable pendulum. Implementation in a free gyroscope. *Gyroscopy Navig.* Vol. 6. P.123–132 (2015).
2. Binder Y. I., Litmanovich Y. A., Paderina T.V. "Extension of navigation methods on the basis of the inertial approach," 2018 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), St. Petersburg, 2018. P. 1–12
3. Binder Y.I. Dead reckoning using an attitude and heading reference system based on a free gyro with equatorial orientation. *Gyroscopy Navig.* Vol. 8. P. 104–114 (2017).
4. Binder Y.I., Paderina T.V., Litmanovich Y.A. Method Errors of the Dead Reckoning Schemes Based on a Single Free Gyroscope. *Gyroscopy Navig.* Vol. 10. P. 292–302 (2019).
5. Popov S.K. *Vliyaniye morskogo l'da na prilivnyye kolebaniya urovnya morya i skorosti techeniy v Barentsevom i Belom moryakh. Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy.* 2018. Vol. 4. P.137–155.
6. Zimin A.V. *Zakonomernosti submezomasshtabnykh protsessov i yavleniy v Belom more. Uchonyye zapiski Rossiyskogo Gosudarstvennogo Gidrometeorologicheskogo Universiteta.* 2016. Vol. 44. P. 104–119
7. Navigation of the White Sea. Hydrometeorological outline. URL: rivmaps.ru/doc/beloe/beloe-3.htm (accessed 20.06.2020)
8. Dmitriev S.P., Zinenko V.M., Litvinenko Y.A. Correction and damping of medium accuracy INS using electromagnetic log. *Gyroscopy Navig.* Vol. 3, P. 270–274 (2012).
9. Lerner G.M. Three-axis attitude determination from vector observations. *Spacecraft Attitude Determination and Control.* 1978. P. 420–428.
10. Binder Y., Litmanovich Y., Paderina T. An alternative approach to eliminate the motion induced disturbances in dead-reckoning navigation. 2016 DGN Inertial Sensors and Systems (ISS). Proceedings. 2016. P. 20.
11. Yemelyantsev G.I., Stepanov A.P. *Integrirovannyye inertsi-al'no-sputnikovyye sistemy oriyentatsii i navigatsii.* St-Petersburg: CSRI «Elektropribor», JSC, 2016. 394 p.
12. Kalman R.E., Bucy R.S. New results in linear filtering and prediction theory. *J. Basic Eng.* Vol. 83. No. 1. 1961. P. 95–108.
13. Stepanov O.A. *Metody obrabotki navigatsionnoy izmeritel'noy informatsii.* St-Petersburg: ITMO University. 2017. 196 p.
14. Binder Y., Litmanovich Y., Paderina T. An alternative method for compensation of the motion induced disturbances of the vertical. Application for the navigation problems. Proceedings of the ION Pacific PNT Conference. Hawaii, Honolulu 2017. P. 745–756.
15. *Morekhnodnyye tablitsy (MT-2000). Glavnoye upravleniye navigatsii i okeanografii ministerstva oborony RF.* 2002. 575 p.
16. Dianskiy N.A., Fomin V.V., Gruzinov V.M. Otsenka vliyaniya podkhnodnogo kanala k portu Sabetta na izmeneniye gidrologicheskikh usloviy Obskoy guby s pomoshch'yu chislennogo modelirovaniya. *Arktika: ekologiya i ekonomika.* Vol. 3 (19). P. 18–29.
17. Tide. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tide> (accessed 07.07.2020)
18. *Matematicheskoye modelirovaniye vliyaniya sudokhnodnogo morskogo kanala v severnoy chasti Obskoy guby na gidrodinamicheskiy i termokhalinnyy rezhim Obskoy guby: nauchno-tekhnicheskyy otchot (sokrashchenny variant).* Moscow, 2015. 30 p. URL: https://wwf.ru/upload/iblock/b74/2015_12_16_short_rep.pdf (accessed: 07.07.2020)
19. Stepanov O.A. *Primeneniye teorii nelineynoy fil'tratsii v zadachakh obrabotki navigatsionnoy informatsii.* St-Petersburg: CSRI «Elektropribor», JSC. 2003. 370 p.
20. Stepanov O. A., Motorin A. V. Methods of adaptive estimation in the problems of processing navigation information. Collection of the XIII All-Russian Meeting on Management Problems of the VSPU-2019/ 2019 . P. 1359–1366.
21. Tsodokova VV, Motorin AV Calculation of the accuracy characteristics in the problem of estimating the parameters of the transformation of coordinates of stars. *Bulletin of the Tula State University. Technical science.* 2016. Vol. 6. P. 129–141.
22. Rulkov D.I. *Navigation and pilotage.* M.: Transport. 1973. 232 p.
23. Sarkka S. *Bayesian Filtering and Smoothing.* Cambridge University Press, 2013.
24. Lainiotis D.G. Partitioning: A unifying framework for adaptive systems. I: Estimation. II: Control. *IEEE Trans.* Vol. 64. No. 8. 1976. P. 1126–1140
25. Hendeby G., Karlsson R., Gustafsson F., The Rao-Blackwellized particle filter: A filter bank implementation. *EURASIP J. Adv. Signal Process.* 2010. Vol. 2010.

26. Al Bitar N., Gavrilov A.I. Comparative Analysis of Fusion Algorithms in a Loosely-Coupled Integrated Navigation System on the Basis of Real Data Processing. *Gyroscopy Navig.* 10, 231–244 (2019).

27. Stepanov O.A., Nosov A.S. A Map-Aided Navigation Algorithm without Preprocessing of Field Measurements. *Gyroscopy Navig.* Vol. 11. P. 162–175 (2020).

28. Stepanov O.A., Toropov A.B. *Primeneniye posledovatel'nykh metodov Monte-Karlo s ispol'zovaniyem protsedur analiticheskogo integrirovaniya pri obrabotke navigatsionnoy informatsii. Sbornik XII vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2014.* 2014. P. 3324–3337.

29. Motorin A.V., Stepanov O.A. Designing an error model for navigation sensors using the Bayesian approach. 2015 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI). 2015. P. 54–58.

30. Stepanov O.A., Motorin A.V. *Adaptivnyye zadachi otsenivaniya i metody ikh resheniya pri obrabotke navigatsionnoy informatsii. Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem: sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnogo seminaru (Samara, 28.09– 2.10.2020) / pod obshchey redaktsiyey doktora tekhnicheskikh nauk, professora I.V. Belokonova;* Samara National Research University. – Samara: *Izdatel'stvo Samarskogo universiteta*, 2020. P. 14–17

About the authors

SOKOLOV Arkadiy Urievich, cand. sci. tech., ead researcher

CSRI Elektropribor, JSC

Address: 30, Malaya Posadskaya str., Saint Petersburg 197046,

Russia

Scientific interests: navigation, inertial avigation systems, gyroscopy

Phone: +7(911)100-33-16

E-mail: sau_89@bk.ru

ORCID ID: 0000-0002-2073-6096

MOTORIN Andrei Vladimirovich, cand. sci. tech, lead researcher

CSRI Elektropribor, JSC, lecturer ITMO University

Scientific interests: data fusion, identification, nonlinear filtering

Phone: +7(911)837-26-26

E-mail: motorin.a@mail.ru

ORCID ID: 0000-0002-2093-5079

Recommended citation:

Sokolov A.U. , Motorin.A.V. SEA CURRENTS ESTIMATION METHODS FOR THE DEAD RECKONING. *Underwater Investigation and Robotics.* 2021. No. 1(35). P. 41–50. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_04



ОБОБЩЕНИЕ МЕТОДА ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ ПО ЗАПИСИ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА ОДИНОЧНЫМ ГИДРОФОНОМ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ БАТИМЕТРИИ

М.Ю. Фершалов, П.С. Петров, Д.С. Манульчев, А.Д. Захаренко

В последнее время все больший интерес представляют работы по восстановлению параметров волновода (скорость звука, плотность и т.д.) по данным, записанным одиночным гидрофоном. Традиционные методы геоакустической инверсии хорошо известны и достаточно подробно рассмотрены во многих работах. Они довольно точны, но для их применения нужны акустические данные, записанные массивами гидрофонов (антеннами). Недавно был представлен метод геоакустической инверсии для относительно мелководных равноглубинных волноводов. Он позволяет определить не только параметры волновода, но и расстояние до источника, используя акустические данные, записанные с помощью одиночного гидрофона. Этот метод основан на использовании так называемого развертывающего преобразования или оператора деформаций, которое позволяет выпрямить дисперсионные кривые и значительно упростить разделение мод. Разделенные дисперсионные кривые позволяют определить времена прихода мод (модальные групповые скорости), которые используются для восстановления параметров волновода. Представлен алгоритм для проведения геоакустической инверсии как для модельных, так и для реальных волноводов. В настоящей работе метод геоакустической инверсии с использованием записи импульсного акустического сигнала одиночным гидрофоном был обобщен на случай нерегулярного волновода. Данное обобщение позволяет учесть при выполнении инверсии плавные неоднородности батиметрии на рассматриваемой акустической трассе.

Ключевые слова: акустика океана; геоакустическая инверсия; волноводная дисперсия; развертывающее преобразование; акустические моды.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время выпущено множество работ по методам геоакустической инверсии. Алгоритмы инверсии позволяют извлечь информацию о строении и параметрах геоакустических волноводов из тональных и импульсных сигналов. Хотя в некоторых приложениях эта информация может быть интересна сама по себе, она также может использоваться в дальнейшем для моделирования распространения акустических волн. Традиционные методы геоакустической инверсии требуют использования приемных антенн, состоящих из большого числа гидрофонов (вертикальных или горизонтальных). Несмотря на то, что эти методы позволяют достаточно точно восстановить параметры волновода, они являются весьма сложными и дорогостоящими в практической реализации. По этой причине в последнее время все

большее внимание специалистов по акустике океана привлекают методы геоакустической инверсии, основанные на использовании данных, полученных с помощью одиночного гидрофона [1, 2]. В этом случае вместо информации о фазе, полученной с помощью разнесенных в пространстве датчиков, используется информация о волноводной дисперсии сигнала. Модовая дисперсия в волноводе мелкого моря с постоянной глубиной, параметры которого не зависят от горизонтальной координаты, тесно связана со структурой и акустическими параметрами (скорость звука и плотность) слоев дна в этом волноводе [4, 5]. Следовательно, времена прихода различных мод на разных частотах могут использоваться в качестве исходных данных для геоакустической инверсии. В данной работе мы рассматриваем обобщение схемы геоакустической инверсии из работ [1, 2] на случай волновода с малыми плавными вариациями глубины

моря. Это обобщение, несомненно, важно для практического применения указанной методики, поскольку в реальных волноводах мелкого моря всегда имеются неоднородности батиметрии.

1. Описание импульсного сигнала в рамках теории нормальных волн

Распространение импульсного сигнала в регулярном мелководном волноводе в частотной области обычно описывается с помощью уравнения Гельмгольца [5]:

$$\hat{P}_{rr} + \left(\frac{1}{\rho} \hat{P}_z \right)_z + \frac{\omega^2}{c^2} \hat{P} = - \frac{\delta(r)\delta(z-z_s)}{2\pi r}, \quad (1)$$

где $\hat{P} = \hat{P}(\omega, r, z)$ есть преобразование Фурье акустического давления $P = P(t, r, z)$, $c = c(z)$ и $\rho = \rho(z)$ соответственно скорость звука и плотность, зависящие от глубины z но не зависящие от расстояния от источника звука r , который расположен в точке $r = 0$, $z = z_s$.

Решение уравнения (1) может быть записано в виде суперпозиции нормальных волн (мод) [5, 6]:

$$\hat{P}(\omega, r, z) = Q(r) \sum_{m=1}^{\infty} \phi_m(z) \phi_m(z_s) \frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_m}}, \quad (2)$$

где $\phi_m(z, \omega)$ – собственная функция m -й моды, $k_m = k_m(\omega)$ – соответствующее горизонтальное волновое число, а $Q(r) = \frac{ie^{-iz/4}}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r}}$ (см. [5]). Перепишем уравнение (2) в следующем виде:

$$\hat{P}(\omega, r, z) = Q(r) \sum_{m=1}^{\infty} A_m(\omega, z) e^{ik_m(\omega)r}. \quad (3)$$

Далее, используя обратное преобразование Фурье, получаем:

$$\begin{aligned} P(t, r, z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{P}(\omega, r, z) e^{-i\omega t} d\omega = \\ &= \frac{Q(r)}{2\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_m(\omega, z) e^{i(k_m(\omega)r - \omega t)} d\omega, \end{aligned} \quad (4)$$

где интеграл из уравнения (4) может быть оценен с помощью метода стационарной фазы [6]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} A_m(\omega, z) e^{i(k_m(\omega)r - \omega t)} d\omega \approx e^{i(k_m(\omega_0)r - \omega_0 t \mp \pi/4)} \sqrt{\frac{2\pi}{|k_m''(\omega_0)|r}}, \quad (5)$$

а ω_0 есть значение, соответствующее стационарной фазе значение частоты (мгновенная частота), которое можно вычислить из соотношения:

$$\frac{d}{d\omega} (k_m(\omega)r - \omega t) = 0. \quad (6)$$

Данное соотношение может быть переписано в следующем виде:

$$v_{mg}(\omega_0) \equiv \left. \frac{d\omega}{dk_m} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{r}{t}. \quad (7)$$

Величина $v_{gm}(\omega)$ по определению называется групповой скоростью m -й моды [5]. Акустическая энергия, которая переносится соответствующей модовой компонентой импульсного сигнала, распространяется в горизонтальном направлении со скоростью v_g . Для фиксированного значения частоты ω групповые скорости мод различаются для $m = 1, 2, \dots$. Это приводит к так называемой модовой дисперсии при волноводном распространении сигнала. Известно, что групповые скорости мод могут быть использованы в качестве исходных данных для выполнения геоакустической инверсии (определении параметров волновода, например параметров дна, посредством акустических измерений). Отметим, что знак в уравнении (5) определяется знаком величины $k_m''(\omega_0)$ [6].

Перепишем уравнение (4) для фиксированной точки приема в форме:

$$P(t) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m(t) e^{i\Phi_m(t)}, \quad (8)$$

где $\Phi_m(t) = k_m(\omega_0(t))r - \omega_0(t)t$. Заметим, что фаза $\Phi_m(t)$ является интегралом от мгновенной частоты $\omega_0(t)$, поскольку выполняется следующее соотношение:

$$\frac{d\Phi_m}{dt} = \frac{dk_m}{d\omega_0} \frac{d\omega_0}{dt} r - \frac{d\omega_0}{dt} t - \omega_0(t) = -\omega_0(t). \quad (9)$$

2. Модовая дисперсия в идеальном волноводе

Рассмотрим идеальный акустический волновод $\Omega = \{(r, z) | 0 \leq z \leq H, 0 \leq r \leq \infty\}$ с полностью отражающими дном $z = H$ и поверхностью $z = 0$ (акустическое давление на этих границах равно 0: $P|_{z=0} = P|_{z=H} = 0$). Скорость звука в Ω предполагается равной константе. Акустическая спектральная задача в данном волноводе имеет счетное множество решений $(k_m(\omega), \phi_m(z, \omega))$, где волновые числа k_m , $m = 1, 2, \dots$ определяются из соотношения:

$$k_m(\omega)^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - \left(\frac{m\pi}{H}\right)^2. \quad (10)$$

Равенство (10) называется дисперсионным соотношением. Ему удовлетворяет лишь конечное число действительных значений k_m . Соответствующие моды обычно называются распространяющимися, в то время как моды, для которых $k_m^2 < 0$, называются затухающими. Минимальное значение частоты звука $\omega_{cm} = m\pi / H$ такое, что при $\omega > \omega_{cm}$ в волноводе возбуждается m распространяющихся мод, называется частотой отсечки m -й моды. Дисперсионное соотношение для идеального волновода Ω может быть записано в следующем виде:

$$\omega^2 = c^2 k_m^2 + \omega_{cm}^2. \quad (11)$$

Групповая скорость m -й моды в этом случае может быть определена по формуле:

$$v_{mg}(\omega) = \frac{d\omega}{dk_m} = \frac{c^2 k_m}{\sqrt{c^2 k_m^2 + \omega_{cm}^2}}. \quad (12)$$

Из выражений (12) и (7) можем легко получить мгновенную частоту для m -й модовой компоненты импульсного сигнала:

$$\omega_0(t) = \frac{c\omega_{cm}}{\sqrt{c^2 - \frac{r^2}{t^2}}}. \quad (13)$$

Выражение (13) определяет время прихода m -й моды на частоте ω . График зависимости $\omega_0 = \omega_0(t)$ в координатах (t, ω) называется дисперсионной кривой. Используя определение Φ_m , можно получить фазу m -й модовой компоненты сигнала, распространяющегося в идеальном волноводе:

$$\Phi_m(t) = -\omega_{cm} \sqrt{t^2 - \frac{r^2}{c^2}}. \quad (14)$$

3. Развертывающее преобразование во временной области

Так называемое развертывающее преобразование во временной области [1, 7, 8] (в дальнейшем развертывающее преобразование) является основным инструментом для извлечения данных о модовой дисперсии импульсного сигнала, записанного на одиночный гидрофон. Основная идея [3, 7] данного преобразования сигнала основана на уравнениях (14) и (8). Заметим, что нелинейное преобразование $t = h(t_w)$ времени по формуле

$$h(t_w) = \sqrt{t_w^2 + r^2 / c^2} \quad (15)$$

преобразует фазу $\Phi_m(t)$ в линейную функцию $\Phi_m^w(t_w) = -\omega_{cm} t_w$. При этом модовые компоненты импульса в уравнении (8) также преобразуются в тональные сигналы с циклической частотой ω_{cm} , модулируемые медленно изменяющейся функцией $B_m^w(t_w)$:

$$P^w(t_w) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m^w(t_w) e^{-i\omega_{cm} t_w}. \quad (16)$$

После применения такого преобразования к временному ряду сигнала разделить его на отдельные модовые компоненты значительно проще, чем в физическом времени t [1, 2] (см. уравнение (8)). Определим развертывающее преобразование $P^w = W_h(P)$ сигнала $P(t)$ по формуле:

$$P^w(t_w) = W_h(P)(t_w) = \sqrt{|h'(t_w)|} P(h(t_w)). \quad (17)$$

С помощью несложных вычислений можно доказать следующие свойства этого преобразования [3, 8, 1]:

- развертывающее преобразование W_h является обратимым $W_h(W_h(P)) = P$;
- развертывающее преобразование сохраняет L^2 -норму сигнала (корректирующий множитель $\sqrt{|h'(t_w)|}$ в уравнении (17) вводится именно с этой целью):

$$\int_{-\infty}^{\infty} (W_h(P)(t_w))^2 dt_w = \int_{-\infty}^{\infty} P(t)^2 dt; \quad (18)$$

- развертывающее преобразование индуцирует такую трансформацию фазовых функций $\Phi_m(t)$, что соответствующие дисперсионные кривые $\omega_0 = \omega_0(t)$ преобразуются в прямые линии

$$\omega_0^w = \omega_0^w(t_w) = \omega_{cm}. \quad (19)$$

Последнее свойство говорит о том, что развертывающее преобразование «выпрямляет» дисперсионные кривые сигнала $P(t)$.

Отметим, что точка (t, ω) на дисперсионной кривой исходного сигнала преобразуется в такую точку дисперсионной кривой «развернутого» сигнала (t_w, ω_w) , что, во-первых, согласно уравнениям (13) и (15) $t = h(t_w)$ и, во-вторых,

$$\omega(t_w, \omega_w) = \frac{\omega_w}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{c^2 h(t_w)^2}}}. \quad (20)$$

4. Оценка модовых групповых скоростей из спектрограммы сигнала

В этом разделе описывается метод, позволяющий извлекать значения модовых групповых скоростей

из импульсного сигнала, записанного одиночным гидрофоном. Этот метод основан на обработке спектрограммы сигнала, полученного из исходного с помощью развертывающего преобразования [3, 1].

Несмотря на то, что развертывающее преобразование устроено таким образом, чтобы «выпрямлять» дисперсионные кривые в идеальном волноводе, оно работает и для акустических импульсов, распространяющихся в условиях реального волновода мелкого моря. Это достоинство развертывающего преобразования есть простое следствие следующего факта. Дисперсионные кривые достаточно высоких частот в типичных регулярных геоакустических волноводах (где дно является проницаемым и состоит из нескольких слоёв) могут быть достаточно хорошо приближены дисперсионными кривыми идеального волновода, описываемыми уравнением (13) (несколько хороших примеров представлены в работе [8]). Следовательно, мы можем ожидать, что модовые компоненты реального сигнала, распространяющиеся в мелком море, переходят после применения развертывающего преобразования в сигналы, близкие по своим частотно-временным характеристикам к тональным. Это позволяет использовать следующий алгоритм для оценки дисперсионных кривых по временному ряду принятого в эксперименте импульсного сигнала $f = f(t) = \omega_0(t) / (2\pi)$:

1. Пусть $P(t)$ – это сигнал, записанный с помощью гидрофона, расположенного на расстоянии от источника. Допустим, что t_0 – временной интервал между началом излучения и временем начала прихода на приемник (здесь достаточно априорной грубой оценки параметров r и t_0 , т.к. эти значения будут корректироваться в процессе выполнения инверсии).

2. Применим развертывающее преобразование к сигналу $P(t)$ согласно уравнениям (15–17). В результате получим преобразованный сигнал $P^w(t_w)$.

3. Рассчитаем спектрограмму $SP(P^w) = SP(P^w) \times (t_w, f_w)$ преобразованного сигнала $P^w(t_w)$ с помощью скользящего окна Хэмминга.

4. Выделим отдельные моды из спектрограммы $SP(P^w)$ и аппроксимируем их с помощью постоянных функций $f_w = f_w(t_w) \equiv f_{cm}$, определенных на интервале $(t_w^{m,1}, t_w^{m,2})$.

5. Восстановим дисперсионные кривые $f_w = f_w(t_w)$ исходного сигнала $P(t)$, используя уравнения (15) и (20). При этом функции $f_m = f_m(t)$ будут определены на интервалах $(h(t_w^{m,1}), h(t_w^{m,2}))$.

6. Функции $\tau_m = \tau_m(f)$, обратные к $f_m = f_m(t)$ (т.е. такие, что $\tau_m(f_m(t)) = t$), определяют время прихода m -й моды на частоте. При необходимости модовые групповые скорости $v_{gm} = v_{gm}(f)$ могут быть рассчитаны из уравнения $v_{gm} = r / \tau_m$.

Применим рассмотренный выше алгоритм к импульсному сигналу, который был записан во время эксперимента в Японском море 24–27 октября 2013 г. В этом эксперименте импульсы излучались с помощью компактного портативного пневматического излучателя (рис. 1), который находился на дрейфующем судне.

Точка приема располагалась на расстоянии 7 км от точки излучения. Глубина моря в данном эксперименте постепенно уменьшается вдоль трассы с 55 м (точка источника) до 40 м в точке приема (волновод в этом случае является нерегулярным). Типичный импульсный сигнал $P(t)$ показан на рис. 2. Мы вычисляем развернутый сигнал $P^w(t_w)$ с помощью формулы (17), после чего рассчитываем его спектрограмму



Рис. 1. Пневмоизлучатель

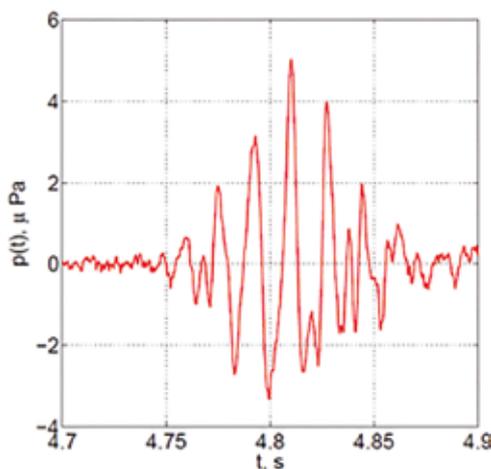


Рис. 2. Записанный в эксперименте сигнал $P(t)$

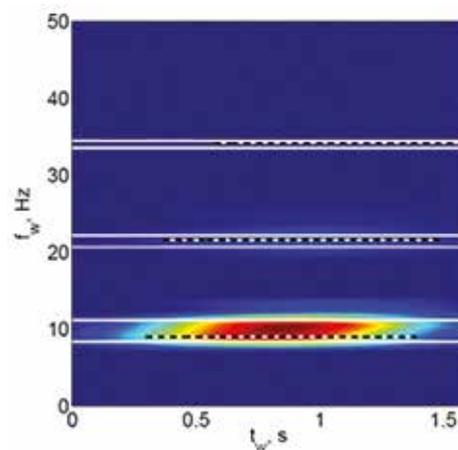


Рис. 3. Спектрограмма сигнала $SP(P^w)(t_w, f_w)$, полученного из сигнала на рис. 2 с помощью развертывающего преобразования, а также дисперсионные кривые $f_w = f_w(t_w)$, определенные согласно описанной методике

$SP(P^w)$ (рис. 3). Горизонтальные пятна на спектрограмме соответствуют трём водным модам, которые легко можно отделить друг от друга. Мы аппроксимируем их с помощью горизонтальных линий, проходящих через точку (t_w, f_w) , в которой $SP(P^w)$ имеет максимум для выбранной моды.

Эти горизонтальные линии представляют собой дисперсионные кривые $f_w = f_w(t_w)$ «развернутого» сигнала (т.е. сигнала, подвергнутого развертывающему преобразованию). Теперь применим обратное преобразование по формуле (20) для получения дисперсионных кривых $f = f_m(t)$ или $t = \tau_m(f)$ исходного сигнала. Они показаны на спектрограмме $SP(P)(t, f)$ исходного сигнала $P(t)$ (рис. 4).

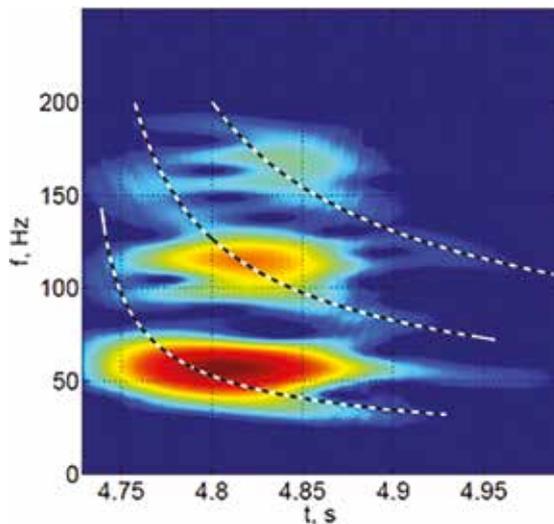


Рис. 4. Спектрограмма $SP(P)(t, f)$ исходного сигнала $P(t)$ и рассчитанные дисперсионные кривые $f = f_m(t)$ или $t = \tau_m(f)$

Отметим что при распространении сигнала в нерегулярном волноводе имеет место взаимодействие мод (этот эффект проявляется особенно ярко для мод на частотах, близких к частоте их отсечки). На спектрограмме взаимодействие мод может проявляться через появление точек ветвления дисперсионных кривых. Для примера на рис. 4 отчетливо видна точка ветвления первой моды на частоте $f \approx 50$ Гц. Наличие такой точки означает, что на более глубоководной части трассы имеется больше число водных мод, чем на мелководной (отсечка второй моды происходит на глубине $40 \text{ м} < H_{c2} < 55 \text{ м}$).

Для достаточно крупных неоднородностей батиметрии в волноводе эффекты взаимодействия мод становятся настолько сильными, что происходит потеря идентичности модовых компонент сигнала. В этом случае модовые импульсы на спектрограмме после развертывающего преобразования не могут быть

аппроксимированы отрезками прямых в каком-либо разумном смысле.

5. Алгоритм инверсии

Алгоритм геоакустической инверсии с использованием развертывающего преобразования в волноводах, которые можно считать регулярными, на основе записи сигнала одиночным гидрофоном [1,2] представлен ниже.

1. Вводится априорная модель волновода. Обычно модель зависит от набора параметров $\bar{A} = (a_1, a_2, \dots, a_q)$, которые определяются в ходе выполнения инверсии (эти параметры могут описывать структуру дна, например, скорость звука, плотность в различных его слоях, а также горизонты расположения границ раздела слоёв). Каждый из этих параметров может варьироваться в интервалах $a_j \in I_j = [a_j^{min}, a_j^{max}]$.

2. Разрабатывается программное обеспечение, позволяющее определять предсказанные модовые задержки $\tau_m^p(f_k)$ для каждого набора параметров \bar{A} и для набора частот f_1, f_2, \dots, f_{N_f} .

3. Выбирается функция невязки $F(\bar{A})$, которая используется для сравнения теоретических времен прихода, рассчитанных для данного набора параметров \bar{A} , и времен прихода, полученных из дисперсионных кривых, восстановленных по данным эксперимента (полученным путем применения развертывающего преобразования к сигналу $P(t)$, как это описано в предыдущем разделе).

4. Решается задача минимизации функции $F(\bar{A})$ на множестве $I_1 \times I_2 \times \dots \times I_q$ (декартовом произведении интервалов вариации параметров задачи).

В случае регулярного волновода значения $\tau_m^p(f_k)$ могут быть легко определены из выражения:

$$\tau_m^p(f_k) = \frac{r}{v_{gm}(2\pi f_k)}, \quad (21)$$

где $v_{gm}(2\pi f_k)$ может быть легко рассчитана из уравнения (7) путем численного дифференцирования. Более удобный способ расчета групповых скоростей, однако, основан на использовании формулы [5]

$$\frac{1}{v_{gm}(f)} = \frac{2\pi f}{k_m(f)} \int_0^{H_{max}} \frac{\phi_m(z, f)}{\rho(z)c(z)^2} dz. \quad (22)$$

В уравнении (22) модовое число $k_m(f)$ и модовая функция могут быть получены с помощью численного метода решения акустической спектральной задачи [5] (мы использовали для этого разработанный в ТОИ ДВО РАН комплекс программ AC_MODES [9]).

Для нерегулярного волновода будет естественно разделить интервал $L = [0, r]$ на N_r сегментов

$L_n = [r_n, r_{n+1}]$ и считать его регулярным внутри каждого из них (здесь $r_1 = 0, r_{N_r+1} = r$). Общее время распространения вдоль трассы $\tau_m^p(f_k)$ для набора параметров \bar{A} может быть рассчитано как сумма времен распространения вдоль всех сегментов:

$$\tau_m^p(f_k) = \sum_{n=1}^{N_r} \frac{r_{n+1} - r_n}{v_{gm}(2\pi f_k, \bar{A}, n)}, \quad (23)$$

где групповая скорость $v_{gm} = v_{gm}(2\pi f_k, \bar{A}, n)$ m -й моды теперь зависит от частоты f_k , параметров волновода \bar{A} и номера сегмента n .

Применим описанный алгоритм к экспериментальным данным. Во время эксперимента проводились измерения батиметрии и скорости звука в воде [10]. Информация об экспериментальном волноводе представлена на рис. 5. Эти данные использовались для расчета τ_m^p . Поскольку одиночный гидрофон дает очень скудную информацию, мы можем надеяться лишь на оценку небольшого числа базовых параметров волновода $\bar{A} = (c_b, \rho_b, \Delta r)$. Здесь c_b – скорость звука в верхнем слое дна, ρ_b – плотность в этом слое, а Δr – корректировка дистанции (точность алгоритма инверсии очень чувствительна к этому параметру, расстояние от источника до приемника r обычно измеряется с помощью судового GPS, который обладает недостаточной точностью).

В настоящей работе будем использовать следующую функцию невязки:

$$F(\bar{A}) = \sum_{k=1}^{N_f} \sum_{m=1}^{N_m} \left| \tau_m^e(f_k) - \frac{r + \Delta r}{r} \tau_m^p(f_k) \right|^2, \quad (24)$$

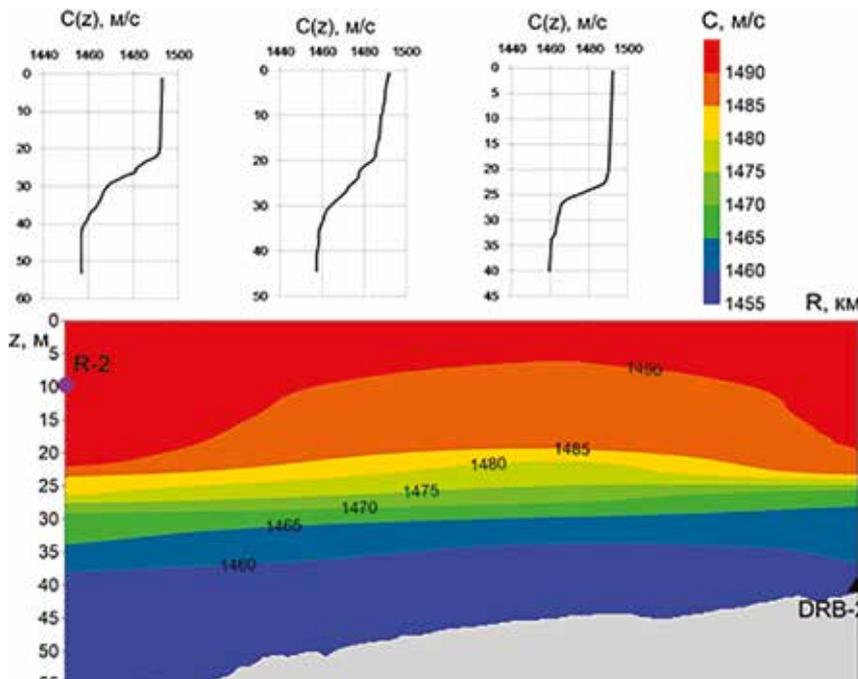


Рис. 5. Экспериментальный волновод

где $\tau_m^e(f_k)$ экспериментальные значения времен прихода, полученные из дисперсионных кривых с помощью разворачивающего преобразования.

Функция $F(\bar{A})$ минимизировалась нами на следующих интервалах: $c_b \in [1550 \text{ м/с}, 2200 \text{ м/с}]$, $\rho_b \in [1.0 \text{ г/см}^3, 2.0 \text{ г/см}^3]$, $\Delta r \in [-200 \text{ м}, 200 \text{ м}]$.

Минимум функции невязки был найден в точке $c_b = 1720 \text{ м/с}$, $\rho_b = 1.31 \text{ г/см}^3$, $\Delta r = -45.6 \text{ м}$. Сравнение теоретических дисперсионных кривых $\tau_m^p(f_k)$ для найденного набора значений параметров волновода с дисперсионными кривыми $\tau_m^e(f_k)$, определенными по данным эксперимента, показано на рис. 6.

Необычно малое значение плотности можно объяснить влиянием упругих эффектов. Хорошо известно, что поперечные волны могут быть аппроксимированы так называемым эквивалентным жидким дном с той же скоростью продольных волн, но гораздо меньшей плотностью.

6. Выводы

В настоящей работе метод геоакустической инверсии с использованием записи импульсного акустического сигнала одиночным гидрофоном был обобщен на случай нерегулярного волновода. Данное обобщение позволяет учесть при выполнении инверсии плавные неоднородности батиметрии на рассматриваемой акустической трассе (если соответствующие данные имеются в наличии).

Обобщенный метод был использован для восстановления параметров дна на экспериментальной

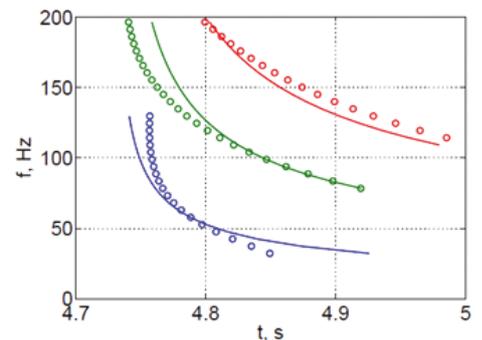


Рис. 6. Сравнение экспериментальных дисперсионных кривых $\tau_m^e(f)$ (маркеры) и теоретических дисперсионных кривых $\tau_m^p(f_k)$ (линии). Графики разного цвета соответствуют модам разных номеров (синие – первая мода, зеленые – вторая, красные – третья)

трассе на шельфе Японского моря (в районе полуострова Гамова). Батиметрия на трассе являлась неоднородной, и глубина моря плавно уменьшалась от 55 м в точке излучения до 40 м в точке приема. Теоретические дисперсионные кривые, полученные для восстановленных значений параметров, хорошо согласуются с дисперсионными кривыми, полученными с помощью разворачивающего преобразования сигнала, записанного в эксперименте. Таким образом, можно ожидать, что параметры реального нерегулярного волновода были успешно восстановлены. Результаты инверсии были подтверждены апостериорным анализом ошибок (не представлен в настоящей работе).

Отметим, что результаты настоящей работы могут использоваться не только при выполнении инверсии по акустическим данным, содержащим временные ряды импульсных сигналов, но и, например, по данным шумовой интерферометрии [11].

Методика геоакустической инверсии и пеленгования источника по акустическим данным, полученным с помощью одиночного гидрофона, рассматривалась в ряде более ранних работ, в частности, в работе [12], методика которой основана на использовании оценок градиента фазы акустического поля вдоль волновода (например, для стационарного приемника и буксируемого источника). В отличие от указанной методики в представленной работе и приемник, и источник являются неподвижными.

Заметим также, что рассматриваемая здесь методика восстановления дисперсионных кривых появилась в рабочем арсенале специалистов по акустике океана лишь недавно. Она активно развивается в настоящее время, и в русскоязычной литературе не успела устояться связанная с данной методикой терминология. Так, авторы работы [11] называют выра-

жение (17) преобразованием деформации. С нашей точки зрения, термин «развертывающее преобразование» более точно отражает существо дела, поскольку речь идет фактически о разворачивании дисперсионных кривых в отрезки прямых линий.

Работа выполнена в рамках тем госзадания ТОИ ДВО РАН «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана» (№ 0211-2021-0001) и «Моделирование разномасштабных динамических процессов в океане» (№ 0211-2021-0009).

ЛИТЕРАТУРА

1. Bonnel J., Chapman N.R. Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators // J. Acoust. Soc. Am. 2011. Vol. 130. P. EL101–EL107.
2. Zeng J., Bonnel J., Chapman N.R. Inversion of seabed attenuation using time-warping of close range data // J. Acoust. Soc. Am. 2013. Vol. 134. P. EL394–EL399.
3. Le Touze G., Nicolas B., Mars J.I., Lacoume J-L. Matched representations and filters for guided waves // IEEE Trans. Signal Process. 2007. Vol. 57. P. 1783–1795.
4. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. // Fundamentals of shallow water acoustics. 2012, Springer, New-York et al.
5. Jensen F.B., Porter M.B., Kuperman W.A., Schmidt H. Computational ocean acoustics // Springer, 2011, New-York et al.
6. Tolstoy I., Clay C. Ocean Acoustics: Theory and Experiment in Underwater Sound // Acoustical Society of America, New York, 1987.
7. Baraniuk R.G., Jones D.L. Unitary Equivalence: a new twist on signal processing // IEEE Trans. Signal Process. 1995. Vol. 43. P. 2269–2282.
8. Le Touze G. Localisation de source par petits fonds en UBF (1–100 Hz) à l'aide d'outils temps-fréquence // Thèse doctorale, 2007.
9. https://github.com/kaustikos/ac_modes (дата обращения: 10.02.2021).
10. Рутенко А.Н., Козицкий С.Б., Манульчев Д.С. Влияние наклонного дна на распространение звука // Акустический журнал. 2015. Т. 61, № 1. С. 76.
11. Сергеев С.Н., Шуруп А.С., Годин О.А., Веденев А.И., Гончаров В.В., Муханов П.Ю., Заботин Н.А., Brown M.G. Выделение акустических мод во Флоридском проливе методом шумовой интерферометрии // Акустический журнал. 2017. Т. 63, № 1. С. 73–83.
12. Грачев Г.А., Кузнецов Г.Н. О средней скорости изменения фазы акустического поля вдоль плоского волновода // Акустический журнал. 1985. Т. 31. № 2. С. 266–268.

Об авторах

ФЕРШАЛОВ Михаил Юрьевич, к.т.н., старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН
Области научных интересов: Акустика океана, распространение акустических волн, математическое моделирование, геоакустическая инверсия
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mail: mfershalov@poi.dvo.ru
Тел.: +7(904)628-13-17
ORCID ID: 0000-0001-8184-1941

ПЕТРОВ Павел Сергеевич, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН
Области научных интересов: Акустика океана, уравнения в частных производных, математическое моделирование, метод параболического уравнения
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mail: petrov@poi.dvo.ru
Тел.: +7(914)960-21-92
ORCID ID: 0000-0002-0087-6681

МАНУЛЬЧЕВ Денис Сергеевич, младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН
Области научных интересов: Акустика океана, распространение акустических волн, математическое моделирование, геоакустическая инверсия
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mail: manulchevds@gmail.com
Тел.: +7(950)298-82-14
ORCID ID: 0000-0002-3744-5308

ЗАХАРЕНКО Алёна Дмитриевна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН
Области научных интересов: Акустика океана, уравнения в частных производных, математическое моделирование, метод параболического уравнения
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mail: zakharenko@poi.dvo.ru
Тел.: +7(423)231-28-60
ORCID ID: 0000-0001-5982-6315

GENERALIZATION OF THE METHOD FOR SINGLE-HYDROPHONE GEOACOUSTIC INVERSION: APPLICATION TO A WAVEGUIDE WITH INHOMOGENEOUS BOTTOM RELIEF

M.Yu. Fershalov, P.S. Petrov, D.S. Manulchev, A.D. Zaharenko

Recently, works on reconstructing waveguide parameters (sound speed, density, etc.) from data recorded by a single hydrophone has been of increasing interest. Traditional methods of geoacoustic inversion are well known and discussed in sufficient detail in many works. They are quite accurate, but they require acoustic data recorded by arrays of hydrophones (antennas). Recently, a geoacoustic inversion method has been presented for relatively shallow water waveguides. It allows to determine not only the parameters of the waveguide, but also the distance to the source, using acoustic data recorded by a single hydrophone. This method is based on the use of the so-called warping transform or deformation operator, which allows to straighten the dispersion curves and greatly improve mode separability. The dispersive curves separated from each other allow us to extract the information about the modal delay times (or modal group velocities) which may be used for the inversion of media parameters. This paper presents an algorithm for geoacoustic inversion, both for model and real waveguides. In this work, the geoacoustic inversion method using the recording of a pulsed acoustic signal by a single hydrophone was generalized to the case of an irregular waveguide. This generalization makes it possible to take into account smooth bathymetry inhomogeneities on the considered acoustic path.

Keywords: ocean acoustics; geoacoustic inversion; waveguide dispersion; warping transform; acoustic modes.

References

1. Bonnel J., Chapman N.R. Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. Vol. 130. P. EL101–EL107.
2. Zeng J., Bonnel J., Chapman N.R. Inversion of seabed attenuation using time-warping of close range data // *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. Vol. 134. P. EL394–EL399.
3. Le Touze G., Nicolas B., Mars J.I., Lacoume J-L. Matched representations and filters for guided waves // *IEEE Trans. Signal Process.* 2007. Vol. 57. P. 1783–1795.
4. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. // *Fundamentals of shallow water acoustics.* 2012, Springer, New-York et al.
5. Jensen F.B., Porter M.B., Kuperman W.A., Schmidt H. *Computational ocean acoustics* // Springer, 2011, New-York et al.
6. Tolstoy I., Clay C. *Ocean Acoustics: Theory and Experiment in Underwater Sound* // Acoustical Society of America, New York, 1987.
7. Baraniuk R.G., Jones D.L. Unitary Equivalence: a new twist on signal processing // *IEEE Trans. Signal Process.* 1995. Vol. 43. P. 2269–2282.
8. Le Touze G. Localisation de source par petits fonds en UBF (1–100 Hz) à l'aide d'outils temps-fréquence // *Thèse doctorale*, 2007.
9. https://github.com/kaustikos/ac_modes (дата обращения: 10.02.2021).
10. Rutenko A.N., Kozitsky S.B., Manul'chev D.S. Effect of a sloping bottom on sound propagation // *Acoustical Physics.* 2015. Vol. 61, No. 1. P. 76.
11. Sergeev S.N., Shurup A.S., Godin O.A., Vedenev A.I., Goncharov V.V., Mukhanov P.Yu., Zobotin N.A., Brown M.G. Separation of acoustic modes in the Florida straits using noise interferometry // *Acoustical Physics.* 2017. Vol. 63, No. 1. P. 73–83.
12. Gratchev G.A., Kuznetsov G.N. On average phase variation velocity of acoustic field in a plane waveguide // *Akusticheskij Zhurnal.* 1985. Vol. 31. No. 2. P. 266–268.

Recommended citation:

Fershalov M.Yu., Petrov P.S., Manulchev D.S., Zaharenko A.D. A METHOD FOR SINGLE-HYDROPHONE GEOACOUSTIC INVERSION: APPLICATION TO A WAVEGUIDE WITH INHOMOGENEOUS BOTTOM RELIEF. *Underwater Investigation and Robotics.* 2021. No. 1 (35). P. 51–59. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_05.

About the authors

FERSHALOV Mikhail Yurievich, PhD, senior (head) researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: Ocean acoustics, acoustic wave propagation,
math modelling, geoacoustic inversion

E-mail: mfershalov@poi.dvo.ru

Тел.: 8(904)6281317

ORCID ID: 0000-0001-8184-1941

PETROV Pavel Sergeevich, PhD, head of the laboratory
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: Ocean acoustics, partial differential equations,
math modelling, parabolic equation method

E-mail: petrov@poi.dvo.ru

Тел.: 8(914)9602192

ORCID ID: 0000-0002-0087-6681

MANUL'CHEV Denis Sergeevich, junior researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: Ocean acoustics, acoustic wave propagation,
math modelling

E-mail: manulchevds@gmail.com

Тел.: 8(950)2988214

ORCID ID: 0000-0002-3744-5308

ZAKHARENKO Alena Dmitryevna, PhD, senior (head)
researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: Ocean acoustics, partial differential equations,
math modelling, parabolic equation method

E-mail: zakharenko@poi.dvo.ru

Тел.: 8(423)2312860

ORCID ID: 0000-0001-5982-6315



СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО МЕТАНА В ВОДЕ В БЕРИНГОВОМ МОРЕ И В ВОСТОЧНОМ СЕКТОРЕ АРКТИКИ

Е.Б. Соколова, Г.И. Мишукова, П.А. Салюк, Р.Б. Шакиров

Представлен анализ одновременных измерений вертикальных профилей концентрации растворенного в морской воде метана (CH_4), флуоресценции хлорофилла-а и окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ) в Дальневосточных морях и восточном секторе Арктики в августе 2013 г. Работа выполнена с целью поиска косвенных гидрооптических критериев, которые могли бы быть оперативными признаками повышенного содержания метана в морской воде. Задача является актуальной в связи с важностью изучения климатической системы Земли и развитием дистанционных методов для применения в газогеофизических исследованиях. Анализ имеющихся данных показал, что во многих случаях изменения значений CH_4 и ОРОВ происходят синхронно. На двух станциях, где в верхнем слое превышение CH_4 над фоновыми значениями можно считать значительным, одновременно наблюдалось повышение содержания ОРОВ. В нижних горизонтах водной толщи на отдельных станциях обнаружены аномальные концентрации метана, которые наиболее вероятно указывают на наличие геологических источников природных газов. На этих же станциях наблюдалось повышение содержания ОРОВ около дна. Сопоставление концентраций метана и максимумов содержания хлорофилла-а не выявило явной закономерности.

Ключевые слова: Флуоресценция, хлорофилл-а, окрашенное растворенное органическое вещество, метан, Восточно-Сибирское море, Чукотское море, Берингово море

Введение

Поиск критериев детектирования источников повышенной концентрации метана в морской воде имеет фундаментальное и прикладное значение, поскольку метан является одним из основных парниковых газов на планете [1]. Его повышенные концентрации в морской воде могут являться индикатором залежей газогидратов [2], нефти и газа [3], а также развития микробных сообществ [4] и геотектонической активности [5].

Одним из признанных классов оперативных методов являются оптические методы, реализованные по различным схемам: контактные *in-situ* и проточные датчики, пассивные и активные методы дистанционного зондирования. Однако для прямого оперативного определения метана оптическими методами в морской воде имеются существенные трудности.

Первая заключается в том, что метан поглощает в основном в инфракрасной области, и в морской среде в этом спектральном диапазоне намного большее влияние оказывает сама вода [6]. Вторая трудность заключается в том, что эффективность комбинационного рассеяния оптического излучения метаном настолько мала, что значимый сигнал может быть получен только при сверхвысоких концентрациях метана в морской воде 10^6 нмоль/л [7]. Поэтому оптические методы прямого определения основаны на том, что:

- метан предварительно выделяется из морской воды с помощью мембран (например, датчика HydroC/ CH_4) или дегазационных систем [8, 9], и его концентрация измеряется в воздушной среде,
- либо измерения проводятся над морской поверхностью в приподнятой атмосфере [10], в предположении, что повышенные значения связаны с существенным положительным потоком из морской толщи; кроме того, такие измерения необхо-

димы для расчета потоков метана через поверхность вода–атмосфера.

До сих пор остается не реализованным потенциал искусственных спутников Земли для изучения метана. Регулярные измерения метана из космоса начались с начала двухтысячных годов с низкоорбитальных спутников с помощью двух основных методов: 1 – измерения обратно рассеянного солнечного излучения в ближнем ИК диапазоне на длинах волн 1.65 и/или 2.3 мкм (радиометры SWIR: SCIAMACHY, серия GOSAT, TROPOMI), 2 – измерения теплового излучения земли в среднем ИК диапазоне в районе 8 мкм (радиометры TIR: AIRS, IASI, TES, CrIS). SWIR и TIR радиометры не позволяют определять точечные источники метана над морской поверхностью, особенно на тех уровнях концентрации, которые распространены в естественной морской среде. Планируемый к запуску спутниковый лидар MERLIN, который сможет детектировать точечные источники около земной поверхности, будет иметь ограничения по полосе сканирования земной поверхности, измеряя над одной точкой не чаще, чем 1 раз в 28 дней при наличии благоприятных погодных условий [11].

Другим возможным подходом для поиска источников повышенных концентраций метана в морской воде является не его прямое определение, а идентификация косвенных процессов, происходящих в морской толще, которые могут быть связаны с поступлением или генерацией метана [12, 13]. Примерами таких косвенных процессов, которые могут быть изучены оптическими методами (в т.ч. дистанционно), являются:

- развитие микробных сообществ [14];
- развитие или деградация фитопланктонных сообществ [15] и изменение их функционального состояния;
- подъем окрашенных растворенных органических веществ (ОРОВ) с нижележащих слоев в зоне действия газовых сипов (или, наоборот, подъем более чистых вод в районах выхода рек);
- изменение цвета льда над водной поверхностью за счет температурного воздействия или «вмораживания» пузырьков.

Отдельные примеры можно увидеть на спутниковых изображениях, приведенных в работах [16, 17].

С точки зрения использования гидрооптических характеристик для идентификации косвенных процессов, сопровождающих выходы метана, могут быть проанализированы спутниковые данные высокого разрешения за счет выявления особых структур на изображениях, связанных с функционированием фитопланктона или подъема ОРОВ/чистой воды, или

применены контактные оптические датчики, определяющие различные типы ОРОВ или оценивающие эффективность фотосинтетического аппарата клеток фитопланктона.

Косвенное определение источников повышенных концентраций метана может быть использовано для предварительного выделения районов, в которых требуются дополнительные исследования с помощью прямых определений концентрации метана, как оперативных, так и стандартных лабораторных измерений. Основными областями, в которых видится перспективным использование косвенного подхода, – это спутниковое зондирование для выявления потенциальных районов исследований и подводная робототехника, где выявление косвенных признаков позволит точнее определить место отбора проб для стандартных определений.

Цель данной работы – проанализировать имеющиеся одновременные измерения вертикальных профилей концентрации растворенного в морской воде метана и таких гидрооптических параметров, как концентрация хлорофилла-а (хл-а), основного пигмента клеток фитопланктона, и концентрация окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ). Оба рассматриваемых гидрооптических параметра значительно влияют на цвет морской поверхности и могут быть использованы как при анализе спутниковых оптических изображений, так и в составе комплекса подводных *in-situ* датчиков.

■ Район исследований, методы и инструменты

Данные получены в Беринговом море и восточном секторе российской части Арктики во время экспедиции Дальневосточного плавучего университета на учебном производственном судне «Профессор Хлюстин» в июле–сентябре 2013 г. по маршруту п. Владивосток – п. Певек. Район характеризуется большим потенциалом по содержанию углеводородов, до сих пор далеким от объективной оценки. Наблюдаются выходы газовых сипов [18, 19], газонасыщенные осадочные отложения [20], залежи газогидратов [21], угольные пласты [22], залежи нефти и газа [23].

Во время экспедиции выполнено 7 станций (рис. 1–7), где произведено одновременное определение вертикальных профилей концентрации растворенного в воде метана, концентрации хлорофилла-а (хл-а) и ОРОВ в морской толще.

Пробы воды для определения метана отбирались в приповерхностном слое на глубине 1–2 м, в придонном слое на расстоянии 1–2 м от дна и в области

максимума хл-а. Расчет концентраций растворенного метана производился по методике в соответствии с работами [24, 25] в лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН (свидетельство Росстандарта № 41 к паспорту лаборатории ПС 1.047–18). Для анализа газового состава использовался хроматограф «Кристалл-Люкс 4000М», снабженный пламенно-ионизационным детектором (ДИП) и двумя детекторами по теплопроводности. ДИП служит для измерения концентрации метана и других органических компонентов с точностью 10^{-5} %. Для калибровки прибора применялись сертифицированные поверочные газовые смеси производства Германии с концентрациями метана 10, 100, 1000 ppm (ppm – part per million = 1×10^{-4} %). Погрешность измерений составляла 5 %.

Для определения вертикальных профилей концентрации хл-а и ОРОВ использовался погружной профилограф SeaBird 19-plus со стандартными датчиками давления, температуры и солености морской воды. Дополнительно на профилографе были установлены прокачиваемые флуориметрические датчики концентрации хл-а и ОРОВ, WETLabs WETStarchlA и WETStar-CDOM соответственно. Исходные калибровочные коэффициенты датчика WETStarchlA были получены в лабораторных условиях фирмой-изготовителем путем сравнения интенсивности флуоресценции хл-а с концентрацией экстрагированных молекул хл-а. Во время экспедиции калибровочные коэффициенты были откорректированы на стандартные определения концентрации хл-а, выполненные спектрофотометрическим методом по ГОСТ 17.1.4.02-90 на основе 60 проб морской воды, отобранных при различных уровнях концентрации хл-а и солнечной освещенности. Данные датчика WETStar-CDOM были откалиброваны фирмой-изготовителем на раствор хирина сульфата дигидрата в

лабораторных условиях, в дальнейшем в работе приводятся значения в мкг/л хирина сульфата дигидрата.

■ Результаты и обсуждение

Станции выполнены как на пути в п. Певек, так и на обратном направлении в п. Владивосток. В разделе они представлены в порядке географического расположения с юга на север и далее с востока на запад, чтобы упростить анализ результатов с учетом региональных особенностей.

Станция № 1 выполнена у подножия островной дуги Командорских островов в Беринговом море 3 августа 2013 г. На рис. 1 приведено распределение концентраций растворенного метана, температуры, солености, концентрации хл-а и ОРОВ в морской толще. Концентрация метана в поверхностном слое составила 3,1 нмоль/л, а на горизонте 23 м в области пикноклина и максимума концентрации хлорофилла-а наблюдалось повышенное значение 12 нмоль/л.

Станция № 7 выполнена на восточном шельфе полуострова Камчатка 29 августа 2013 г., вертикальные профили анализируемых величин представлены на рис. 2. Концентрация метана в поверхностном слое составила 57 нмоль/л (превышение над равновесными значениями в 22 раза). В пробе, отобранной на глубине 6 м, в области пикноклина и локального максимума концентрации хлорофилла-а концентрация метана была намного меньше – 10 нмоль/л, что соизмеримо со значением на пикноклине станции № 1. В придонной пробе на горизонте 18 м концентрация CH_4 увеличилась относительно значения на глубине 6 м и составила 17 нмоль/л. Около дна также увеличилось содержание хл-а и ОРОВ. Одним из возможных объяснений увеличения концентрации около дна на этой станции является тот факт, что генерация метана в осадках

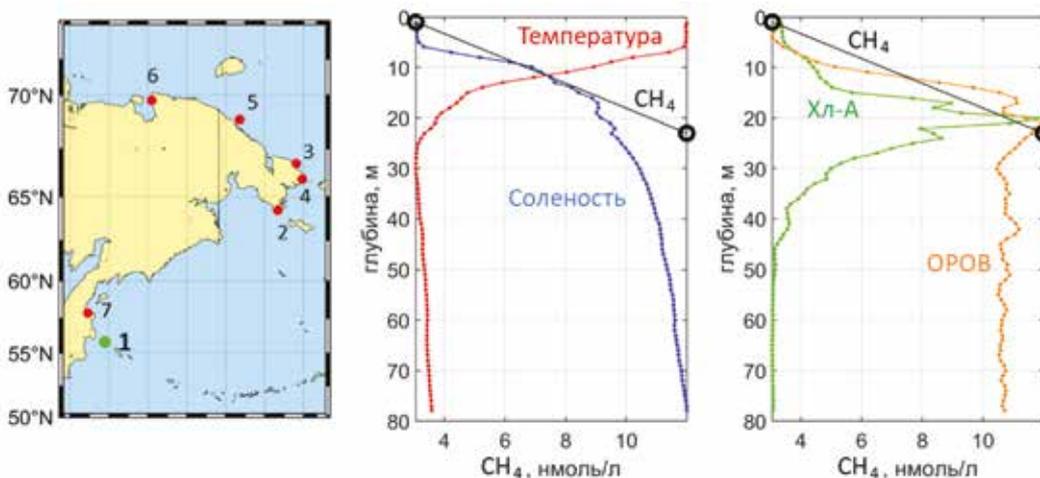
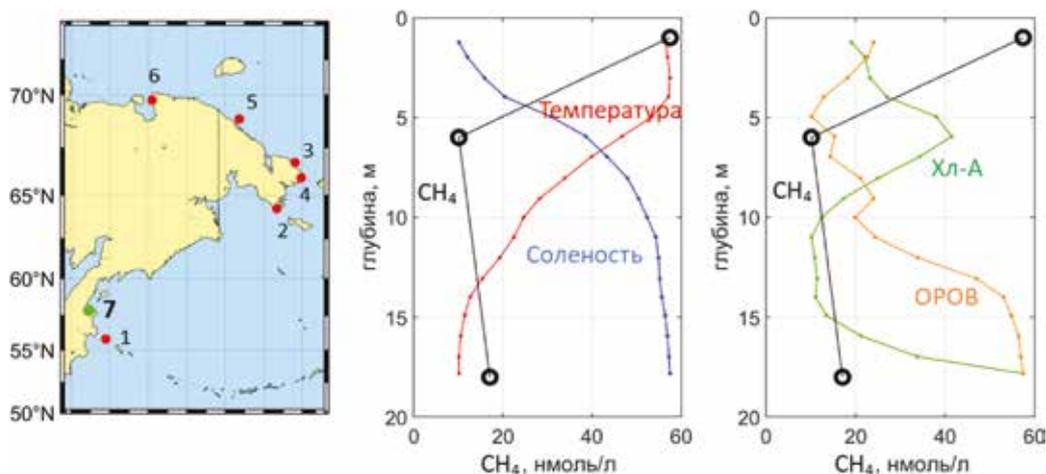


Рис. 1. Станция № 1 около Командорских островов в Беринговом море, 3 августа 2013 г.: вертикальный профиль распределения концентраций метана, нмоль/л; относительный ход температуры, °С; солености, S ‰; концентрация хл-а и ОРОВ в водной толще

Рис. 2. Станция № 7 на восточном шельфе п-ова Камчатка в Беринговом море, 29 августа 2013 г.: вертикальный профиль распределения концентраций метана, нмоль/л; относительный ход температуры, °С; солёности, S ‰; концентрации хл-а и ОРОВ в водной толще



усиливается при приближении к вулканически активным районам. Кроме этого, учитывая близость к берегу возможен вклад антропогенных источников.

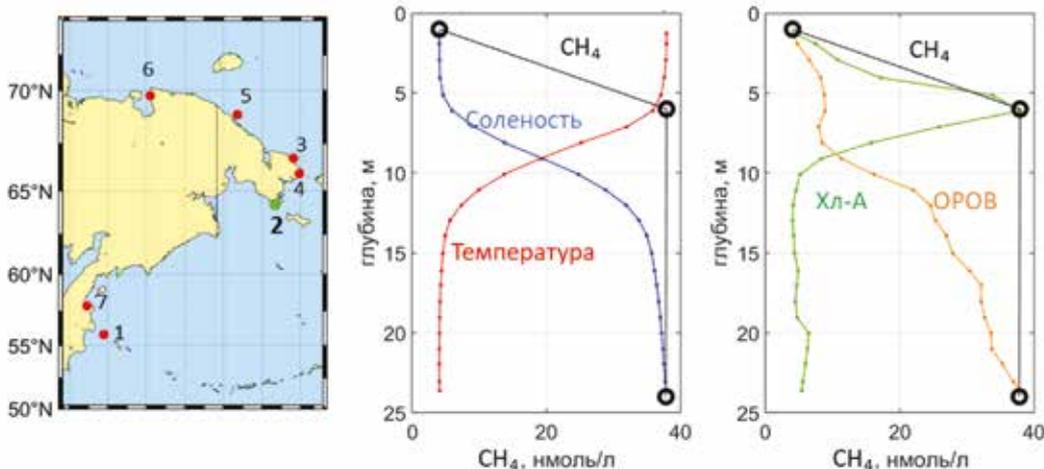
На рис. 3 приведено распределение концентраций растворенного метана, температуры, солёности, концентрации хл-а и ОРОВ на станции № 2 в водной толще в Анадырском проливе на траверзе м. Чукотский в Беринговом море, выполненной 6 августа 2013 г. Вода характеризовалась двухслойной структурой – верхний квазиоднородный слой пониженной солёности отделялся от придонных вод резким скачком термохалинных параметров. На горизонтах 6 м и 24 м выявлены высокие концентрации метана – 37,8 и 37,9 нмоль/л, соответственно. На горизонтах 6 м концентрации метана и хлорофилла-а были максимальными. Содержание ОРОВ, начиная с горизонта 12 м к поверхности, резко уменьшалось.

На рис. 4 приведено распределение концентраций растворенного метана, температуры, солёности, хлорофилла и ОРОВ на станции № 4 в водной толще пролива Беринга, 10 августа 2013 г. Вертикальное распределение термохалинных характеристик в

верхнем 30-метровом слое было квазигомогенным в результате интенсивного перемешивания. В приповерхностном слое концентрация метана составила 6,1 нмоль/л, а в придонном 16,1 нмоль/л, где также увеличилось содержание хл-а и ОРОВ. Осадки в Беринговом проливе сложены главным образом гравелитами – крупнообломочными породами с небольшой долей рыхлого материала. Толщина осадочного слоя минимальна, и на настоящее время источников природного газа там не выявлено. При этом придонные значения концентрации хл-а очень высокие, и соответствующее ОРОВ, находящееся около дна, могло быть продуктами жизнедеятельности клеток фитопланктона (как «новое» РОВ, связанное с процессами функционирования клеток, так и РОВ, получаемое в результате отмирания и деградации клеток).

На рис. 5 приведено распределение концентраций растворенного метана, температуры, солёности, хлорофилла и ОРОВ в водной толще на станции № 3 на шельфе в южной части Чукотского моря, 8 августа 2013 г. На горизонте 10 м наблюдалось резкое скачкообразное изменение термохалинных парамет-

Рис. 3. Станция № 2 на траверзе м. Чукотский в Беринговом море, 6 августа 2013 г.: вертикальный профиль распределения концентраций метана, нмоль/л; относительный ход температуры, °С; солёности, S ‰; концентрация хл-а и ОРОВ.



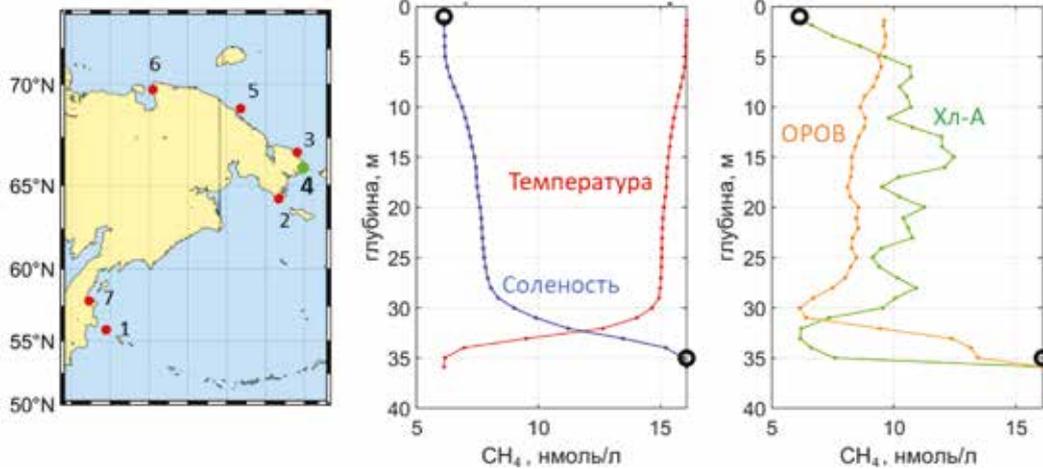


Рис. 4. Станция № 4 около пролива Беринга в Беринговом море, 10 августа 2013 г.: вертикальный профиль распределения концентраций метана, нмоль/л; относительный ход температуры, °С; солёности, S ‰; концентрации хл-а и ОРОВ в водной толще

тров. Концентрации метана были минимальны на дне и около пикноклина с небольшим увеличением в приповерхностном слое, при этом данные значения были выше возможных фоновых значений. Такая обстановка обычно характерна для районов с отсутствием активных газовых источников на дне (сипы, венты и др.).

На рис. 6 приведено распределение концентраций растворенного метана, температуры, солёности, хл-а и ОРОВ в водной толще на станции № 5, выполненной около пролива Лонга на шельфе Чукотского моря 13 августа 2013 г. На станции вода характеризовалась двухслойной структурой – верхний квазиоднородный слой отделялся от придонных вод плавным изменением термохалинных параметров. Аномальные концентрации метана средней интенсивности 20,1 нмоль/л и 19,1 нмоль/л фиксировались на горизонтах 25 м и 40 м соответственно. Содержание хлорофилла-а было максимальным на горизонте 23 м, а значения содержания ОРОВ, начиная с горизонта 10 м к поверхности, резко уменьшались. Некоторые

исследователи считают, что метан в Чукотском море имеет биогенетический генезис [26, 27].

На рис. 7 приведено распределение концентраций растворенного метана, температуры, солёности, концентрации хл-а и ОРОВ в водной толще на станции № 6 на мелководье Чаунской Губы в Восточно-Сибирском море, 21 августа 2013 г. На горизонтах 6 и 12 м концентрации метана составили 32,3 и 19,1 нмоль/л соответственно.

Общий анализ

В таблице представлен сводный анализ для всех станций по одновременным изменениям концентрации растворенного метана в воде и концентрации окрашенного органического вещества вдоль вертикального профиля в морской толще, а также приведены значения концентраций метана, растворенного в воде.

Профили распределения концентраций метана показали, что в прибрежной зоне наблюдались изменчивые концентрации метана, чаще всего повы-

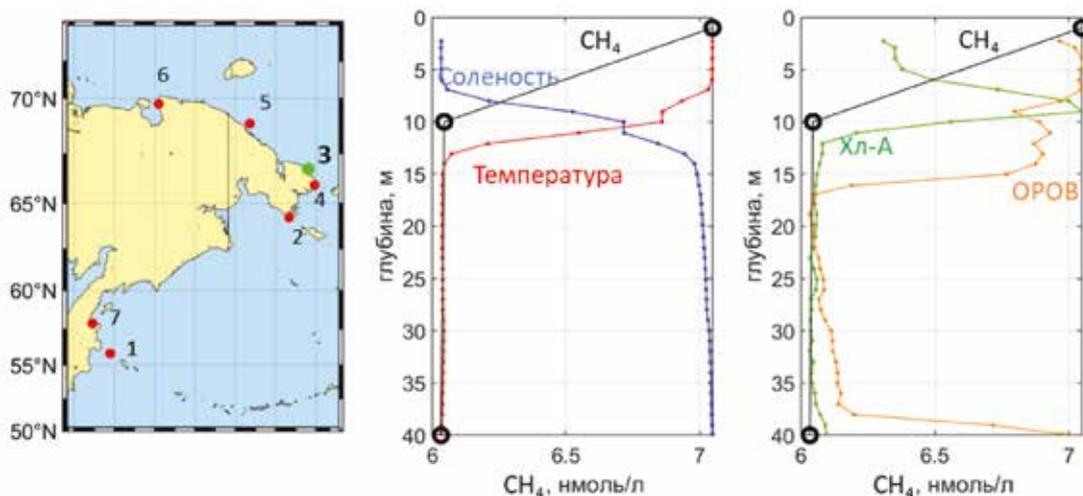


Рис. 5. Станция № 3 на шельфе в южной части Чукотского моря, 8 августа 2013 г.: вертикальный профиль распределения концентраций метана, нмоль/л; относительный ход температуры, °С; солёности, S ‰; концентрации хл-а и ОРОВ в водной толще

Рис. 6. Станция № 5 около пролива Лонга на шельфе Чукотского моря, 13 августа 2013 г.: вертикальный профиль распределения концентраций метана, нмоль/л; относительный ход температуры, °С; солености, S ‰; концентрация хл-а и ОРОВ в водной толще.

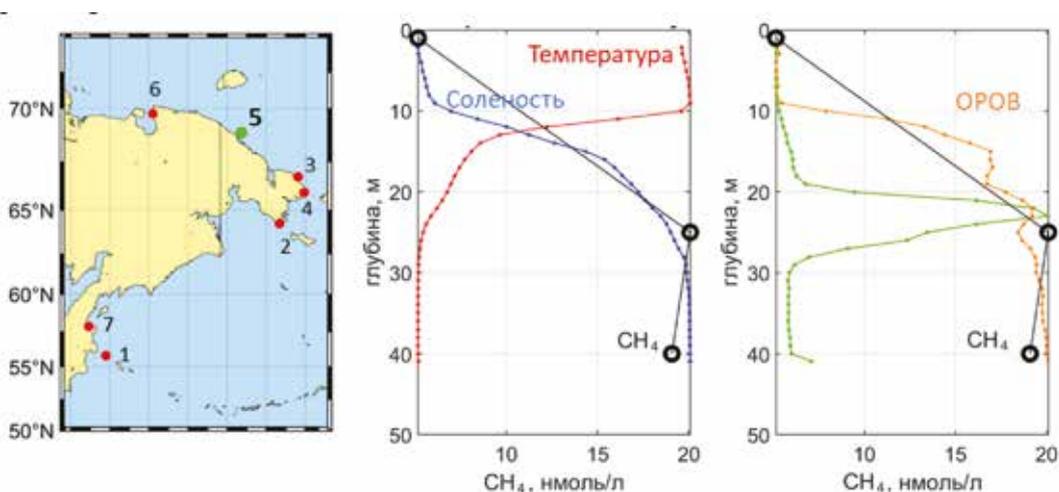
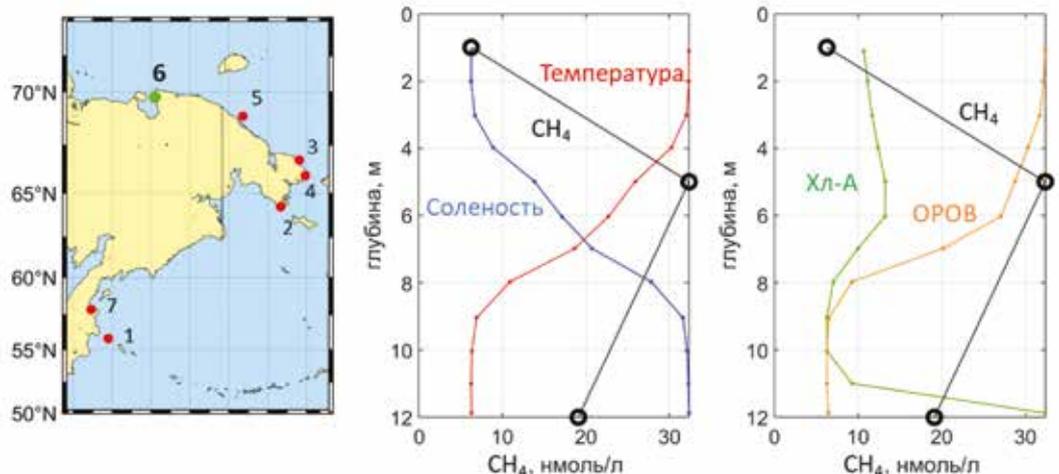


Рис. 7. Станция № 6 на мелководье Чаунской Губы в Восточно-Сибирском море, 21 августа 2013 г.: вертикальный профиль распределения концентраций метана, нмоль/л; относительный ход температуры, °С; солености, S ‰; хлорофилла и растворенного кислорода в водной толще



Анализ изменений концентрации растворенного метана в воде и концентрации окрашенного органического вещества вдоль вертикального профиля в морской толще

Показатель	№ станции						
	1	7	2	4	3	5	6
	Б.	Б.	Б.	Б.	Ч.	Ч.	В.С.
Изменение концентрации ОРОВ на поверхности	-	+	-	_*	+	-	+
Изменение концентрации растворенного метана на поверхности	-	+	-	_*	+	-	-
Изменение концентрации ОРОВ около дна	+*	+	+	+	+	+*	-
Изменение концентрации растворенного метана около дна	+*	+	+*	+*	0	+*	-
Концентрация метана в поверхностном слое	3,1	57,5	4,1	6,1	7,0	5,2	6,3
Концентрация метана в области максимума хл-а (пикноклина)	12,0	10,2	37,9	н/д	6,0	20,1	32,3
Концентрация метана в придонном слое	12,1	17,1	37,8	16,1	6,0	19,1	19,1

Примечание. Б. – Берингово море, Ч. – Чукотское, В.С. – Восточно-Сибирское, «+» – положительное изменение, «-» – отрицательное изменение.

* относительно противоположного горизонта отбора.

шенные в придонном слое и близкие к равновесным с атмосферой концентрации CH_4 в поверхностном слое, так как переход растворенного метана из воды в атмосферу был ограничен стратификацией вод, кроме станций № 3 и № 7, где концентрация растворенного метана в поверхностном слое увеличивалась и наблюдалось повышение содержания ОРОВ.

Из рис. 1–7 и таблицы видно, что в большинстве случаев изменения значений для рассматриваемых параметров происходят синхронно. При этом часто наблюдаются случаи, когда концентрации метана примерно одинаковые в области пикноклина и на дне (соответствующие ячейки отмечены звездочкой, станции № 1, 2, 4, 5). Это говорит о том, что газ накапливается в нижнем слое водной толщи и равномерно в нем распределяется под пикноклином, в то время как повышение содержания ОРОВ обычно наблюдается только около дна (станции № 7, 2, 4, 3), что может свидетельствовать о накоплении дегридирующих молекул растворенных органических веществ на этом горизонте либо о подъеме ОРОВ со дна.

Заключение

В результате проведенных исследований в Беринговом море и восточном секторе российской части Арктики выявлено, что распределение растворенного метана в морской воде носит явно неоднородный характер. В 50% случаев для района работ в период наблюдений характерно незначительное превышение метана в поверхностном слое морских вод. На двух станциях (№ 3 и № 7), где превышение можно считать значительным, одновременно наблюдалось повышение содержания ОРОВ. В нижних горизонтах водной толщи могут наблюдаться аномальные концентрации метана, которые наиболее вероятно указывают на наличие геологических источников природных газов. Последние поступают в водную толщу из морских осадков, как правило, в виде площадных высачиваний и концентрированной разгрузки по системе разломов. Эти же процессы могут влиять на наблю-

даемые повышения концентрации ОРОВ около дна. Сопоставление концентраций метана и максимумов содержания хл-а не выявило явной закономерности, позволяющей выделить идентифицирующий признак, по всей видимости необходимо анализировать дополнительные оптические характеристики, например, такие как флуоресценция полиароматических углеводородов [28] или флуоресценция триптофана, связанная с развитием микробных сообществ [14].

Работа выполнена в рамках госбюджетных тем ТОИ ДВО РАН: «Исследование состояния и изменений природной среды на основе комплексного анализа и моделирования гидрометеорологических, биогеохимических, геологических процессов и ресурсов Дальнего Востока» (рег. номер ААА-А-А19-119122090009-2); «Технологии дистанционного зондирования Земли и наземных измерительных систем в комплексных исследованиях динамических явлений в океане и атмосфере».

ЛИТЕРАТУРА

1. Badr O., Probert S.D., O'Callaghan P.W. Methane: A greenhouse gas in the Earth's atmosphere // *Applied Energy*. 1992. Vol. 41, No. 2. P. 95–113. doi:10.1016/0306-2619(92)90039-e.
2. Касаткин С.А., Обжиров А.И. Флюидоконтролирующее значение разломной зоны носатпу и условия формирования потоков метана и залежей газогидратов (Охотоморский регион) // *Тихоокеанская геология*. 2018. Т. 37, № 1. С. 61–66.
3. Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В., Мазуров А.К., Рубан А.С. Газоносность донных осадков и геохимические признаки нефтегазоносности шельфа Восточно-сибирского моря // *Тихоокеанская геология*. 2017. Т. 36, № 4. С. 77–84.
4. Еськова А.И., Пономарева А.Л., Легкодимов А.А., Калгин В.Ю., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Особенности распределения индикаторных групп микроорганизмов в донных отложениях Южно-Китайского моря // *Изв. Иркут. гос. ун-та. Серия: Науки о Земле*. 2020. Т. 33. С. 33–43.
5. Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В., Шакиров Р.Б. Геотектонические аспекты формирования углегазоносных бассейнов северо-востока России // *Вест. Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр»*. Серия: Науки о Земле. 2015. № 3 (27). С. 58–70.
6. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y. et al. The HITRAN2016 Molecular Spectroscopic Database // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2017. Vol. 203. P. 3–69. doi:10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.
7. White S.N. Qualitative and quantitative analysis of CO₂ and CH₄ dissolved in water and seawater using laser Raman spectroscopy // *Applied spectroscopy*. 2010. Vol. 64, N 7. P. 819–827.
8. Boulart C., Connelly D.P., Mowlem M.C. Sensors and technologies for in situ dissolved methane measurements and their evaluation using Technology Readiness Levels // *Trends in Analytical Chemistry*. 2010. Vol. 29, N. 2. P. 186–195. doi:10.1016/j.trac.2009.12.001.
9. Космач Д.А., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Куриленко А.В., Густафссон О., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Метан в поверхностных водах окраинных морей северной Евразии // *Докл. Академии наук*. 2015. Т. 465, № 4. С. 441.
10. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Gustafsson Ö. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Geoscience*. 2013. Vol. 7, N 1. P. 64–70. doi:10.1038/ngeo2007.
11. Ehret G., Bousquet P., Pierangelo C., Alpers M., Millet B. et al. MERLIN: A French-German Space Lidar Mission Dedicated to Atmospheric Methane // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, N 10. 1052. doi: 10.3390/rs9101052.
12. Бондур В.Г., Кузнецова Т.В. Выявление газовых силов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 4. С. 30–43.
13. Салюк П.А., Буланов В.А., Корсков И.В., Буланов А.В., Крикун В.А., Майор А.Ю., Бубновский А.Ю., Букин О.А., Ляхов Д.Г. Возможность дистанционного обнаружения повышенных концентраций метана в морской воде с использованием методов оптической спектроскопии на подводных телеуправляемых аппаратах // *Подводные исследования и робототехника*. 2011. Т. 12, № 2. С. 43–51.
14. Determann S., Lobbes J.M., Reuter R., Rullkötter J. Ultraviolet fluorescence excitation and emission spectroscopy of marine algae and bacteria // *Marine Chemistry*. 1998. Vol. 62, N 1/2. P. 137–156. doi: 10.1016/s0304-4203(98)00026-7.
15. Букин О.А., Голик С.С., Салюк П.А., Бауло Е.Н., Ластовская И.А. Изменение спектров лазерно-индуцированной флуоресценции морской воды в процессе деградации растворенного органического вещества // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2007. Т. 74, № 1. С. 103–107.
16. Богдавленский В.И., Богдавленский И.В., Никонов Р.А., Сизов О.С. Технологии дистанционного выявления и мониторинга дегазации земли в Арктике: полуостров Ямал, озеро Нейто // *Арктика: экология и экономика*. 2018. Т. 30, № 2. С. 83–93.
17. Богдавленский В.И., Богдавленский И.В., Каргина Т.Н., Никонов Р.А., Сизов О.С. Дегазация земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // *Арктика: экология и экономика*. 2019. Т. 34, № 2. С. 31–47.
18. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the Permafrost-Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences*. 2019. Vol. 9, N 6. 251. doi:10.3390/geosciences9060251.
19. Полоник Н.С. Источники метана на Корякском склоне Берингова моря // *Природа*. 2019. № 6. С. 36–43.
20. Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. Газогеохимические аномалии в осадках Восточно-сибирского моря // *Вест. Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр»*. Серия: Науки о Земле. 2013. Т. 21, № 1. С. 98–110.

21. Матвеева Т.В., Семёнова А.А., Щур Н.А., Логвина Е.А., Назарова О.В. Перспективы газогидратоносности Чукотского моря // Зап. Горного института. 2017. Т. 226. С. 387–396. doi: 10.25515/PMI.2017.4.387
22. Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В. Геоструктурные закономерности распределения мерзлоты в углегазонасных бассейнах северо-востока России // Криосфера Земли. 2014. Т. 18, № 1. С. 3–11.
23. Грецкая Е.В., Петровская Н.А. Нефтегазоносность Хатырского осадочного бассейна (Берингово море) // Газовая промышленность. 2010. Т. 654, № 14. С. 3844.
24. Wiessenburg D.A., Guinasso N.L. Equilibrium solubility of methane, carbon dioxide, and hydrogen in water and sea water // J ChemEng Data Texas. 1979. Vol. 24, N 4. P. 356–360.
25. Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and seawater // Journal of Chemical & Engineering Data. 1976. Vol. 21, N 1. P. 78–80.
26. Fenwick L., Capelle D., Damm E., Zimmermann S., Williams W.J., Vagle S., Tortell P.D. Methane and nitrous oxide distributions across the North American Arctic Ocean during summer, 2015 // J. of Geophysical Research: Oceans. 2017. Vol. 122. P. 390–412. doi:10.1002/2016JC012493.
27. Li Y., Zhan L., Zhang J., Chen L., Chen J., Zhuang Y. A significant methane source over the Chukchi Sea shelf and its sources // Continental Shelf Research. 2017. Vol. 148. P. 150–158. doi: 10.1016/j.csr.2017.08.019.
28. Салюк П.А., Дорошенко И.М., Букин О.А., Соколова Е.Б., Бауло Е.Н. Изменения свойств флуоресценции морской воды при ее перемешивании с нефтью // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 443–448.

Об авторах

СОКОЛОВА Екатерина Борисовна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН)
Область научных интересов: лазерная спектроскопия
Адрес: г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mail: sokolova.eb@poi.dvo.ru
ORCID ID: 0000-0002-8923-094X

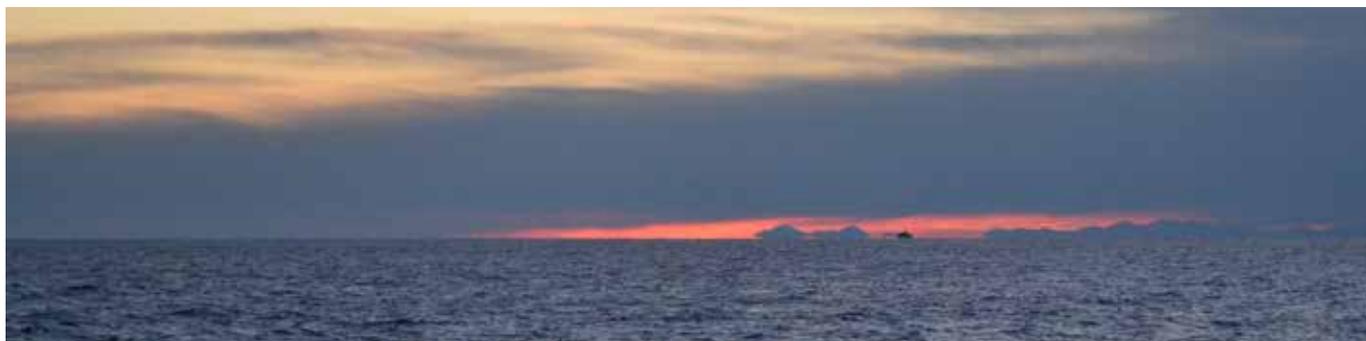
МИШУКОВА Галина Ивановна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН),
Область научных интересов: газогеохимия
Адрес: г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mail: gmishukova@poi.dvo.ru
ORCID ID: 0000-0003-1820-6069

САЛЮК Павел Анатольевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН),
Адрес: г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mail: psalyuk@poi.dvo.ru
Область научных интересов: оптика океана
ORCID ID: 0000-0002-3224-710X

ШАКИРОВ Ренат Белалович, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора, заведующий лабораторией
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН),
Область научных интересов: газогеохимия
Адрес: г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mail: ren@poi.dvo.ru
ORCID ID: 0000-0003-1202-0351

Для цитирования:

Соколова Е.Б., Мишуква Г.И., Салюк П.А., Шакиров Р.Б. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО МЕТАНА В ВОДЕ В БЕРИНГОВОМ МОРЕ И В ВОСТОЧНОМ СЕКТОРЕ АРКТИКИ // Подводные исследования и робототехника. 2021. No. 1(35). P. 60–69. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_06.



JOINT ANALYSIS OF HYDRO-OPTICAL PARAMETERS AND DISSOLVED METHANE IN WATER COLUMN OF THE BERING SEA AND THE EASTERN SECTOR OF THE ARCTIC

E.B. Sokolova, G.I. Mishukova, P.A. Salyuk, R.B. Shakirov

The analysis of simultaneous measurements of the vertical profiles of the concentration of methane dissolved in seawater (CH₄), chlorophyll-a fluorescence, and colored dissolved organic matter (CDOM) in the Far Eastern seas and the Eastern sector of the Russian Arctic in August 2013 is presented. The work aims to search for indirect hydro-optical criteria that can indicate increased methane content in seawater. The task is relevant in connection with the importance of studying the Earth's climate system and developing remote methods for use in geophysical research. Analysis of the available data showed that in many cases, changes in the values of CH₄ and CDOM occur synchronously. At two stations where the CH₄ anomalies in the upper layer can be considered significant, an increase in the CDOM content was simultaneously observed. In the lower horizons of the water column, abnormal methane concentrations were found at individual stations, which most likely indicate the presence of geological sources of natural gases. At the same stations, an increase in the content of CDOM near the bottom was observed. A comparison of methane concentrations and chlorophyll-a maxima did not reveal a clear correlation between these parameters.

Keywords: Fluorescence, chlorophyll-a, colored dissolved organic matter, methane, East Siberian Sea, Chukchi Sea, Bering Sea

References

1. Badr O., Probert S.D., O'Callaghan P.W. Methane: A greenhouse gas in the Earth's atmosphere. 1992. Vol. 41, No. 2. P. 95–113. doi:10.1016/0306-2619(92)90039-e.
2. Kasatkin S.A., Obzhirov A.I. Fluid-Controlling Significance of the Nosappu Fracture Zone and Conditions for the Formation of Methane Fluxes and Gas Hydrates (Sea of Okhotsk Region). Russian Journal of Pacific Geology. 2018. Vol. 37, No. 1. C. 61–66. (In Russian)
3. Gresov A.I., Obzhirov A.I., Yatsuk A.V., Mazurov A.K., Ruban A.S. Gas content of Bottom Sediments and Geochemical Indicators of Oil and Gas on the Shelf of the East Siberian Sea. Russian Journal of Pacific Geology. 2017. Vol. 36, No. 4. P. 77–84. (In Russian)
4. Eskova A.I., Ponomareva A.L., Legkodimov A.A., Kalgin V.Yu., Shakirov R.B., Obzhirov A.I. *Osobennosti raspredeleniya indikatornykh grupp mikroorganizmov v donnykh otlozheniyah Yuzhno-kitajskogo morya. «The Bulletin of Irkutsk State University». Series «Earth Sciences».* 2020. Vol. 33. P. 33–43.
5. Gresov A.I., Obzhirov A.I., Yatsuk A.V., Shakirov R.B. Geotectonic aspects of coal-gas basins formation in North-East of Russia. Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center». Earth Sciences. 2015. No. 3 (27). P. 58–70.
6. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y. et al. The HITRAN2016 Molecular Spectroscopic Database. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. Vol. 203. P. 3–69. doi:10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.
7. White S.N. Qualitative and quantitative analysis of CO₂ and CH₄ dissolved in water and seawater using laser Raman spectroscopy. Applied spectroscopy. 2010. Vol. 64, No. 7. P. 819–827.
8. Boulart C., Connelly D.P., Mowlem M.C. Sensors and technologies for in situ dissolved methane measurements and their evaluation using Technology Readiness Levels. Trends in Analytical Chemistry. 2010. Vol. 29, No. 2. P. 186–195. doi:10.1016/j.trac.2009.12.001.
9. Kosmach D.A., Sergienko V.I., Dudarev O.V., Kurilenko A.V., Gustafsson O., Semiletov I.P., Shakhova N.E. *Metan v poverhnostnykh vodakh okrainnykh morej severnoj Evrazii. Doklady Akademii nauk.* 2015. Vol. 465, No. 4. P. 441.
10. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Gustafsson Ö. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. Nature Geoscience. 2013. Vol. 7, No. 1. P. 64–70. doi:10.1038/ngeo2007.
11. Ehret G., Bousquet P., Pierangelo C., Alpers M., Millet B. et al. MERLIN: A French-German Space Lidar Mission Dedicated to Atmospheric Methane. Remote Sensing. 2017. Vol. 9, No. 10. 1052. doi:10.3390/rs9101052.
12. Bondur V.G., Kuznetsova T.V. *Vyyavlenie gazovykh sipov v akvatoriyah arkticheskikh morej s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya. Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2015. No. 4. P. 30–43.
13. Salyuk P.A., Bulanov V.A., Korskov I.V., Bulanov A.V., Krikun V.A., Major A.Yu., Bubnovsky A.Yu., Bukin O.A., Lyakhov D.G. UUV optical spectroscopy methods for underwater methane detection. Underwater investigations and robotics. 2011. Vol. 12, No. 2. P. 43–51.
14. Determann S., Lobbes J.M., Reuter R., Rullkötter J. Ultraviolet fluorescence excitation and emission spectroscopy of marine algae and bacteria. Marine Chemistry. 1998. Vol. 62, No. 1–2. P. 137–156. doi:10.1016/s0304-4203(98)00026-7.

15. Bukin O.A., Golik S.S., Salyuk P.A., Baulo E.N., Lastovskaya I.A. Change in laser-induced fluorescence spectra of sea water during degradation of dissolved organic matter. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2007. Vol. 74. No. 1. P. 103–107.
16. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A., Sizov O.S. Technologies for Remote Detection and Monitoring of the Earth Degassing in the Arctic: Yamal Peninsula, Neito Lake. *Arctic: Ecology and Economy*. 2018. Vol. 30, No. 2. P. 83–93.
17. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N., Nikonov R.A., Sizov O.S. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the thermokarst lakes gas eruption. *Arctic: Ecology and Economy*. 2019. Vol. 34, No. 2. P. 31–47.
18. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf. *Geosciences*. 2019. Vol. 9, No. 6. 251. Doi:10.3390/geosciences9060251.
19. Polonik N.S. *Istochniki metana na Koryakskom sklone Beringova morya. Priroda*. 2019. No. 6. P. 36–43.
20. Shakirov R.B., Sorochinskaya A.V., Obzhairov A.I. Gasgeochemical anomalies in the sediments of East-Siberian Sea. *Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center»*. *Earth Sciences*. 2013. Vol. 21, No. 1. P. 98–110.
21. Matveeva T.V., Semenova A.A., Shchur N.A., Logvina E.A., Nazarova O.V. *Perspektivy gazogidratonosnosti Chukotskogo mor. Zapiski Gornogo instituta*. 2017. Vol. 226. P. 387–396. Doi: 10.25515/PMI.2017.4.387.
22. Gresov A.I., Obzhairov A.I., Yatzuk A.V. Geostructural regularities of the distributions of permafrost in gas- and coal-bearing basins in the North-East of Russia. *Earth's Cryosphere*. 2014. Vol. 18. No. 1. P. 3–11.
23. Gretskeya E.V., Petrovskaya N.A. *Neftegazonosnost' Hatyrskogo osadochnogo bassejna (Beringovo more)*. *Gas Industry*. 2010. Vol. 654, No. 14. P. 38–44.
24. Wiessenburg D.A., Guinasso N.L. Equilibrium solubility of methane, carbon dioxide, and hydrogen in water and sea water. *J ChemEng Data Texas*. 1979. Vol. 24, No. 4. P. 356–360.
25. Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and seawater. *Journal of Chemical&Engineering Data*. 1976. Vol. 21, No. 1. P. 78–80.
26. Fenwick L., Capelle D., Damm E., Zimmermann S., Williams W.J., Vagle S., Tortell P.D. Methane and nitrous oxide distributions across the North American Arctic Ocean during summer, 2015. *J. of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122. P. 390–412. Doi:10.1002/2016JC012493.
27. Li Y., Zhan L., Zhang J., Chen L., Chen J., Zhuang Y. A significant methane source over the Chukchi Sea shelf and its sources. *Continental Shelf Research*. 2017. Vol. 148. P. 150–158. Doi: 10.1016/j.csr.2017.08.019.
28. Saluk P.A., Doroshenkov I.M., Bukin O.A., Sokolova E.B., Baulo E.N. Change of seawater fluorescence properties when mixing with crude oil. *Optika Atmosfery i Okeana*. 2014. Vol. 27. No. 05. P. 443–448. [in Russian].

About the authors

SOKOLOVA Ekaterina Borisovna, Candidate of physical and mathematical sciences,

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Science (POI FEB RAS), Vladivostok, Russia,

Adress:

E-mail: sokolova.eb@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0002-8923-094X

MISHUKOVA Galina Ivanovna, Candidat of geographical sciences, Laboratory of gasgeochemistry,

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Science (POI FEB RAS), Vladivostok, Russia

E-mail: gmishukova@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0003-1820-6069

SALYUK Pavel Anatolievich, Candidate of physical and mathematical sciences, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Science (POI FEB RAS), Vladivostok, Russia,

E-mail: psalyuk@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0002-3224-710X

SHAKIROV Renat Bellalovich, Doctor of geological and mineralogical sciences, Laboratory of gasgeochemistry, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Science (POI FEB RAS), Vladivostok, Russia

E-mail: ren@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0003-1202-0351

Recommended citation:

Sokolova E.B., Mishukova G.I., Salyuk P.A., Shakirov R.B. JOINT ANALYSIS OF HYDRO-OPTICAL PARAMETERS AND DISSOLVED METHANE IN WATER COLUMN OF THE BERING SEA AND THE EASTERN SECTOR OF THE ARCTIC. *Underwater Investigation and Robotics*. 2021. No. 1 (35). P. 60–69. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_06.



К ОЦЕНКЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В МЕЛКОМ МОРЕ В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

С.Б. Касаткин

Анализируются результаты экспериментальных исследований звукового поля, зарегистрированного комбинированными приёмниками, образующими вертикально ориентированную двухэлементную антенну. Звуковое поле формировалось дискретными составляющими вально-лопастного звукоряда шумового сигнала НИС «Юрий Молоков» в инфразвуковом диапазоне частот 2–20 Гц, а также буксируемым низкочастотным излучателем полигармонического сигнала в диапазоне частот 30–60 Гц. Глубина моря и рабочий диапазон частот 2–20 Гц исключали возможность возбуждения нормальных волн дискретного спектра в модельном волноводе Пекериса в этом диапазоне частот. По результатам спектрального анализа шумового сигнала получена оценка потенциальной помехоустойчивости комбинированного приёмника при использовании полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля. По результатам анализа вертикальной структуры звукового поля был сделан вывод о том, что звуковое поле на предельно низких частотах инфразвукового диапазона сформировано регулярной волной Рэлея–Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно. С увеличением частоты возрастает роль первой неоднородной (медленной) волны, возбуждаемой комплексным угловым спектром источника. В ближней зоне источника возрастает роль обобщённой волны Шолте, локализованной на горизонте источника, а звуковое поле формируется парой волн Шолте, регулярной и обобщённой, и первой неоднородной волной.

Ключевые слова: комбинированный приёмник, шумовое поле, помехоустойчивость, обобщённые неоднородные волны, гибридные волны.

Введение

Звуковые поля, формируемые в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот движущимся источником, надводным или подводным, играют важную роль в проблеме разработки средств освещения подводной обстановки (СОПО). Проблема заключается в том, что в модельном волноводе Пекериса, который чаще всего используется в классическом описании звуковых полей, волновое движение, представленное нормальными волнами дискретного спектра, на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса, отсутствует. В первой части экспериментального исследования этой проблемы [1] были получены убедительные доказательства доминирующей роли неоднородных обобщённых (гибридных) волн, локализованных на горизонте источника, в формировании звукового поля инфра-

звукового диапазона. Эксперимент [1] проводился в ближней зоне источника на расстоянии 1–2 км от него в осеннее время года (октябрь), когда влияние придонного звукового канала в значительной мере ослаблено. Цель настоящей работы заключается в дальнейшем исследовании пространственно-частотной структуры звуковых полей инфразвукового диапазона в других гидрологических условиях и на достаточно больших расстояниях от источника. Отметим, что неоднородные обобщённые (гибридные) волны появляются при решении граничной задачи (ГЗ) для модельного волновода Пекериса, а также для более сложного волновода жидкий слой – твёрдое полупространство в несамосопряжённой модельной постановке. Такая модельная постановка является естественной и математически корректной для открытых систем типа волновода, нагруженного на полупространство. Основные особенности модель-

ного решения ГЗ для открытых волноводов в классе обобщённых функций на частотах, меньших первой критической частоты, приведены в работе [2].

Состав оборудования и место проведения эксперимента. Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены приёмные модули ПМ-1, ПМ-2, оснащённые комбинированными приёмниками (КП). Эксперимент проводился на акватории Уссурийского залива. В качестве источника звуковых сигналов использовались НИС «Юрий Молоков» и его дискретные составляющие вально-лопастного звукоряда (ВЛЗР), а также низкочастотный излучатель полигармонического сигнала в полосе частот 30–60 Гц. Горизонт буксировки излучателя составлял 10 м горизонты установки приёмных модулей ПМ-1, ПМ-2 составляют 16 и 24 м соответственно, глубина места $h = 43\text{--}44$ м. Дистанция между шумящим объектом (ШО) и приёмной системой изменялась от 10 миль в начальной точке трассы до 1 мили в конечной точке. Профиль вертикального распределения скорости звука соответствовал придонному звуковому каналу. Волнение моря за время проведения эксперимента было довольно заметным и составляло 3–4 балла, чему соответствовал повышенный уровень шумов моря. Схема проведения эксперимента поясняется рис. 1. В качестве рабочего использован обратный галс в интервале времени 13 ч 00 мин–15 ч 30 мин, в течение которого расстояние между НИС «Юрий

Молоков» и приёмными модулями РМ1, РМ2 изменялось от 10 миль до 1 мили.

■ Обработка сигналов и оценка потенциальной помехоустойчивости КП

Обработка сигналов предполагает спектральный анализ сигналов на основе БПФ в каналах комбинированного приёмника, вычисление полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля в скалярно-векторном описании, построение проходных характеристик и соответствующих сонограмм звукового поля в рабочем диапазоне частот в рабочем интервале времени. Для оценки потенциальной помехоустойчивости КП в блоке обработки сигналов (БОС) компаратора в составе вертикальной антенны была выполнена обработка всей скалярно-векторной информации, представленной набором 16 информативных параметров, как это описано в работе [1], по дискретным составляющим ВЛЗР НИС «Юрий Молоков». Сонограммы звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот 2.0–20 Гц для отношения сигнал–помеха (S/N) в канале звукового давления для приёмных модулей ПМ-1 и ПМ-2 поясняются рис. 2. Время усреднения 150 с. Можно отметить, что на больших расстояниях уровень дискретных составля-

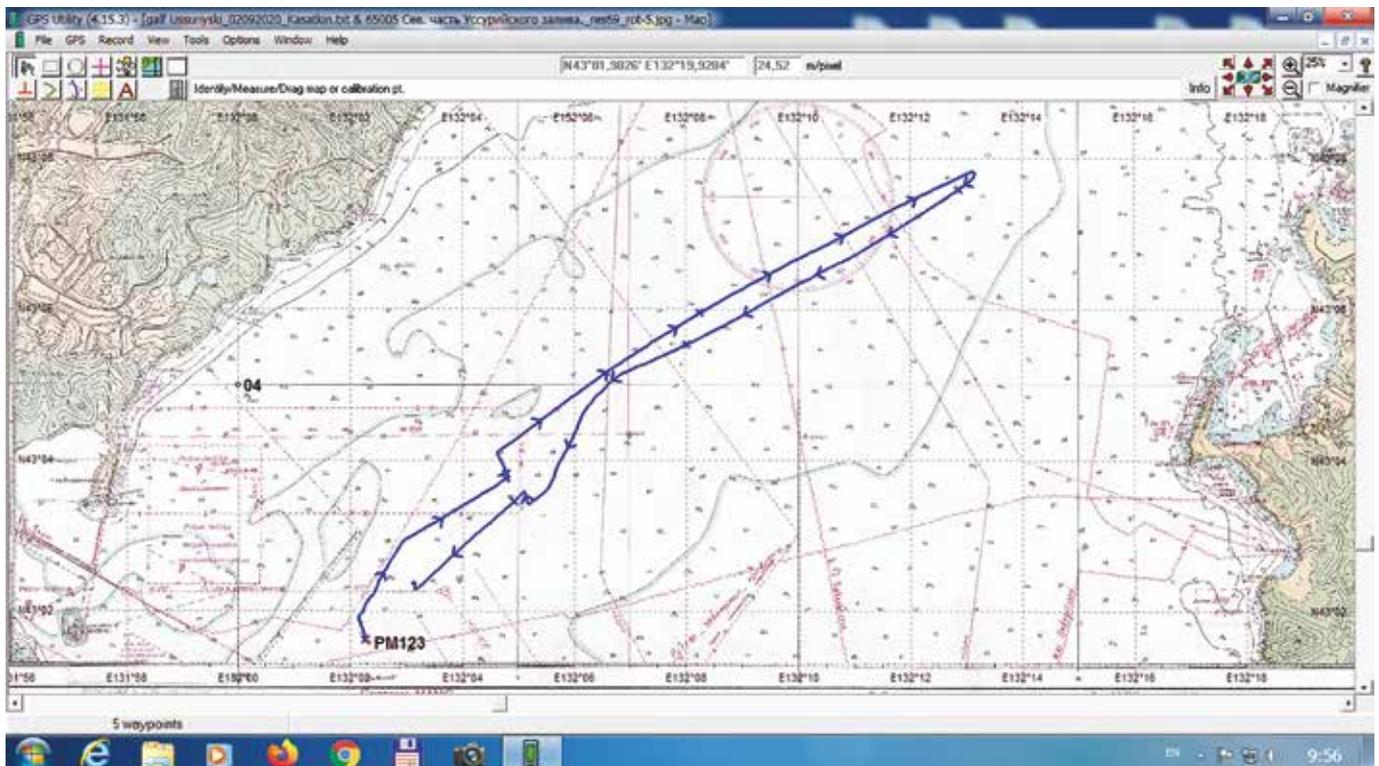


Рис. 1 Схема постановки приёмной системы и маневрирования НИС «Юрий Молоков»

ющих ВЛЗР, зарегистрированных ПМ-2, существенно выше уровня соответствующих дискретных составляющих, зарегистрированных ПМ-1. Поскольку все дискретные составляющие ВЛЗР ниже первой критической частоты модельного волновода Пекериса, сам факт существования волнового движения на столь больших расстояниях можно объяснить только в рамках обобщённого модельного решения ГЗ, соответствующего несамосопряжённой модельной постановке [2]. Сонограммы звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот 2.0–20 Гц для отношения сигнал–помеха (S/N) на выходе компаратора для приёмных модулей ПМ-1 и ПМ-2 поясняются рис. 3, а, б соответственно. Можно отметить, что обработка сигналов по полному набору информативных параметров позволила существенно повысить отношение (S/N) на выходе компаратора для слабых сигналов, зарегистрированных обоими приёмными модулями на большом расстоянии от источника.

Наконец, рис. 4 поясняет оценку помехоустойчивости КП в инфразвуковом диапазоне частот. Можно отметить, что потенциальная помехоустойчивость КП правильно оценивается (15–20 дБ) только при регистрации слабых по уровню сигналов, которые усиливаются приёмным трактом без амплитудных искажений. При регистрации сильных по уровню сигналов, которые усиливаются приёмным трактом с ограничением по амплитуде, оценки помехоустойчивости оказываются существенно заниженными (3–5 дБ).

Рисунки 5–7 поясняют структуру звукового поля в канале звукового давления и в векторных каналах для дискретных составляющих полигармонического сигнала. Можно отметить достаточно высокий уровень отношения S/N для x-компоненты вектора интенсивности и ортогональной к нему y-компоненты ротора вектора интенсивности. Для других компонент этих векторов уровень отношения S/N

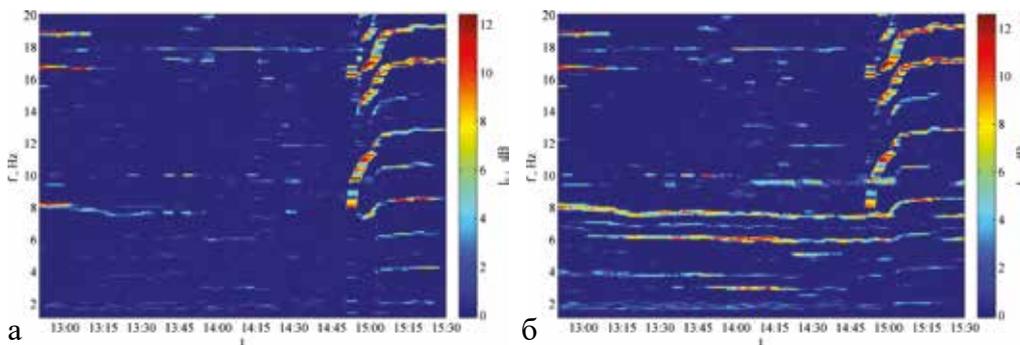


Рис. 2 Сонограммы звукового поля для отношения S/N в канале звукового давления для дискретных составляющих ВЛЗР: а – ПМ-1, б – ПМ-2

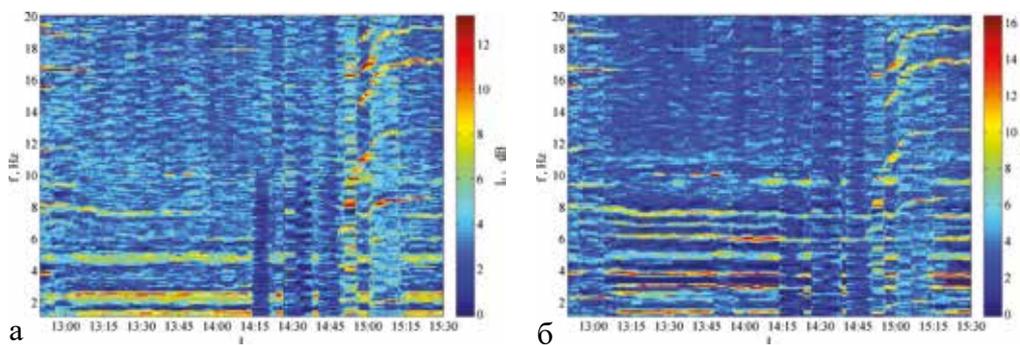


Рис. 3. Сонограммы звукового поля для отношения S/N на выходе компаратора: а – ПМ-1, б – ПМ-2

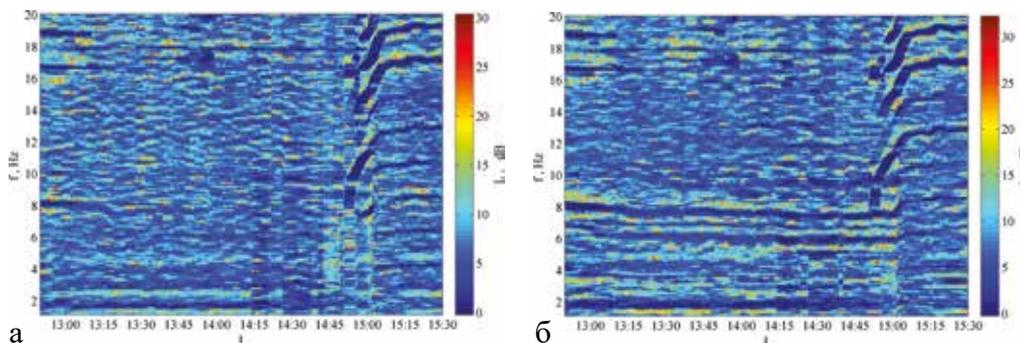


Рис. 4. Сонограммы для оценки потенциальной помехоустойчивости КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2

Рис. 5. Сонограммы звукового поля для отношения S/N в канале звукового давления для дискретных составляющих полигармонического сигнала: а – ПМ-1, б – ПМ-2.

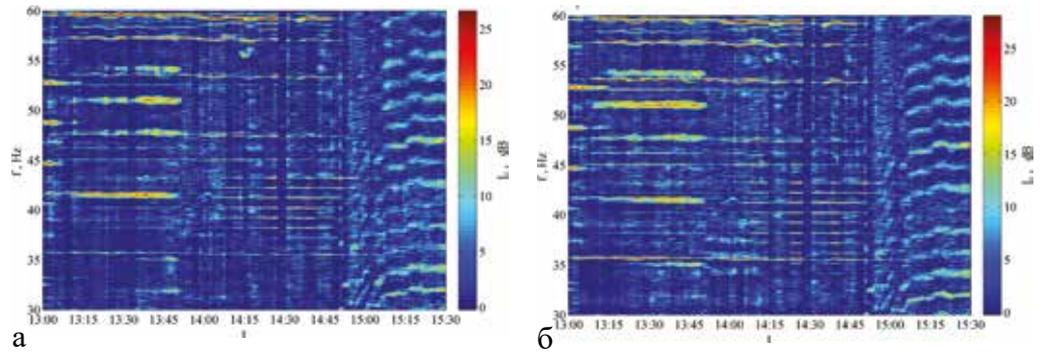


Рис. 6. Сонограммы звукового поля для отношения S/N: а – для x-компоненты вектора интенсивности, б – для y-компоненты ротора вектора интенсивности, ПМ-2

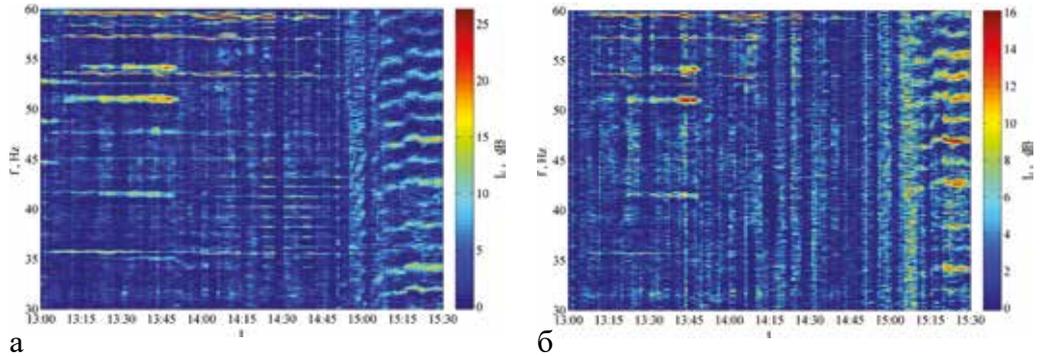
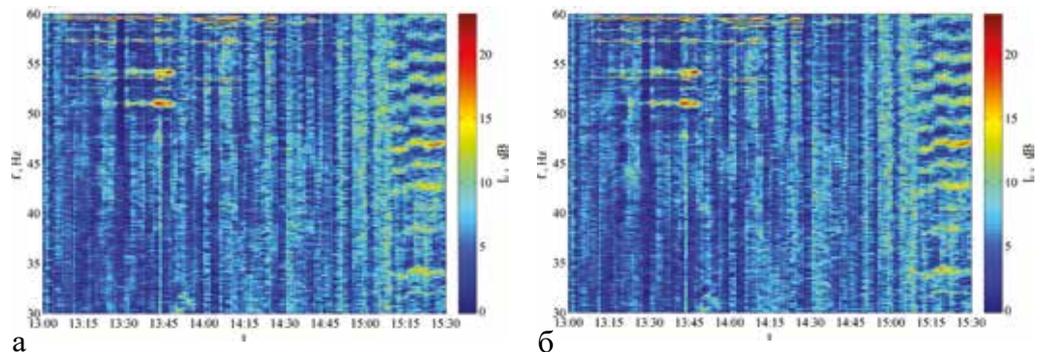


Рис. 7. Сонограммы звукового поля для отношения S/N для x-компонент: а – вещественной части, б – мнимой части вектора градиента давления, ПМ-2

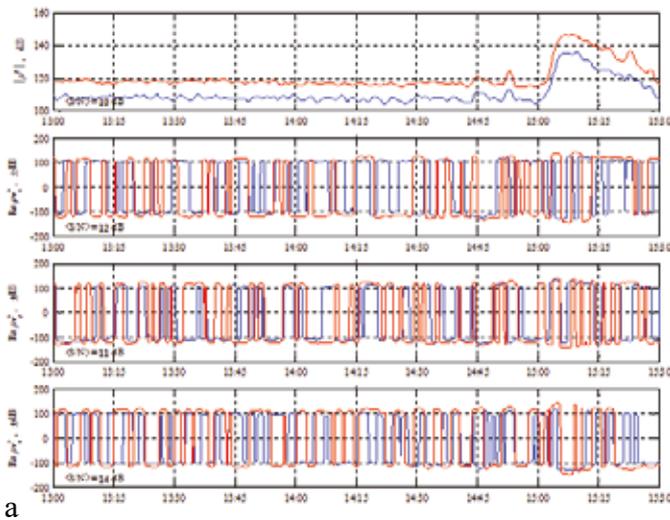


существенно ниже, что можно объяснить повышенным уровнем шумов моря. В поле вектора градиента давления также преобладают x-компоненты вектора, вещественная и мнимая, при повышенном уровне шумов моря, что поясняется рис. 7.

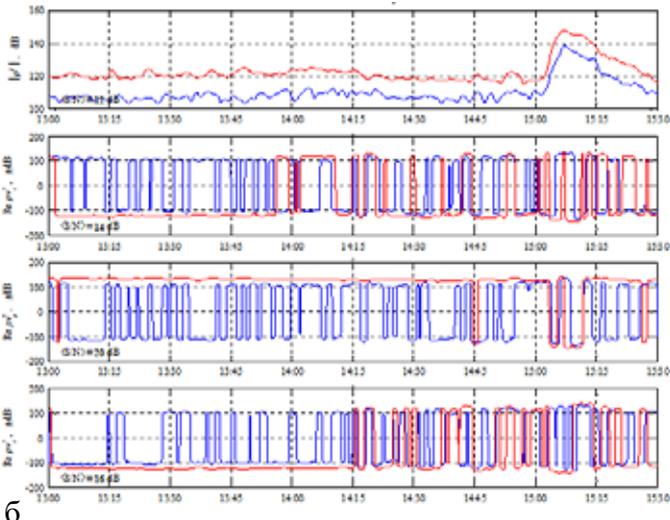
Для анализа вертикальной структуры звукового поля были построены проходные характеристики для отдельной дискретной составляющей ВЛЗР в полосе частот 2.0÷4.0 Гц в дальней зоне источника в диапазоне расстояний 10.0–5.0 миль. Проходные характеристики в каналах комбинированных приёмников поясняются рис. 8–9. Верхние строчки относятся к каналу звукового давления. Нижние строчки относятся к векторным каналам (x,y,z). Красный цвет относится к суммарному полю «сигнал плюс помеха» (S+N), синий цвет – к помехе (N), которая выделялась из суммарного процесса частотным окном Хэмминга, усредняющим дискретные со-

ставляющие суммарного волнового процесса. Логарифмические уровни векторных компонент, будучи положительно определёнными, отображаются в сторону положительных значений, если сама компонента является положительной, и в сторону отрицательных значений, если сама компонента является отрицательной. Цифрами на рисунках отмечены средние по трассе значения отношения S/N. Время усреднения 150 с. Можно отметить рост уровня сигнала во всех каналах КП с увеличением глубины постановки приёмного модуля со скоростью 9÷10 дБ на 8 м глубины. Это означает, что звуковое поле в этом диапазоне часто представлено регулярной волной Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно.

Полученные оценки коэффициента затухания (чисто мнимого вертикального волнового числа) позволяют оценить эффективную групповую скорость



а



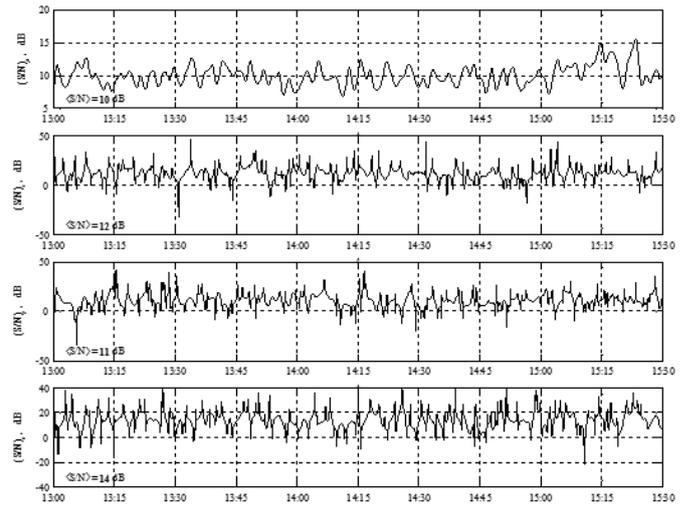
б

Рис. 8. Проходные характеристики в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2, частота 2÷4Гц

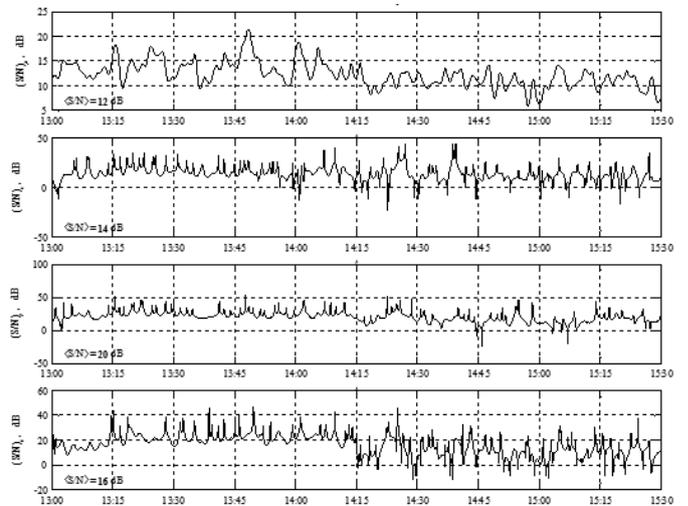
распространения неоднородных волн, формирующих звуковое поле, и их частотную зависимость по формуле

$$\left(\frac{c_{эфф}}{c_1}\right)^2 = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{k_1}\right)^2\right]^{-1} = \left[1 + \left(\frac{\alpha\lambda_1}{2\pi}\right)^2\right]^{-1}, \quad (1)$$

где $c_{эфф}$, c_1 – эффективная скорость неоднородной волны и скорость звука в водной среде соответственно, α – вертикальное волновое число, λ_1 – длина волны в водной среде на соответствующей частоте рассмотренного диапазона частот. Подставляя в формулу (1) измеренные значения коэффициента α , получаем оценки скорости распространения регулярной волны Шолте и её частотную зависимость: $c_{эфф} = 290$ м/с (частота 3.0 Гц), как это сделано в работе [1]. Можно отметить также наличие знакопеременной составляющей в векторных каналах КП. Эта особенность



а

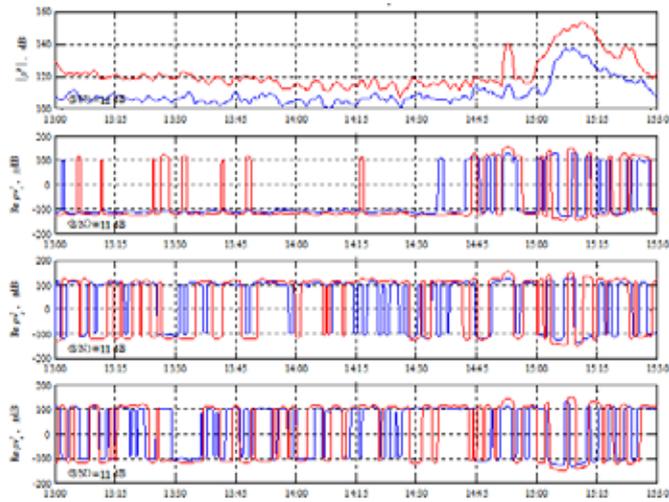


б

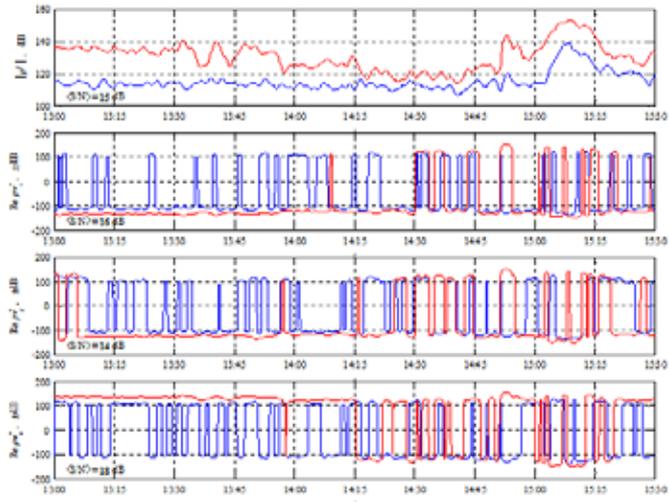
Рис. 9. Проходные характеристики для отношения S/N в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2

проходных характеристик связана с наличием в суммарном звуковом поле инфразвукового диапазона вытекающих (в полупространство) нормальных волн комплексного спектра. В свою очередь, вытекающие волны продолжают в волновод стоячими волнами (в несамосопряжённой модельной постановке), в которых возрастает роль вихревых структур (знакопеременных) в векторных каналах КП, впервые обнаруженных экспериментально в работе [3] и подтверждённых численным расчётом звукового поля в работе [2].

Аналогичный анализ пространственно-частотной структуры звукового поля был выполнен в полосе частот 7.5÷8.5 Гц. Результаты анализа поясняются рис. 10–11. Можно отметить рост уровня сигнала во всех каналах КП с увеличением глубины постановки приёмного модуля со скоростью 3÷4 дБ на 8 м глубины. Численная оценка групповой скорости в этом ди-



а

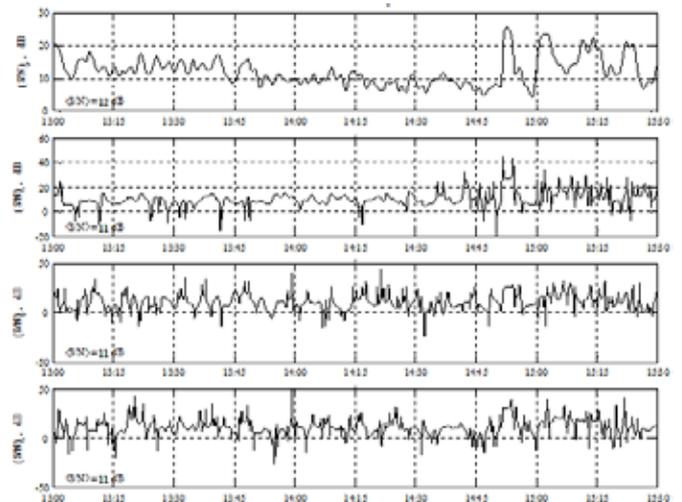


б

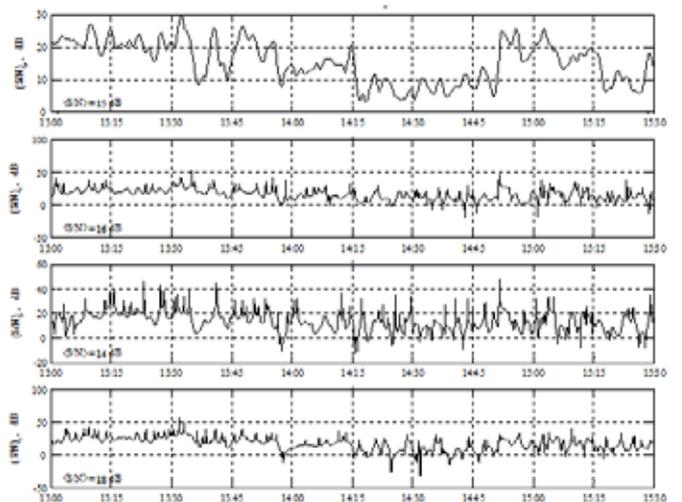
Рис. 10. Проходные характеристики в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2, частота 7.5÷8.5Гц

апазоне частот (1140 м/с) неплохо соответствует ранее полученным данным [1] в этом диапазоне частот. Однако она заметно превышает скорость поперечной волны по данным работы [4], а следовательно, и скорость регулярной волны Шолте в неконсолидированных осадках верхнего слоя морского дна. Можно ожидать, что с дальнейшим увеличением частоты и появлением первой пары нормальных волн высшего порядка, локализованных в придонном звуковом канале, локализация суммарного звукового поля вблизи дна сохранится, а групповая скорость будет расти.

Рисунки 12, 13. поясняют проходные характеристики для частоты 35 Гц полигармонического сигнала, излучаемого буксируемым излучателем. Можно отметить рост уровня сигнала во всех каналах КП с увеличением глубины постановки приёмного модуля со скоростью 5÷6 дБ на 8 м глубины. Эти оценки подтверждают предположение о том, что в звуковом



а



б

Рис. 11. Проходные характеристики для отношения S/N в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2.

поле в этом диапазоне частот появляется первая неоднородная (медленная) волна, локализованная на границе раздела вода – морское дно, которая возбуждается комплексным угловым спектром источника. Скорость распространения неоднородной волны даётся выражением

$$c_0 = c_1 \sqrt{\frac{1 - \rho_{12}^2}{1 - \rho_{12}^2 c_2^2}}, \quad (2)$$

где $\rho_{12} = \rho_1 / \rho_2$; $c_{12} = c_1 / c_2$; ρ_1, c_1, ρ_2, c_2 – плотность и скорость звука в верхнем и нижнем полупространствах соответственно. Для типичных значений плотности и скорости звука в неконсолидированных осадках, слагающих морское дно в заливе Петра Великого, приведённых в работе [4], скорость неоднородной волны в этом случае на (5÷8) % меньше скорости

звука в водной среде c_1 . Проходные характеристики, поясняемые рис. 12, 13, полностью подтверждают это предположение. Групповая скорость совместного волнового движения, вычисленная по формуле (1), увеличивается с ростом частоты до 1420 м/с.

Физическое объяснение эффекта увеличения групповой скорости дано в работе [1] и связано с возрастающей ролью неоднородной (медленной) волны первого порядка, локализованной на границе раздела вода – морское дно, скорость которой существенно больше скорости регулярной волны Рэля–Шолте, но меньше минимальной скорости звука в самом волноводе. Эта неоднородная волна впервые появилась в модельном решении граничной задачи Пекериса, предложенном в работе китайских акустиков [5]. Само модельное решение допускает корректное продолжение в полупространство только в рамках несамосопряжённой модельной постановки самой

граничной задачи Пекериса. В этой модельной постановке звуковое поле представлено собственными функциями двух сопряжённых операторов. Эти собственные функции суть расходящиеся волны и сходящиеся волны отдачи, которые трансформируются друг в друга на горизонтах трансформации. По этой причине соответствующие им нормальные волны в модельном описании становятся обобщёнными (гибридными) волнами [2].

Представляет интерес физическая трактовка существенного торможения скорости потока мощности в жидком слое донным полупространством, жидким или твёрдым. Эта трактовка должна исходить из принципиального различия групповой скорости как скорости переноса энергии в горизонтальном направлении и скорости звука в среде как скорости распространения волны вдоль направления нормали к волновому фронту.

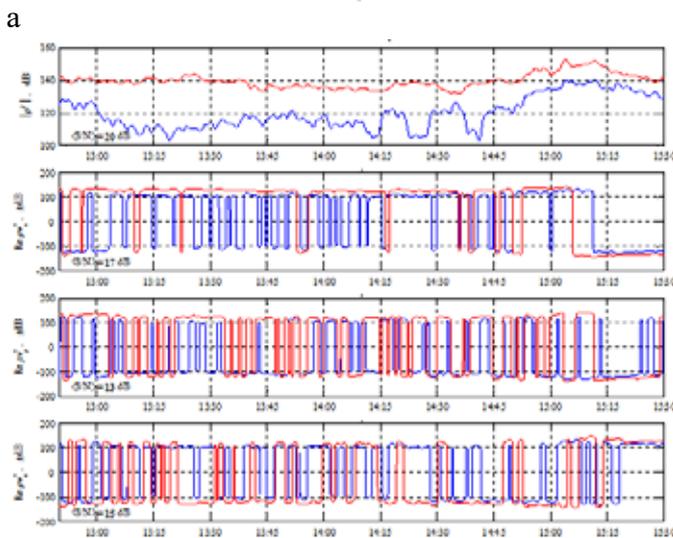
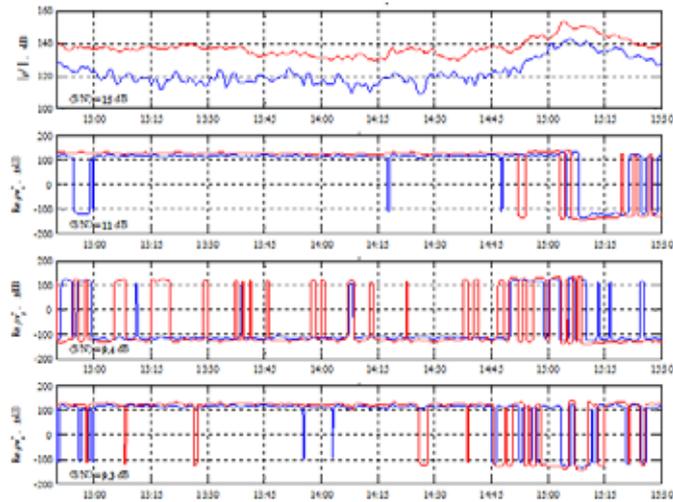


Рис. 12. Проходные характеристики в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2, частота 35Гц

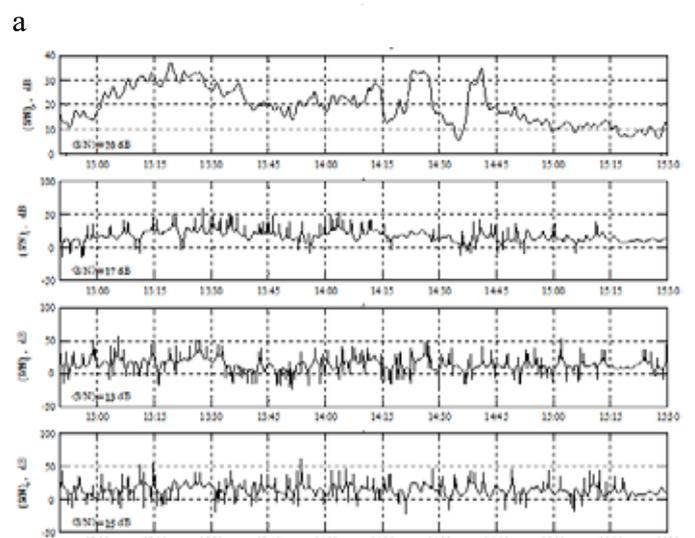
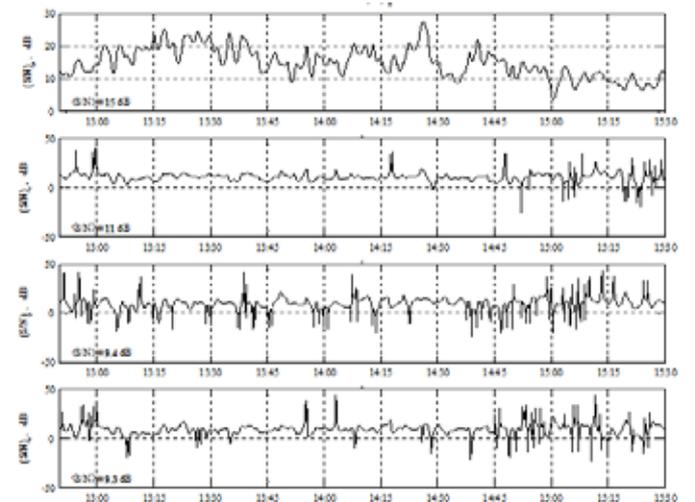
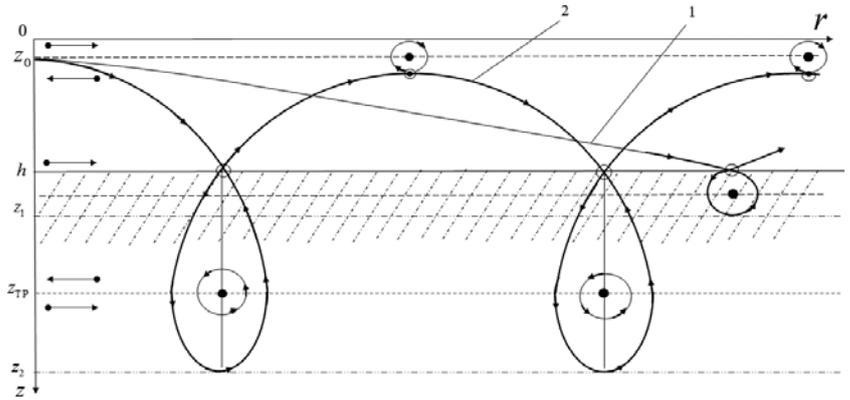


Рис. 13. Проходные характеристики для отношения S/N в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2

Рис. 14. Лучевая трактовка энергетической структуры поля обобщённых (гибридных) нормальных волн, 1 – предельный случай высоких частот, 2 – предельный случай низких частот, o-седловые точки, ●-узловые точки



Можно предположить, что в поле неоднородных волн, интерферирующих друг с другом, лучевая структура поля вектора интенсивности значительно усложняется формированием узловых и седловых точек (дислокаций фазового фронта в определении работы [6]). Сами лучевые траектории должны описывать локализацию звукового поля на горизонте источника и проникновение потоков мощности в донное полупространство, которое увеличивается с понижением рабочей частоты. Этим условиям удовлетворяет лучевая трактовка поля вектора интенсивности, которая поясняется рис. 14. Траектория 1 поясняет лучевую структуру потоков мощности в предельном случае высоких частот ($c_{эфф} \rightarrow c_0$). Для этой лучевой траектории горизонт z_1 играет роль горизонта затекания поля неоднородных волн в донное полупространство. Траектория 2 поясняет лучевую структуру потоков мощности в предельном случае низких частот ($c_{эфф} \rightarrow c_{ш}$). Для этой лучевой траектории горизонт z_2 играет роль горизонта затекания поля регулярной волны Шолте в донное полупространство. Штриховые горизонтальные линии соответствуют горизонтам трансформации $z_{тр}$, причём верхний горизонт трансформации соответствует горизонту источника z_0 . Согласно предложенной лучевой трактовке в энергетической структуре звукового поля неоднородных волн растёт роль вертикальных потоков мощности, которые становятся доминирующими в предельном случае низких частот.

Наконец, можно проанализировать пространственную структуру звукового поля в ближней зоне источника, которая поясняется рис. 15, 16 для дискретной составляющей ВЛЗР в полосе частот 3.5÷4.5 Гц в ближней зоне источника. Можно отметить, что в этом диапазоне малых расстояний и рабочих частот уровни сигналов на обоих приёмных модулях, разнесённых по глубине на 8 м, отличаются незначительно ($\pm(1-2)$ дБ). Этот экспериментальный факт вполне объясним соизмеримым вкладом обобщённой волны Шолте, локализованной на гори-

зонте источника, и регулярной волны Рэлея–Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно. Пример звукового поля, сформированного этой парой неоднородных волн Шолте, регулярной и обобщённой, приведён в работе [2]. Там же приведены примеры вихревых структур в поле горизонтальных

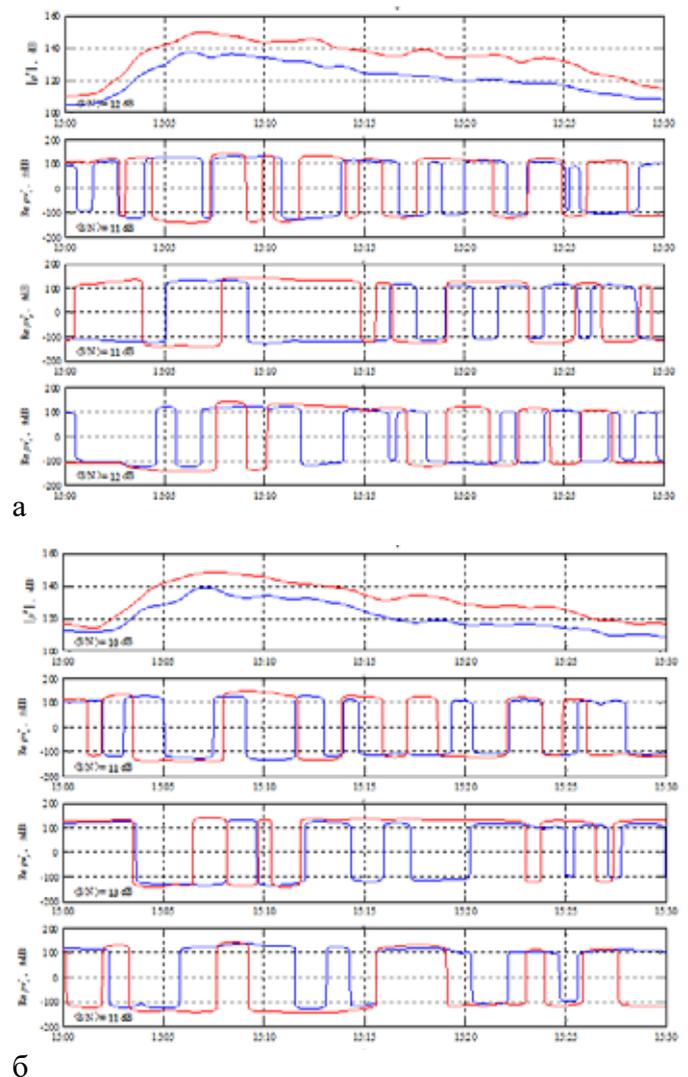
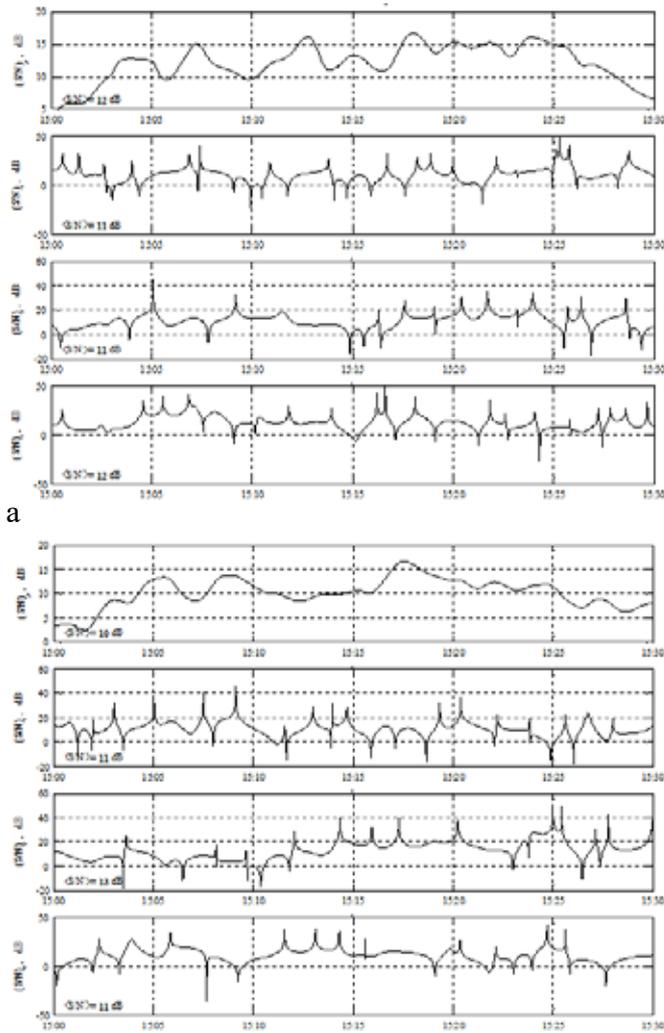


Рис. 15. Проходные характеристики в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2., частота 3.5÷4.5 Гц



а
б
Рис. 16. Проходные характеристики для отношения (S/N) в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2

потоков мощности, которые хорошо подтверждаются наличием вихревых (знакопеременных) структур в векторных каналах КП на рис. 15.

Заключение

Выполнено экспериментальное исследование пространственно-частотной структуры звуковых полей в мелком море в наиболее интересном инфразвуковом диапазоне частот в диапазоне расстояний 1÷18 км. Показаны преимущества обработки всей скалярно-векторной информации по полному набору информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звуковых полей. Полученные в настоящем эксперименте оценки потенциальной помехоустойчивости комбинированного приёмника хорошо подтверждают ранее полученные оценки (15÷25 дБ). Исследована с использованием пары комбинированных приёмников, разнесённых по вертикали на 8 м, вертикальная структура звукового поля на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса. Результаты эксперимента 2020 г. принципиально отличаются

от результатов, полученных ранее в эксперименте 2019 г. Эксперимент подтверждает решающую роль низкочастотной регулярной волны Рэлея–Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно, в формировании звукового поля на предельно низких частотах инфразвукового диапазона в дальней зоне источника. Однако и в этом эксперименте групповая скорость растёт с увеличением рабочей частоты при сохранении локализации звукового поля на границе раздела вода – морское дно. Этот экспериментальный результат допускает корректное объяснение только с привлечением первой неоднородной (медленной) волны волновода Пекериса, возбуждаемой комплексным угловым спектром источника. Эта составляющая появляется в описании звукового поля в самом волноводе в модельном решении [5], и для неё выполняется асимптотическое условие ($c_{эфф} \rightarrow c_0$). Однако корректное продолжение модельного решения из волновода в полупространство возможно только в более общей, несамосопряжённой модельной постановке самой граничной задачи, допускающей существование гибридных волн. Можно отметить, что, как и в эксперименте 2019 г., экспериментальная оценка вертикальной структуры звукового поля подтверждает существование обобщённых (гибридных) волн в звуковом поле инфразвукового диапазона. Полученные экспериментальные данные подтверждают, в свою очередь, целесообразность использования несамосопряжённой модельной постановки при решении граничных задач прикладной гидроакустики в инфразвуковом диапазоне частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин С.Б. Вертикальная структура звукового поля в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот в скалярно-векторном описании // Гидроакустика. 2020. № 44(4). С. 26–36.
2. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Косарев Г.В. Акустика мелкого моря в скалярно-векторном описании. Теория и эксперимент. Владивосток, 2019. 360 с.
3. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 837–843.
4. Свининников А.И. Петрофизика западной частот Тихого океана и окраинных морей востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2004. С. 226–235.
5. Gao Tain-Fu - Shang E.C. Effect of the branch-cut on the transformation between the modes and rays // J. Acoust. Soc. Amer. 1983. Vol. 73, N 5. P. 1551–1555.
6. Журавлёв В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Потоки энергии в окрестности дислокаций фазового фронта // ЖЭТФ. 1993. Т. 104, вып. 5(11). С. 3769–3783.

Об авторах

КАСАТКИН Сергей Борисович, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией
 Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
 Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Область научных интересов: гидроакустика, обработка сигналов, шумовые поля, гибридные приемные системы, неоднородные обобщенные волны
Тел.: +7(908)440-88-54
E-mail: kasatkas@marine.febras.ru
ORCID ID: 0000-0002-0945-8355

THE ESTIMATION OF THE SPATIAL FREQUENCY STRUCTURE OF THE SOUND FIELD IN THE SHALLOW SEA IN THE INFRASONIC FREQUENCY RANGE

S.B. Kasatkin

The paper analyzes experimental research results of the sound field registered by the combined vertically oriented two-element receiver. The sound field was created by discrete components of the shaft and blade sound noise sequence emitted by the research vessel "Yuri Molokov" in the infrasonic frequency band of 2-20 Hz, and low-frequency towed emitter of polyharmonic signal in the frequency band of 30-60 Hz. Sea depth and the operating band of 2-20 Hz together eliminate the possibility of discrete spectrum normal waves excitation in the Pekeris waveguide in this frequency band. Based on the spectral analysis of noise signal, potential noise sustainability was estimated when using the full set of informative parameters describing the sound field's energetic structure. The sound field vertical structure analysis results conclude that the sound field of an extremely low-frequencies of the infrasonic band is formed by Railegh-Scholte regular wave localized on the seawater-bottom interface. With frequency increasing, the role of the first inhomogeneous (slow) wave excited by a complex angular spectrum of the emitter becomes higher. In the near-field zone, the role of generalized Scholte wave localized on the source horizon increases, and a couple of Scholte waves, the first inhomogeneous wave and both regular and generalized, create the sound field.

Key words combined receiver, noise field, noise immunity, generalized non-uniform waves, hybrid waves.

Recommended citation:

Kasatkin S.B. THE ESTIMATION OF THE SPATIAL FREQUENCY STRUCTURE OF THE SOUND FIELD IN THE SHALLOW SEA IN THE INFRASONIC FREQUENCY RANGE . Underwater Investigation and Robotics. 2021. No. 1 (35). P. 70–79. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_07.

References

1. Kasatkin S. B. The vertical structure of the sound field in a shallow sea in the infrasonic frequency range in a scalar-vector description. *Hydroacoustics*, 2020, No. 44(4). P. 26–36.
2. Kasatkin B.A., Zlobin N.V., Kasatkin S.B., Zlobin D.V., Kosarev G.V. Acoustics of the shallow sea in scalar – vector description. Theory and experiment. Vladivostok. 2019. 360 p.
3. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Eddy properties of the acoustic intensity vector in a shallow sea. *Akust. zhurn.* 2011. Vol. #57, No. 6. P. 837–843.
4. Svininnikov A.I. Petrophysics of the western frequencies of the Pacific Ocean and the marginal seas of the east of Asia. Vladivostok: Dalnauka. 2004. P. 226–235.
5. Gao Tain-Fu - Shang E.C. Effect of the branch-cut on the transformation between the modes and rays. *J. Acoust. Soc. Amer.* 1983. Vol. 73. P. 1551–1555
6. Zhuravlev V.A., Kobozev I.K., Kravtsov Y.A. Energy fluxes in the vicinity of dislocations of the phase front. *GETF.*–1993. Vol. 104, issue. 5 (11). P. 3769–3783.

About the authors

KASATKIN Sergey Borisovich, candidate of physical and mathematical sciences, Head laboratory
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Adress: 5a Sukhanova st., Vladivostok, Russia
Research interests: hydroacoustics, signals processing, noise fields, hybrid receiving systems, inhomogeneous generalized waves
Phone: 89084408854
E-mail: kasatkas@marine.febras.ru
ORCID ID: 0000-0002-0945-8355

ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОПАГАТОРА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Д.В. Макаров, А.Д. Аллилуев

Рассмотрена задача о распространении звука в океане. Свойства любой волноводной трассы могут быть практически полностью описаны с помощью пропатора акустического поля. Пропатор представляет собой оператор, устанавливающий взаимно однозначную связь между вертикальными профилями акустического поля, соответствующими разным значениям горизонтальной координаты. Знание пропатора позволяет точно предсказать картину звукового поля для любого источника. При использовании некоторого ортогонального базиса пропатор может быть представлен в виде матрицы. В настоящей работе рассмотрен случай двухслойного волновода, когда верхний слой водный, а нижний – осадочный. Такая постановка задачи соответствует условиям мелкого моря. Представлен метод для измерения матричных элементов одночастотного пропатора в условиях натурального эксперимента. Метод основан на использовании двух вертикальных антенн, одной излучающей и одной принимающей, перекрывающих водный слой. Последовательно возбуждая сигналы каждым из монополей излучающей антенны, мы можем напрямую измерить матричные элементы пропатора. Математическую основу метода составляет аппарат функций дискретного представления переменных, устанавливающий связь между точечными значениями акустического поля и его непрерывным профилем. Показано, что в случае горизонтально-однородного волновода спектральный анализ измеренного пропатора позволяет найти нормальные моды волновода.

Ключевые слова: подводная акустика, обработка экспериментальных данных, дискретное представление переменных, вертикальная антенна, волновод, пропатор акустического поля.

Введение

Описание акустических полей в океане с помощью пропатора акустического поля является одним из наиболее новых подходов в акустике океана. Формально пропатор \hat{G} определяется выражением

$$\Psi(r'', z) = \hat{G}(r', r'')\Psi(r', z), \quad (1)$$

где $\Psi(r, z)$ – акустическое поле, z – глубина, r – горизонтальная координата. Согласно этому определению пропатор представляет собой некий универсальный оператор эволюции, описывающий трансформацию любого волнового пакета при прохождении волноводного сегмента между $r = r'$ и $r = r''$. Сам по себе пропатор не зависит от формы начального волнового пакета. При этом он включает в себя практически полную информацию об акустических свойствах трассы, включая свойства рассеяния и дисперсионные характеристики. Пропатор для реалистичных случайно-неоднородных моделей подводного звукового канала был впервые введен в работах [1–3]. В

работе [4] была рассмотрена модель пропатора для глубоководного звукового канала в Японском море. В работе [5] был рассмотрен случай многочастотного пропатора. В работе [6] получено выражение для матрицы пропатора в присутствии нелинейных внутренних волн. Влияние адиабатических неоднородностей океана на свойства пропатора было рассмотрено в работе [7].

Знание точного пропатора существенно упрощает решение прикладных задач, таких как акустическая томография [8, 9] и звукоподводная связь [10]. В связи с этим целесообразно уметь его находить экспериментально. В настоящей работе предлагается относительно простая схема для решения этой задачи. В ее основе лежит разложение акустического поля по так называемым функциям дискретного представления переменных [11], позволяющее представить пропатор в виде конечной матрицы.

Следующий раздел посвящен разложению акустического поля по функциям дискретного представления переменных. Предлагаемый метод измерения пропатора рассмотрен в разделе 2. В Заключении

мы подводим итоги работы и обсуждаем пути дальнейшего развития предложенного метода.

1. Функции дискретного представления переменных

Рассмотрим двухслойный акустический волновод в мелком море, с водным слоем сверху и осадочным снизу. На поверхности воды выполняется граничное условие Дирихле:

$$\Psi|_{z=0} = 0. \quad (2)$$

Снизу осадочный слой граничит со слоем твердых пород, поэтому на нижней границе мы имеем граничное условие Неймана:

$$\frac{d\Psi}{dz}\Big|_{z=L} = 0. \quad (3)$$

Условие на границе раздела между водным и осадочным слоями выглядит следующим образом:

$$\Psi|_{z=h-0} = \Psi|_{z=h+0}, \quad \frac{1}{\rho_{\text{wat}}} \frac{d\Psi}{dz}\Big|_{z=h-0} = \frac{1}{\rho_{\text{sed}}} \frac{d\Psi}{dz}\Big|_{z=h+0}.$$

Как было показано в работе [11], акустическое поле в волноводе может быть представлено в виде разложения

$$\Psi(z) = \sqrt{\Delta z} \sum_{j=1}^{J_{\text{max}}} \chi_j(z), \quad (4)$$

где каждая из функций $\chi_j(z)$ сосредоточена в окрестности значения глубины

$$z_j = j\Delta z, \quad (5)$$

$$\Delta z = \frac{L}{J_{\text{max}} + 1}. \quad (6)$$

Выражение (4) представляет собой формулу Уитакера–Шэннона, модифицированную с учетом граничных условий (2) и (3). Функции $\chi_j(z)$ называются функциями дискретного представления переменных (ДПП). Они определяются следующим образом:

$$\chi_j(z) = \sum_{i=1}^{J_{\text{max}}} V_{ij} \phi_i(z), \quad (7)$$

где $\phi_j(z)$ – функции вспомогательного базиса в виде пространственных гармоник,

$$\phi_j = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{(2j-1)\pi z}{2L}, \quad j = 1, 2, \dots \quad (8)$$

Коэффициенты ряда (7) выражаются как

$$V_{ij} = \sqrt{\frac{2}{J_{\text{max}} + 1}} \sin \left[\frac{(i-1/2)j\pi}{J_{\text{max}} + 1} \right]. \quad (9)$$

В выражения (4), (6), (7) и (9) входит величина J_{max} . Она должна удовлетворять условию

$$\int_{z=0}^L \Psi^*(z)\Psi(z)dz = \sum_{j=1}^{J_{\text{max}}} |a_j|^2, \quad (10)$$

где

$$a_j = \int_{z=0}^L \phi_j(z)\Psi(z)dz. \quad (11)$$

Другими словами, величина J_{max} имеет смысл числа гармоник (8), которое требуется для точного воссоздания акустического поля,

$$\Psi(z) = \sum_{j=1}^{J_{\text{max}}} a_j \phi_j(z). \quad (12)$$

Очевидно, что это число зависит от частоты звука, а также иных факторов, которые влияют на спектр вертикальных волновых чисел акустического поля. При выполнении условия (10) функции ДПП (7) образуют ортогональный базис,

$$\int_{z=0}^L \chi_i(z)\chi_j(z)dz = \delta_{ij},$$

где δ_{ij} – символ Кронекера. Формула (4) может быть использована для реконструкции акустического поля по данным измерений с помощью вертикальной приемной антенны в виде цепочки гидрофонов, расположенных на глубинах (5) [11]. В силу принципа взаимности эта формула может также использоваться и для расчета амплитудно-фазового распределения вертикальной излучающей антенны, создающей поле $\Psi(z)$. В последнем случае формула (5) определяет положение монополей.

Нужно подчеркнуть важное обстоятельство: использование формулы (4) как для реконструкции поля по точечным измерениям, так и для возбуждения поля с помощью цепочки монополей, требует выполнения условия (10). С другой стороны, мы знаем, что поле, создаваемое акустическим монополем, описывается дельта-функцией, которая характеризуется бесконечным числом членов разложения (12). Однако в действительности члены с большими номерами очень быстро затухают вследствие поглощения звука в дне. Таким образом, они являются несущественными с точки зрения распространения звука. Это означает, что мы можем подвергнуть дельта-функцию Фурье-фильтрации, при которой отбрасываются гармоники (8) с номерами $j > J_{\text{max}}$. Эта процедура и дает выражение (7) для функций ДПП. Оптимальное значение J_{max} и связанное с ним расстояние между элементами Δz должны определяться свойствами затухания в осадочном слое.

2. Измерение и анализ свойств пропагатора

Положим, что критерий (10) выполняется при некотором конечном значении J_{\max} . Как мы отметили выше, в этом случае функции ДПП образуют ортогональный базис, который можно использовать для матричного представления пропагатора, определяемого формулой (1). Матричные элементы вычисляются по формуле:

$$G_{mn}(r', r'') = \int_{z=0}^L \chi_m(z) \hat{G}(r', r'') \chi_n(z) dz,$$

где $\hat{G}(r', r'') \chi_n(z)$ – профиль акустического поля при $r = r''$, если при $r = r' < r''$ оно описывалось функцией ДПП $\chi_n(z)$. Как было отмечено выше, начальное условие в виде n -й функции ДПП эквивалентно полю, создаваемому монополю на глубине z_n , после фильтрации быстро затухающих пространственных Фурье-гармоник с $j > J_{\max}$. Таким образом, матрица пропагатора может быть измерена путем последовательного возбуждения точечных источников, расположенных на глубинах (5). Такие источники могут быть собраны в одну вертикальную излучающую антенну. Возбуждаемые поля измеряются с помощью приемной антенны, сенсоры которой также расположены на глубинах, описываемых (5).

Измерив пропагатор, мы можем найти его собственные функции и собственные значения. Соответствующая спектральная задача формулируется следующим образом:

$$\hat{G}(r', r'') \Phi_m(z) = e^{-i\kappa_m(r''-r')} \Phi_m(z).$$

В горизонтально-однородном волноводе собственные функции $\Phi_m(z)$ совпадают с нормальными модами волновода. Тогда вещественная часть κ_m представляет собой горизонтальное волновое число моды. Мнимая часть описывает затухание звука как за счет поглощения в дне, так и за счет цилиндрической расходимости в горизонтальной плоскости.

Собственные функции вычисляются с помощью собственных векторов матрицы пропагатора:

$$\Phi_n(z) = \sum_{m=1}^{J_{\max}} v_{mn} \chi_m(z), \quad (13)$$

где v_{mn} – m -й элемент n -го собственного вектора матрицы пропагатора. Эта формула позволяет точно рассчитать собственные функции пропагатора, если излучающая и приемная антенна переключаются полностью, т. е. включая оса-

дочный слой. Очевидно, что это крайне сложно реализовать на практике. Поэтому имеет смысл рассмотреть случай, когда нам доступен только водный слой, в котором расположено J элементов излучающей и приемной антенн, $J < J_{\max}$, при этом расстояние между элементами описывается формулой (6). Тогда мы можем измерить только «обрезанную» матрицу пропагатора размерности $J \times J$. Соответственно выражение (13) принимает вид:

$$\Phi_n(z) = \sum_{m=1}^J v_{mn} \chi_m(z). \quad (14)$$

Эта формула позволяет достаточно точно вычислить только те собственные функции пропагатора, которые распространяются преимущественно в водной толще. В случае горизонтально-однородного волновода такие собственные функции являются хорошим приближением для нормальных мод.

Ограничение области излучения и измерения водным слоем может сыграть и позитивную роль. В соответствии с (6) расстояние между соседними элементами антенн Δz может принимать только дискретное множество значений. Однако, ограничивая область интереса водным слоем, мы можем использовать в (6) и (8) не «настоящую» глубину нижней границы (которая чаще всего неизвестна), а некоторую смещенную величину, близкую к L . Возможность «подвинуть» нижнюю границу позволяет рассматривать непрерывное множество значений Δz , что существенно упрощает постановку эксперимента.

Заключение

Основным результатом данной работы является разработка схемы для экспериментального определения пропагатора акустического поля. Эта схема сформулирована для тональных звуковых полей, однако ее обобщение на многочастотные поля, создаваемые импульсными источниками, представляется вполне реализуемым. В случае горизонтально-однородного волновода вычисление матрицы пропагатора позволяет найти профили нормальных мод с помощью формулы (14).

В дальнейших работах следует рассмотреть вопросы, связанные с погрешностью измерений и влиянием шумов. Очень важно учесть в рамках предлагаемого подхода трехмерные эффекты, связанные с горизонтальной рефракцией и отражениями от наклонного дна. Кроме того, представляет интерес использование пропагатора для томографической

инверсии среды, зондирования верхних слоев дна. Вероятно, следует рассмотреть вопрос о создании стационарных систем наблюдения над акваториями, основанных на отслеживании изменений пропагатора в реальном времени.

Работа выполнена по госбюджетной тематике ТОИ ДВО РАН «Моделирование разномасштабных динамических процессов в океане» (№ 0211-2021-0009).

ЛИТЕРАТУРА

1. Makarov D.V., Kon'kov L.E., Uleysky M.Yu. Level spacing statistics in a randomly-inhomogeneous acoustic waveguide // e-print arXiv 1008.3037 [nlin.CD] (2010).
2. Hegewisch K.C., Tomsovic S. Random matrix theory for underwater sound propagation // *Europhys. Lett.* 2012. Vol. 97, No 3. 34002.
3. Вировлянский А.Л., Макаров Д.В., Пранц С.В. Лучевой и волновой хаос в подводных акустических волноводах // *Успехи физических наук.* 2012. Т. 182, № 1. С. 19–48.
4. Makarov D.V., Kon'kov L.E., Uleysky M.Yu., Petrov P.S. Wave chaos in a randomly inhomogeneous waveguide: spectral analysis of the finite-range evolution operator // *Phys. Rev. E.* 2013. Vol. 87, No 1. 012911.
5. Hegewisch K.C., Tomsovic S. Constructing acoustic timefronts using random matrix theory // *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. Vol. 134, No 4. P. 3174–3184.
6. Yang T.C. Acoustic mode coupling induced by nonlinear internal waves: evaluation of the mode coupling matrices and applications // *J. Acoust. Soc. Am.* 2014. Vol. 135, No 2. P. 610–625.
7. Makarov D.V. Random matrix theory for an adiabatically-varying oceanic acoustic waveguide // *Wave Motion.* 2019. Vol. 90. P. 205–217.
8. Макаров Д.В., Коньков Л.Е., Петров П.С. Влияние океанических синоптических вихрей на длительность модовых акустических импульсов // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2016. Т. 59, № 7. С. 638–654.
9. Красулин О.С., Шуруп А.С. Численное решение трехмерной задачи адиабатической модовой томографии океана на основе функционально-аналитического алгоритма // *Изв. РАН. Серия физическая.* 2020. Т. 84, № 2. С. 289–294.
10. Волков М.В., Григорьев В.А., Жилин И.В., Луньков А.А., Петников В.Г., Шатравин А.В. Мелководный акустический волновод арктического типа как канал для передачи информации при звукоподводной связи // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64, № 6. С. 676–681.
11. Макаров Д.В. Алгоритм реконструкции акустического поля по данным точечных измерений // *Подводные исследования и робототехника.* 2018. Т. 26, № 2. С. 62–67.

Об авторах

МАКАРОВ Денис Владимирович, д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: акустика океана, теория нелинейных колебаний и волн, квантовая оптика, статистическая радиофизика, теория хаоса.
E-mail: makarov@poi.dvo.ru
Телефон: +7(950)283-92-93
ORCID ID: 0000-0002-2568-8927

АЛЛИЛУЕВ Алексей Дмитриевич, аспирант
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: акустика океана, теория нелинейных колебаний и волн, квантовая оптика, теория хаоса.
E-mail: jaazver@gmail.com
Телефон: +7(929)428-79-90



ON EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ACOUSTIC WAVEFIELD PROPAGATOR

D.V. Makarov, A.D. Alliluev

The problem of sound propagation in the ocean is considered. Properties of any waveguide can be almost completely described using an acoustic wavefield propagator. The propagator is an operator that determines one-to-one relation between acoustic wavefield vertical profiles corresponding to different values of the horizontal coordinate. Knowing the propagator allows one to accurately predict a sound wavefield for any source. Using some orthogonal basis, the propagator can be represented as a matrix. This paper considers the case of a two-layer waveguide, when the upper layer is water and the lower one is sediment. This formulation of the problem corresponds to the conditions of a shallow sea. A method for measuring the matrix elements of a single-frequency propagator in an experiment is presented. This method is based on the usage of two vertical arrays, one emitting and one receiving, spanning the water layer. Sequentially exciting the signals with each of the monopoles of the emitting array, one can directly measure the matrix elements of the propagator. The mathematical basis of the method is the apparatus of the discrete variable representation functions, which provides the link between the point values of an acoustic wavefield and its continuous profile. It is shown that in the case of a horizontally homogeneous waveguide, spectral analysis of the measured propagator allows one to find the normal modes of the waveguide.

Keywords: underwater acoustics, processing of experimental data, discrete variable representation, vertical array, waveguide, acoustic wavefield propagator.

References

1. Makarov D.V., Konkov L.E., Uleysky M.Yu. Level spacing statistics in a randomly-inhomogeneous acoustic waveguide. e-print arXiv 1008.3037 [nlin.CD] (2010).
2. Hegewisch K.C., Tomsovic S. Random matrix theory for underwater sound propagation. *Europhys. Lett.* 2012. Vol. 97, No 3. 34002.
3. Virovlyansky A.L., Makarov D.V., Prants S.V. Ray and wave chaos in underwater acoustic waveguides. *Physics-Uspexhi.* 2012. Vol. 55, No 1. P. 18–46.
4. Makarov D.V., Konkov L.E., Uleysky M.Yu., Petrov P.S. Wave chaos in a randomly inhomogeneous waveguide: spectral analysis of the finite-range evolution operator. *Phys. Rev. E.* 2013. Vol. 87, No 1. 012911.
5. Hegewisch K.C., Tomsovic S. Constructing acoustic timefronts using random matrix theory. *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. Vol. 134, No 4. P. 3174–3184.
6. Yang T.C. Acoustic mode coupling induced by nonlinear internal waves: evaluation of the mode coupling matrices and applications. *J. Acoust. Soc. Am.* 2014. Vol. 135, No 2. P. 610–625.
7. Makarov D.V. Random matrix theory for an adiabatically-varying oceanic acoustic waveguide. *Wave Motion.* 2019. Vol. 90. P. 205–217.
8. Makarov D.V., Konkov L.E., Petrov P.S. Influence of acoustic synoptic eddies on the duration of modal acoustic pulses. *Radiophys. Quantum Electron.* 2016. Vol. 59, No 7. P. 576–591.
9. Krasulin O.S., Shurup A.S. Numerical solution of the three-dimensional problem of adiabatic modal tomography based on the functional-analytical algorithm. *Izvestia RAN. Ser. Fiz.* 2020. Vol. 84, No 2. P. 289–294.
10. Volkov M.V., Grigorev V.A., Zhilin I.V., Lunkov A.A., Petnikov V.G., Shatravin A.V. An arctic-type shallow-water acoustic waveguide as an information transmission channel for underwater communications. *Acoust. Phys.* 2018. Vol. 64. P. 692–697.
11. Makarov D.V. Algorithm for reconstruction of an acoustic wavefield using pointwise measurements. *Podv. Issl. Robotekh.* 2018. Vol. 26, No 2. P. 62–67.
12. Makarov D.V., Petrov P.S. Full reconstruction of acoustic wavefields by means of pointwise measurements (in press).

About the authors

MAKAROV Denis Vladimirovich, Dr. Sc., leading research associate
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: ocean acoustics, theory of nonlinear oscillations and waves, quantum optics, statistical radiophysics, chaos theory.
E-mail: makarov@poi.dvo.ru
Phone: +7(950)283-92-93
ORCID ID: 0000-0002-2568-8927

ALLILUEV Alexey Dmitrievich, PhD student
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: ocean acoustics, theory of nonlinear oscillations and waves, quantum optics, chaos theory.
E-mail: jaazver@gmail.com
Phone: +7(929)428-79-90

НОВОСТИ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ



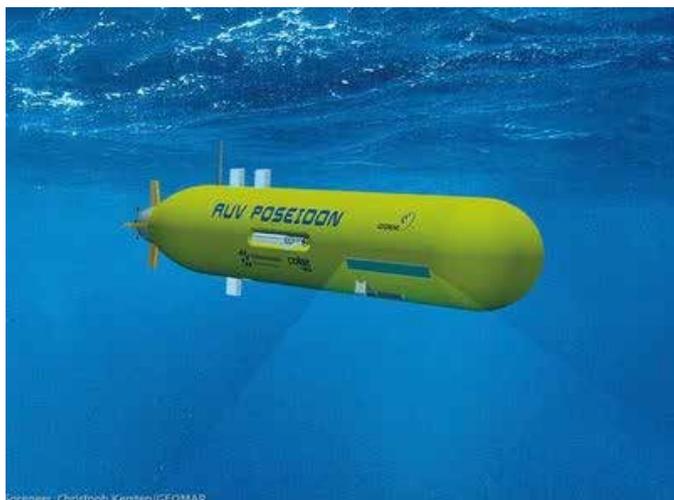
Kongsberg Maritime анонсировала новый АНПА HUGIN Endurance, который намного больше (6 т, 1,2 x 10 м), вдвое быстрее (до 8 уз) всех своих предыдущих моделей и будет способен работать от берега до 15 суток с выбегом до 2200 км. Стабилизацию на низких (~ 1 уз) скоростях обеспечивают убирающиеся кили по бокам со встроенными двигателями, кормовое оперение заменено на Х-образное, движение дают винты противоположного вращения. На складывающейся мачте располагаются камеры, антенны AIS, GNSS и системы широкополосной радиосвязи MBR. HUGIN первого поколения, в 1998 г. мог выполнить максимум 6-часовую миссию и отснять 4,2 кв. км. HUGIN Endurance теперь имеет потенциал обследования до 1100 кв. км за одну миссию.

<https://www.youtube.com/watch?v=zyoEYhZcaQ0&t=1280s>



Два глайдера типа Slocum запущены с НИС James Cook и в течении 4-х месяцев будут собирать данные о свойствах водной среды поблизости от айсберга А68а, который дрейфует к берегам острова South Georgia. Делается это для изучения возможности негативного влияния айсберга на экосистему острова. Первый раз глайдер в Антарктике применили в 2007 г., в рамках программы Palmer Long-Term Ecological Research, а первая антарктическая миссия АНПА началась ровно 20 лет назад, в феврале 2001 г. Autosub-2 тогда измерял плотность скоплений криля.

<https://www.noc.ac.uk/news/first-look-images-robotic-gliders-launched-today-part-expedition-investigate-huge-south>



40 лет прослужив науке, НИС POSEIDON продан, а на вырученные 1,2 млн. евро в Центре морских исследований Гельмгольца GEOMAR начали разработку АНПА с этим же именем. GEOMAR в 2008 г. получил и успешно эксплуатирует АНПА Abyss (REMUS 6000), приёмочные испытания которого, кстати, обеспечивал POSEIDON (POS376), а теперь GEOMAR совместно с Kiel University of Applied Sciences сделает свой шеститысячник.

https://www.geomar.de/fileadmin/content/service/presse/Pressemitteilungen/2021/pm11_AUV-POSEIDON/pm_2021_11_auv-poseidon.pdf



Итальянская компания Saipem приводит испытания АНПА FlatFish (Hydrone-S). В рамках программы Hydrone, которая началась в 2015 г., разрабатываются три типа резидентных НПА Hydrone-R, Hydrone-W и Hydrone-S. Хотя Hydrone-W пока ещё на ранних стадиях разработки, испытания Hydrone-R идут с лета 2019 г. и с норвежской корпорацией Equinor уже есть договоренность об использовании аппаратов Hydrone на месторождении Njord-A.

<https://www.saipem.com/en/projects/hydrone-njord-field-development>

Обзор подготовил Д.Г.Ляхов

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал «Подводные исследования и робототехника» публикует научно-технические статьи, проблемные, обзорные, дискуссионные материалы по всем направлениям, относящимся к методам и техническим средствам исследования и освоения океана, включая подводные робототехнические комплексы, их системы, технологии и применения, методы и средства мониторинга подводной среды и морского дна, экологию, морские экспедиции, подводные поисковые работы, глубоководные испытания и технические эксперименты. Все материалы в журнал направляются по адресу:

690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а, ИПМТ ДВО РАН,
редакция журнала, тел. (423) 2-432-674, факс (423) 2-432-416,
e-mail: kiselev@marine.febras.ru; imtp@marine.febras.ru

При подготовке материалов, направляемых в журнал, необходимо руководствоваться следующими правилами.

ТЕКСТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СТАТЬИ

Рукописи представляются в электронном виде с доставкой электронной почтой или на физическом носителе. К рукописи прилагаются экспертное/экспортное заключение о возможности опубликования в открытой печати и полные контактные данные авторов (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, телефон, адрес электронной почты). В рукописи должны быть следующие сведения: УДК, название статьи, авторы, организация, реферат, ключевые слова (все, кроме УДК, на двух языках). Текст выполняется в редакторе Microsoft Word шрифтом Times New Roman 12 кегля с одинарным межстрочным интервалом. Весь графический, иллюстративный материал (рисунки, фотографии и др.) представляется отдельными файлами с использованием стандартных графических форматов в цветном или черно-белом виде. Все иллюстрации должны сопровождаться соответствующими подписями и обозначениями, поясняющими их суть, детали и привязку к тексту статьи. Для формул могут быть использованы два формата: Microsoft Equation, формулы со сложными символьными выражениями – в редакторе MathType. С учетом особенностей журнального формата следует избегать чрезмерно длинных математических выражений и громоздких схем, графиков, таблиц и других аналогичных иллюстраций. Цитируемая литература приводится в порядке ссылки на нее в тексте и оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Объем рукописи не должен превышать, как правило, 15 стр. текста. В отдельных случаях редакция допускает увеличение объема до 20 стр. Редакция рекомендует сопровождать текст заголовками и подзаголовками, отражающими отдельные положения статьи.

Плата за опубликование статей не взимается.

Подробную информацию по оформлению рукописей смотрите на сайте журнала «Подводные исследования и робототехника»: <http://jmtp.febras.ru>

