

Сытенский Василий Дмитриевич – Институт радиотехнических систем и управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»; e-mail: vdsytenkiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; доцент.

Маркович Игорь Ильич – Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»; e-mail: marko@sfedu.ru, г. Таганрог, Россия; тел.: 88634394055; директор-главный конструктор; к.т.н.; с.н.с.

Завтур Евгений Евгеньевич – e-mail: zavtur90@mail.ru; тел.: 88634393075; начальник сектора.

Syten'kiy Vasilij Dmirtievich – Institute of Radio Engineering Systems and Management of the Federal State-Owned Educational of Higher Education «Southern Federal University»; e-mail: vdsytenkiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone.: +78634371632; the department of theoretical foundations of radio engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Markovich Igor Il'ich – SFEDU Research and Design Bureau of Digital Signal Processing – Federal State-Owned Educational of Higher Education «Southern Federal University»; e-mail: marko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634394055; cand. of eng. sc.; senior fellow; director – chief designer.

Zavtur Evgeny Evgenevich – e-mail: zavtur90@mail.ru; phone: +78634393075; head of section.

УДК 681.518.3

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-81-93

В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец, А.В. Зуев, А.С. Губанков, Д.Д. Минаев

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ*

Предложена архитектура цифровой платформы для реализации распределенных систем управления и навигации подводных робототехнических комплексов (ПРК), выполняющих технологические операции в условиях неопределенности окружающей среды. Предлагаемая цифровая платформа предназначена для автоматизации следующих видов деятельности: мониторинг состояния объектов подводной инфраструктуры (линии связи, трубопроводы, добычное оборудование и т.д.), картографические и геодезические работы, определение параметров и границ физических полей, зон распространения химических соединений (зон загрязнений) и биоресурсов, охрана объектов подводной и надводной инфраструктуры (подводные фермы марикультур, границы водных заповедников и т.п.), сопровождение движущихся объектов, поиск объектов заданного типа (биологических, техногенных и др.), выполнение подводных технологических операций (сварка, резка, очистка и т.п.). Для этой платформы разработана система команд, обеспечивающая гибкое задание миссий ПРК различного типа и назначения. Выделены пять типов сообщений цифровой платформы: команды управления порядком выполнения миссии, команды управления загрузкой миссии, информационные сообщения, команды миссии и группового управления. Предложена концепция создания распределенных систем управления ПРК, обеспечивающая совместимость существующих бортовых систем ПРК с предлагаемым решением на основе компактных гидроакустических систем глобальной гидроакустической навигации, разработанных в ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток). Указанные системы управления состоят из двух основных частей. Первая часть представляет собой исходную бортовую информационно-управляющую систему ПРК, обеспечивающую его движение в заданную точку пространства с заданной скоростью, получение данных от бортовых датчиков, а также управление работой бортового оборудования. Вторая часть – система управления верхнего уровня, обеспечивает возможность взаимодейст-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 20-38-70161, 19-08-00347.

вия ПРК через акустический канал связи с глобальной гидроакустической навигационной системой и автоматизированным рабочим местом оператора. Исследования передачи данных в симуляторе (CoppeliaSim) между оператором и ПРК в рамках предложенной цифровой платформы показали, что обеспечивается надежная загрузка миссий и получение информации о состоянии ПРК при различных скоростях и в различных условиях работы акустического канала связи.

Подводный робототехнический комплекс; цифровая платформа; информационно-управляющая система; гидроакустическая информационно-навигационная система.

V.F. Filaretov, D.A. Yukhimets, A.V. Zuev, A.S. Gubankov, D.D. Minaev

DIGITAL PLATFORM FOR THE CREATION OF DISTRIBUTED CONTROL AND NAVIGATION SYSTEMS FOR UNDERWATER VEHICLES

The paper proposes the architecture of a digital platform for the implementation of distributed control and navigation systems of underwater vehicles (UV), that perform technological operations in an uncertain environment. The proposed digital platform is designed to automate the following activities: monitoring the state of underwater infrastructure objects (communication lines, pipelines, mining equipment, etc.), cartographic and geodesic works, determining the parameters and boundaries of physical fields, zones of distribution of chemical compounds (pollution zones) and bioresources, protection of underwater and surface infrastructure objects (underwater mariculture farms, borders of water reserves, etc.), tracking moving objects, searching for objects of a given type (biological, man-made, etc.), performing underwater technological operations (welding, cutting, cleaning, etc.). For this platform, a command system has been developed that provides flexible assignment of various types and purposes of UV missions. There are five types of digital platform messages: mission order management commands, mission load management commands, information messages, mission and group control commands. The concept of building distributed control systems of the UV is proposed, which ensures the compatibility of existing on-board UV systems with the proposed solution based on the combined hydroacoustic systems of global hydroacoustic navigation developed in PAO "Dalpribor" (Vladivostok). These control systems consist of two main parts. The first part is the initial on-board information and control system of the UV, which ensures its movement to a given point in space at a given speed, receiving data from on-board sensors, as well as controlling the operation of on-board equipment. The second part – the high level control system, provides the possibility of interaction of the control system through an acoustic communication channel with the global hydro-acoustic navigation system and the operator's automated workplace. Simulation of the data transfer in CoppeliaSim between the operator and the UV within the proposed digital platform have shown that reliable mission loading and receiving information about the state of the UV is provided at different speeds and under different operating conditions of the acoustic communication channel.

Underwater vehicle; digital platform; information and control system; hydroacoustic information and navigation system.

Введение. В настоящее время в шельфовой зоне России (и особенно в арктических морях) разворачиваются работы по добыче углеводородов и других полезных ископаемых с помощью надводных и подводных робототехнических комплексов. Ведутся работы по эффективной проводке судов в сложной ледовой обстановке северных морей. Технические средства подводной добычи и транспортировки этого сырья (особенно подо льдом) и проводки судов во льдах требуют непрерывного контроля их работоспособности, возможного ремонта и обеспечения безопасности (защиты от несанкционированного проникновения). Традиционное использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) пока в основном позволяет выполнять относительно простые обзорные операции, а более сложные, реализуемые вблизи подводных сооружений и объектов, выполняются с помощью телеуправляемых аппаратов, использование которых возможно только при отсутствии ледяного покрова, а также при наличии дорогостоящих судов обеспечения и многочисленного высококвалифицированного обслуживающего персонала [1, 2].

При этом для решения задач управления, навигации и связи с АНПА сейчас используют традиционные гидроакустические системы, требующие длительного развертывания и настройки, специальные акустические системы связи, имеющие очень низкую пропускную способность и ограниченную дистанцию этой связи. Все это не позволяет обеспечивать эффективную высококачественную навигацию и управление АНПА при выполнении сложных подводных технологических работ (особенно при наличии переменных и неизвестных подводных течений). Решением возникшей проблемы является использование гидроакустических станций и комплексов, оснащаемых датчиками (приемниками и излучателями) большого радиуса действия, которые могут определять точные координаты всех надводных и подводных объектов, а также обеспечивать обмен навигационной информацией между этими объектами, реализуя глобальную навигационную систему контроля на протяженных морских акваториях.

Выполненный анализ мирового уровня исследований в данной области науки показал, что в настоящее время проводятся широкомасштабные исследования по созданию многофункциональных АНПА практически для всех видов подводных работ. В частности, в Массачусетском и Лиссабонском технологических институтах эти комплексы разрабатываются на основе автономных роботов Bluefin и MARES. Компанией Lockheed Martin разработан комплекс Marlin, предназначенный для инспектирования и обследования различных гидросооружений. Успешно решаются задачи создания морских робототехнических комплексов для выполнения технологических операций, оснащаемых одним или несколькими подводными манипуляторами [3-6]. Близкие работы ведутся и в ряде других мировых центров подводной робототехники (MBARI /USA/, WHOI /USA/, IFREMER /FRANCE/, ATLAS/GERMANY/ и др.). Эти подводные комплексы проектируются для выполнения многих технологических и исследовательских операций. Уже разработаны и исследованы системы навигации и автоматического управления перемещениями АНПА [7-10]. Известны подходы к реализации информационно-управляющих систем (ИУС) для АНПА разработки ФГБУН ИПМТ ДВО РАН [11, 12], а также НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, НПО «Аврора», НПП ПТ «Океанос», Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет, ЦКБ «Рубин».

В настоящее время одной из ключевых задач является снижение трудоемкости применения АНПА, что достигается применением гидроакустических навигационных систем нового типа, позволяющих исключить длительную процедуру установки и калибровки традиционных систем с длинной базой в зоне работ. Эта задача сейчас решается в двух направлениях. Первое заключается в создании сетей стационарных донных гидроакустических станций, позволяющих обеспечить освещение подводной обстановки в заданном районе Мирового океана. Примером реализации подводной акустической сети служат системы Telesonar и SeaWeb [13-17]. Telesonar соединяет распределенные подводные узлы, объединяет их в один ресурс, обрабатывает информацию и передает ее в подводное пространство. SeaWeb обеспечивает передачу команд, связь и навигационную инфраструктуру для координирования автономных узлов с целью выполнения поставленных задач в любой точке подводной среды. Однако использование подобных сетей имеет существенные недостатки, заключающиеся в высокой стоимости развертывания и эксплуатации, а также привязки их к конкретному району работ. Другой подход заключается в использовании мобильных автономных навигационных систем, которые обеспечивают навигацию АНПА в процессе его работы с помощью надводных автономных аппаратов [18]. Однако такие системы, формируя навигационную поддержку АНПА при выполнении ими работ в заранее неподготовленных районах, не могут реализовать освещение подводной и надводной обстановки, отследить текущее положение АНПА, а также выдать ему новые целеуказания в соответствии с полученной информацией.

В настоящее время на ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток) уже разработаны и частично испытаны основные элементы базовых компонентов компактных гидроакустических систем глобальной гидроакустической навигации. Эти компоненты позволяют создать подводную инфраструктуру связи и мониторинга, реализующую сложные цифровые системы для комплексной автоматизации выполнения многих подводных технологических операций.

Для успешного использования таких станций требуется создание новых принципов построения ИУС АНПА, обеспечивающих их эффективное взаимодействие между собой и с элементами подводной инфраструктуры для успешного решения указанных выше задач. В работе описывается архитектура предлагаемой цифровой платформы (ЦП) для реализации распределенных систем навигации и управления ПРК на основе указанных станций, а также приводятся результаты предварительных исследований ее работы.

Концепция распределенной системы управления и навигации ПРК на основе гидроакустических информационно-навигационных систем. Линейка разработанных ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток) высокоточных гидроакустических информационно-навигационных систем (ГИНС) показана на рис. 1, а их основные характеристики приведены в табл. 1.



Рис. 1. Общий вид новых гидроакустических станций, разработанных на ПАО «Дальприбор»

Таблица 1

Основные характеристики ГИНС

	а	б	с
Дистанция	до 1500 м	700 м	≈ 40,0 км (глубокое море, Японское и Охотское моря) ≈ 15,0 км (мелкое море, Баренцево море)
Точность	± 0.1м (до дистанций 1500 м) 0.5°	пеленг 1,0° дальность 2% от шкалы	пеленг 1,0° дальность 2% от шкалы
Сектор обзора	120°	360°	360°
Потребляемая мощность	не более 20 Вт	не более 100 Вт	не более 3...5кВт
Вес в воздухе	9 кг	9.4 кг	не более 3.0 т

На основе указанных систем и станций предполагается создать базовую подводную инфраструктуру мониторинга, связи и управления для комплексной автоматизации выполнения многих подводных технологических операций. Однако отсутствие современных робототехнических комплексов, способных эффективно взаимодействовать с подводными гидроакустическими станциями и элементами подводной инфраструктуры пока не позволяет успешно решать указанные выше задачи.

Таким образом, создание ПРК, включающего в свой состав АНПА, ГИНС, модули полезной нагрузки, а также средства обеспечения и обслуживания позволит обеспечить отработку перспективных решений в области управления, навигации и связи для автономных подводных роботов, выполняющих технологические операции в различных, в том числе арктических, условиях.

Разрабатываемая ЦП предназначена для автоматизации следующих видов деятельности: мониторинг состояния объектов подводной инфраструктуры (линии связи, трубопроводы, добычное оборудование и т.д.), картографические и геодезические работы, определение параметров и границ физических полей, зон распространения химических соединений (зон загрязнений) и биоресурсов, охрана объектов подводной и надводной инфраструктуры (подводные фермы марикультур, границы водных заповедников и т.п.), сопровождение движущихся объектов, поиск объектов заданного типа (биологических, техногенных и др.), выполнение подводных технологических операций (сварка, резка, очистка и т.п.).

Общая схема построения системы цифровой платформы взаимодействия с ПРК на основе использования ГИНС показана на рис. 2.

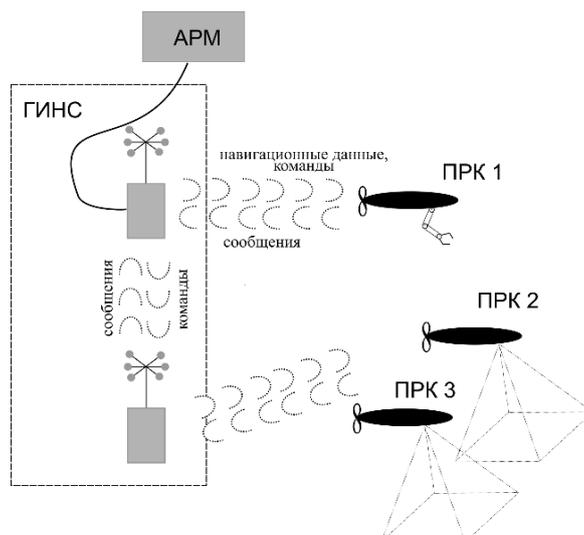


Рис. 2. Схема взаимодействия ПРК с ГИНС

Как видно из представленной схемы, взаимодействие между автоматизированным рабочим местом оператора (АРМ) и ПРК происходит через акустический канал связи, реализованный в ГИНС. По этому каналу связи от АРМ на ПРК передаются сформированные миссии и отдельные команды, требующие выполнения с прерыванием текущей миссии, а от ГИНС передается информация о положении ПРК в глобальной системе координат. При этом по указанным каналам от ПРК на АРМ передается информация о текущем состоянии ПРК, оборудования и возникновении заданных событий (обнаружение искомого объекта, окончание миссии и т.д.).

Для реализации описанной концепции был разработан подход к созданию ИУС ПРК, обеспечивающий совместимость существующих бортовых информационно-управляющих систем (БИУС) ПРК с предлагаемым решением на основе ГИНС, а также предложена система команд, обеспечивающая гибкое задание миссий ПРК различного типа.

Реализация ИУС ПРК, совместимых с цифровой платформой для реализации распределенных систем управления и навигации. Общая схема реализации ИУС, обеспечивающая совместимость БИУС ПРК с цифровой платформой показана на рис. 3.

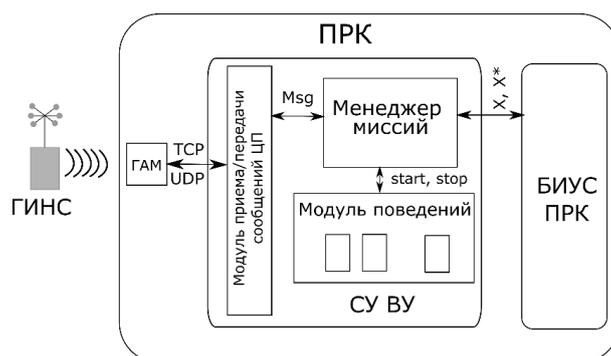


Рис. 3. Общая схема реализации ИУС ПРК, совместимой с цифровой платформой

Как видно из представленного рисунка ИУС ПРК состоит из двух основных частей. Первая часть представляет собой исходную БИУС ПРК, обеспечивающую его движение в заданную точку пространства с заданной скоростью, получение данных от бортовых датчиков, а также управление работой бортового оборудования. Вторая часть – система управления верхнего уровня (см. СУ ВУ на рис. 3), обеспечивает возможность взаимодействия ПРК через акустический канал связи с ГИНС и АРМ. Указанная часть имеет модульную структуру, каждый модуль работает независимо друг от друга в отдельных потоках. Модуль приема/передачи сообщений выполняет следующие задачи:

- ◆ прием данных по протоколу TCP/IP или UDP/IP от гидроакустического модема (ГАМ) ПРК, поддерживающего связь с ГИНС по акустическому каналу связи;
- ◆ декодирование полученных данных и формирование сообщения, который может быть обработан менеджером, и сохранение его в очереди сообщений, доступной менеджеру;
- ◆ выборка сообщения из очереди сообщений, формируемой менеджером в процессе его работы, кодирование сообщения в формат цифровой платформы и передача по протоколу TCP (UDP) в акустический модем для отправки на АРМ.

Менеджер миссий выполняет следующие задачи:

- ◆ анализ очереди сообщений, полученных от ГИНС, и выполнение действий, предписываемых этими сообщениями (формирование и коррекция миссий, пересылка данных, полученных в сообщениях, в БИУС ПРК);
- ◆ контроль выполнения текущей миссии и запуск поведения, соответствующего текущей команде миссии;
- ◆ выявление и обработка внешних событий, требующих формирования очереди сообщений, входящих в систему сообщений цифровой платформы для отсылки по акустическому каналу на пульт оператора;

♦ формирование и отправка внутренних сообщений БИУС ПРК, содержащих навигационную информацию, полученную от ГИНС, и сообщений, содержащих программные сигналы движения ПРК, сформированные поведением, реализующим текущую команду миссии.

Основная задача, выполняемая модулем поведений, является формирование программных сигналов движения, заданных соответствующей командой миссии, в соответствии с параметрами этой команды.

Алгоритм работы каждого поведения состоит в расчете в реальном масштабе времени положения программной точки, задающей желаемое положение ПРК, на траектории, соответствующей типу команды. При этом перемещение указанной программной точки осуществляется со скоростью, заданной в команде. При выходе ПРК в заданную окрестность конечной точки траектории поведение выставляет флаг успешного выполнения команды, после чего менеджер миссии активирует выполнение следующей команды миссии.

Основой предлагаемой цифровой платформы является система сообщений, обеспечивающей передачу информации и взаимодействие оператора и ПРК в рамках этой цифровой платформы.

Сообщение представляет собой телеграмму (пакет, кадр) переменной длины (зависит от типа команды), имеющей следующую структуру:

заголовок – данные – контрольная сумма.

Заголовок команды имеет одинаковую структуру для всех типов команд и состоит из следующих последовательно расположенных полей:

- ♦ код типа сообщения – 8 бит;
- ♦ адрес получателя – 15 бит;
- ♦ адрес отправителя – 15 бит;
- ♦ флаг подтверждения (CF) – 2 бита (1 бит – является ли сообщение подтверждением, 2 бит – нужно ли подтверждение);
- ♦ размер данных – фиксированный для каждой команды;
- ♦ номер команды – 8 бит;
- ♦ контрольная сумма (CRC) – 8 бит.

Выделяются следующие типы сообщений цифровой платформы.

1. Команды управления порядком выполнения миссии – позволяют изменить предписанный порядок выполнения команд в миссии, приостановить или досрочно ее прекратить. В качестве таких команд выступают:

OK – подтверждение успешного выполнения команды миссии.

FAILURE – завершение команды с ошибкой (невозможность выполнения команды).

GOTO – безусловный переход к заданной команде миссии.

BACK – возвращение к точке старта.

STOP – прервать выполнение текущей миссии и ожидать поступление команд или новой миссии.

PAUSE – приостановить миссию. Возобновить с текущей команды после команды START.

START – запустить миссию на выполнение или продолжить выполнение миссии после PAUSE.

UP – аварийное всплытие.

WAIT – режим ожидания в течение заданного промежутка/до заданного момента времени.

ACKN – подтверждение получения команды.

2. Команды, управляющие загрузкой миссии – обеспечивают процесс удаленной загрузки и коррекции миссии ПРК.

LOAD_MISS_ST – начало загрузки миссии.

LOAD_MISS_END – окончание загрузки миссии.

REMOVE_CMD – удаление последовательности команд из миссии.

UPLOAD_MISS_ST – начало выгрузки миссии.

UPLOAD_MISS_END – окончание выгрузки миссии.

NON_CORRECT_MISS_TRANSF – полученная миссия некорректна.

GET_HASH_MISS – запрос хэша миссии.

HASH_MISS – хэш миссии.

3. Информационные сообщения - используются для запроса и передачи информации между ПРК и пультом оператора. Информационные сообщения не включаются в состав миссии и могут передаваться независимо от выполняющейся команды миссии.

NAVIG – информация о текущем положении ПРК, полученная от гидроакустической станции

GET_STATUS – запрос текущего статуса ПРК.

STATUS_00 – текущий состав оборудования ПРК.

STATUS_01 – номер выполняемой команды миссии.

STATUS_02 – текущие навигационные данные.

STATUS_03-STATUS_35 – состояние оборудования.

EVENT_HAPPEN – сообщение о наступлении события.

SET_EVENT – задание события и его порогового значения, на которое ПРК должен реагировать.

REMOVE_EVENT – удалить событие, на которое ПРК должен реагировать.

SET_PARAM – установка значения параметра.

4. Команды миссии задают маршрут и режим движения ПРК [19]. Каждая команда обеспечивает переход ПРК из его текущего положения в положение, заданное командой, в соответствии с желаемым режимом движения [20]. В качестве основных примитивов движения выделяются: движение в заданную точку (результатирующая траектория не имеет значения), движение по прямой, движение по сплайну.

Способ реализации режимов движения ПРК, заданных в командах миссии, не оговаривается и зависит от особенностей информационно управляющей системы конкретного ПРК.

В качестве базовых команд определены следующие:

MOVE2P – движение к точке с заданными координатами с заданной скоростью.

MOVE_STR – движение в точку с заданными координатами с заданной скоростью по прямой.

MOVE_SMOOTH – выход в точку с заданными координатами с заданной ориентацией.

SEARCH_SPR – поиск в заданном районе по архимедовой спиральной траектории.

SEARCH_SNAKE – поиск расходящейся змейкой.

MOVE_ALONG – движение вдоль протяженного объекта.

EQUIP – управление оборудованием.

TRACKING – слежение за заданным объектом.

5. Команды группового управления. В качестве группового управления рассматривается режим строевого управления, реализующий стратегию «лидер-ведомые». В этом режиме в группе ПРК задается один ПРК-лидер, а все остальные

задаются как ПРК-ведомые. Миссия загружается только на ПРК-лидер, а ПРК-ведомые должны следовать за лидером, соблюдая заданную позицию относительно лидера. Они имеют следующий вид:

GR_SET_ROLE – установить роль ПРК в группе (лидер или ведомый).

GR_LIDER_FOLLOWING – следование за лидером.

GR_MOVE2IP – выход в начальное положение для движения за лидером.

GR_DISMISSED – расформирование группы.

Следует отметить, что описанный набор сообщений может быть расширен при условии сохранения формата сообщения.

Исследование передачи данных между АРМ и ПРК в рамках предложенной цифровой платформы. При проведении исследований в симуляторе (CorreliaSim) размещались два узла, на разных расстояниях (см. колонку «Дистанция» табл. 2 и 3). Первым узлом является ГИНС, которая осуществляет передачу тестовой миссии второму узлу в виде последовательности команд (сообщений) в формате ЦП через моделируемый гидроакустический канал связи. Координаты положения ГИНС во всех экспериментах были постоянными со значением (0,0,0) в прямоугольной трехмерной системе координат. Вторым узлом является ПРК, который осуществляет приём тестовой миссии для ее выполнения от ГИНС через гидроакустический канал связи.

Таблица 2

Передача миссии

№	Дистанция, м	Скорость передачи, кБ/с	Вероят. получения сообщ.	Среднее кол-во команд, сообщ./мин	Кол-во пропущенных сообщ.	Время передачи основной миссии, с
1	100	7	0.99	268.9454243	2	9.36993074
2	400	4	0.9	75.70242279	7	33.2882345
3	400	0.8	0.8	36.02922293	25	69.9432237
4	1500	0.8	0.8	17.60655195	13	143.128536
5	7000	0.2	0.65	2.120489948	46	1188.4046

Таблица 3

Корректировка миссии

№	Дистанция, м	Скорость передачи, кБ/с	Вероят. получения сообщ.	Среднее кол-во команд, сообщ./мин	Кол-во пропущенных сообщ.	Время коррекции миссии, с
1	100	7	0.99	290.9631414	0	2.47454023
2	400	4	0.9	58.89287018	5	12.2255886
3	400	0.8	0.8	33.25837225	9	21.6486843
4	1500	0.8	0.8	12.74355427	8	56.4991512
5	7000	0.2	0.65	2.253563759	12	319.493956

При проведении испытаний осуществлялась проверка двух режимов работы: загрузка миссии на ПРК и ее корректировка. При этом была выбрана типовая для АНПА обзорно-поисковая миссия, состоящая из последовательности прямолинейных галсов, покрывающих заданную морскую акваторию траекторией движения в форме меандра (см. рис. 4). Основная миссия состояла из 40 команд MOVE2P, которые задавали координаты узловых точек меандра и скорость движения ПРК (1.5 м/с) на каждом прямолинейном участке. Координаты по оси Y для всех узловых точек были постоянными, как показано на рис. 4, а по оси X координаты сме-

щались относительно начального положения ПР. Кроме того, передавались еще две дополнительные команды для включения и отключения режима загрузки миссии: `LOAD_MISS_ST` и `LOAD_MISS_END`, соответственно. То есть сначала от ГИНС на борт ПРК пересылалась команда `LOAD_MISS_ST`, далее передавалась основная миссия из 40 команд движения в заданную точку с заданной скоростью, и в конце пересылалась последняя команда – `LOAD_MISS_END`. В процессе передачи миссии на каждую полученную команду от ГИНС с борта ПРК передавалось ответное подтверждающее сообщение, таким образом обеспечивалась гарантированная доставка заданной миссии. А корректность всей миссии обеспечивалась за счет проверки хэш-суммы по всем командам переданной миссии.



Рис. 4. Траектория движения, формируемая основной миссией

Основная миссия была сформирована автоматически, благодаря использованию унифицированных команд, предложенных в рамках ЦП, которые были реализованы в виде библиотеки функций.

Вторым режимом, который был проверен на испытаниях, являлся режим корректировки миссии. Для этого были изменены последние 10 команд основной миссии, так что была сформирована траектория движения, показанная на рис. 5. При этом для корректировки основной миссии также, как и для загрузки, передавались дополнительные две команды `LOAD_MISS_ST` и `LOAD_MISS_END`, между которыми передавался откорректированный участок миссии.

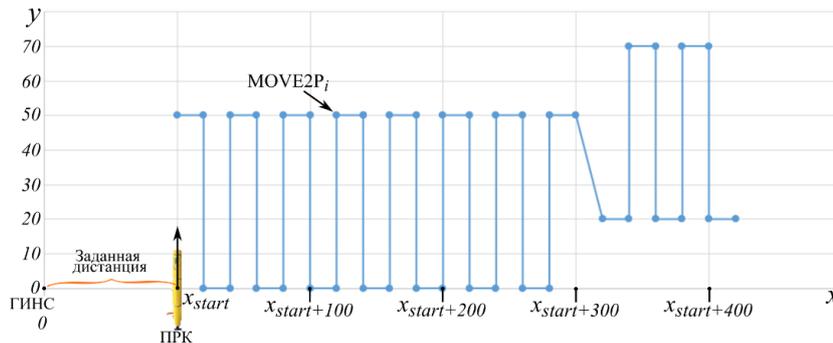


Рис. 5. Траектория движения, после корректировки основной миссии

Передача всех сообщений между ГИНС и ПРК осуществлялась через моделируемый гидроакустический канал связи. При этом моделировались следующие параметры этого канала связи: скорость передачи данных, вероятность получения сообщения и скорость распространения звуковой волны в воде, которая была постоянной и составляла 1500 м/с.

Исследования передачи данных между АРМ и ПРК в рамках предложенной ЦП показали, что обеспечивается надежная загрузка миссий и получение информации о состоянии ПРК при различных скоростях и в различных условиях работы акустического канала связи.

Заключение. В работе предложена архитектура ЦП для реализации распределенных систем управления и навигации для автономных подводных аппаратов, выполняющих технологические операции в различных, в том числе арктических, условиях, а также предложена система команд, обеспечивающая гибкое задание миссий ПРК различного типа. Предложенная ЦП построена на базе компактных гидроакустических систем глобальной гидроакустической навигации, разработанных в ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток). Выполненные исследования подтвердили работоспособность, эффективность и надежность предложенной архитектуры и решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Yuh J., Marani G., Blidberg R.* Applications of marine robotic vehicles // *Intelligent Service Robotics*. – 2011. – No. 2. – P. 221-231.
2. *Button R., Kamp J., Curtin T., Driden J.* A Survey of Missions for Underwater Undersea Vehicles. PA: RAND Corporation, USA, Santa Monica, CA, Arlington, VA, Pittsburgh. 2009. – 223 p.
3. *Simetti E., Casalino G.* Manipulation and Transportation With Cooperative Underwater Vehicle Manipulator Systems // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. – 2017. – Vol. 42, No. 4. – P. 782-799.
4. *Filaretov V.F., Konoplin N.Yu., Konoplin A.Yu.* System for automatic soil sampling by AUV equipped with multilink manipulator // *International Journal of Energy Technology and Policy*. – 2019. – Vol. 15, No. 2/3. – P. 208-223.
5. *Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I., Konoplin A.* Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles // *Proceedings of 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. – 2019. – P. 1-6.
6. *Farivarnejad H., Moosavian S.* Multiple impedance control for object manipulation by a dual arm underwater vehicle–manipulator system // *Ocean Engineering*. – 2014. – Vol. 89. – P. 82-98.
7. *Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А.* Системы и устройства управления подводных роботов. – М.: Наука, 2005. – 270 с.
8. *Fossen T.I.* Guidance and control of oceanic vehicles. – New York, USA: John Wiley and Sons, 1994. – 494 p.
9. *Sun Y.C., Cheah C.C.* Adaptive control schemes for autonomous underwater vehicle // *Robotica*. – 2008. – Vol. 27. – P. 119-129.
10. *Fossen T.I., Blanke M.* Nonlinear output feedback control of underwater vehicle propellers using feedback form estimated axial flow velocity // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. – 2000. – Vol. 25, No. 2. – P. 241-255.
11. *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: Изд-во ИПМТ ДВО РАН, 2018. – 368 с.
12. Автономные подводные роботы: системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева, отв. ред. Л.В. Киселев. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
13. *Kulhandjian H., Kuo L., Melodia T.* Extended Abstract: Development of a Reconfigurable Underwater Networking Testbed // *Proc. of ACM Intl. Conf. on UnderWater Networks and Systems (WUWNet)*. – 2012. – P. 1-2.
14. *Melodia T., Kulhandjian H., Kuo L., and Demirors E.* Advances in Underwater Acoustic Networking // *Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions*, Eds. S. Basagni, M. Conti, S. Giordano and I. Stojmenovic, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ. – 2013. – P. 804-852.
15. *Kulhandjian H., Kuo L., Melodia T., Pados D., Green D.* Towards Experimental Evaluation of Software-Defined Underwater Networked Systems // *Proc. of IEEE UComms. Sestri Levante, Italy*. – 2012. – P. 12-14.

16. Heidemann J., Stojanovic M., Zorzi M. Underwater Sensor Networks: Applications, Advances, and Challenges // *Phil. Trans. R. Soc. A.* – 2012. – Vol. 370, No. 1958. – P. 158-175.
17. Rice J.A., Creber R.K., Fletcher C.L., Baxley P.A., Davison D.C., Rogers K.E. Seaweb Undersea Acoustic Nets // *Biennial Review, SSC San Diego Technical Document TD 3117.* – 2001. – P. 234-250.
18. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. About accuracy estimation of AUV single-beacon mobile navigation using ASV, equipped with DGPS // *OCEANS 2016. Shanghai, China.* – 2016. – P. 1-4.
19. Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A. Method of spatial path planning for mobile robot in unknown environment // *Proc. of the 28th DAAAM Int. Symp.* – 2017. – P. 0258-0267.
20. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed // *Proc. of Int. Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA 2016).* – 2016. – P. 93-96.

REFERENCES

1. Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles, *Intellegent Service Robotics*, 2011, No. 2, pp. 221-231.
2. Button R., Kamp J., Curtin T., Driden J. A Survey of Missions for Underwater Undersea Vehicles. PA: RAND Corporation, USA, Santa Monica, CA, Arlington, VA, Pittsburgh. 2009, 223 p.
3. Simetti E., Casalino G. Manipulation and Transportation With Cooperative Underwater Vehicle Manipulator Systems, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, Vol. 42, No. 4, pp. 782-799.
4. Filaretov V.F., Konoplin N.Yu., Konoplin A.Yu. System for automatic soil sampling by AUV equipped with multilink manipulator, *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2019, Vol. 15, No. 2/3, pp.208-223.
5. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I., Konoplin A. Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles, *Proceedings of 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2019, pp. 1-6.
6. Farivarnejad H., Moosavian S. Multiple impedance control for object manipulation by a dual arm underwater vehicle–manipulator system, *Ocean Engineering*, 2014, Vol. 89, pp. 82-98.
7. Filaretov V.F., Lebedev A.V., Yukhimets D.A. Sistemy i ustroystva upravleniya podvodnykh robotov [Underwater robot control systems and devices]. Moscow: Nauka, 2005, 270 p.
8. Fossen T.I. Guidance and control of oceanic vehicles. New York, USA: John Willei and Sons, 1994, 494 p.
9. Sun Y.C., Cheah C.C. Adaptive control schemes for autonomous underwater vehicle, *Robotica*, 2008, Vol. 27, pp. 119-129.
10. Fossen T.I., Blanke M. Nonlinear output feedback control of underwater vehicle propellers using feedback form estimated axial flow velocity, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, Vol. 25, No. 2, pp. 241-255.
11. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic complexes: systems, technologies, application]. Vladivostok: Izd-vo IPMT DVO RAN, 2018, 368 p.
12. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots: systems and technologies], ed. by M.D. Ageeva, L.V. Kiselev. Moscow: Nauka, 2005, 398 p.
13. Kulhandjian H., Kuo L., Melodia T. Extended Abstract: Development of a Reconfigurable Underwater Networking Testbed, *Proc. of ACM Intl. Conf. on UnderWater Networks and Systems (WUWNet)*, 2012, pp. 1-2.
14. Melodia T., Kulhandjian H., Kuo L., and Demirors E. Advances in Underwater Acoustic Networking, *Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions*, Eds. S. Basagni, M. Conti, S. Giordano and I. Stojmenovic, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2013, pp. 804-852.
15. Kulhandjian H., Kuo L., Melodia T., Pados D., Green D. Towards Experimental Evaluation of Software-Defined Underwater Networked Systems, *Proc. of IEEE UComms. Sestri Levante, Italy*, 2012, pp. 12-14.
16. Heidemann J., Stojanovic M., Zorzi M. Underwater Sensor Networks: Applications, Advances, and Challenges, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2012, Vol. 370, No. 1958, pp. 158-175.
17. Rice J.A., Creber R.K., Fletcher C.L., Baxley P.A., Davison D.C., Rogers K.E. Seaweb Undersea Acoustic Nets, *Biennial Review, SSC San Diego Technical Document TD 3117*, 2001, pp. 234-250.

18. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. About accuracy estimation of AUV single-beacon mobile navigation using ASV, equipped with DGPS, *OCEANS 2016. Shanghai, China*, 2016, pp. 1-4.
19. Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A. Method of spatial path planning for mobile robot in unknown environment, *Proc. of the 28th DAAAM Int. Symp.*, 2017, pp. 0258-0267.
20. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed, *Proc. of Int. Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA 2016)*, 2016, pp. 93-96.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Жирабок.

Филаретов Владимир Федорович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ); e-mail: filaretov@inbox.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: 84232652424; д.т.н.; профессор; директор департамента.

Юхимец Дмитрий Александрович – e-mail: undim@dvo.ru; тел.: 84232313783; д.т.н.; доцент; в.н.с.

Зуев Александр Валерьевич – e-mail: alvzuev@yandex.ru; тел.: 84232432416; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Губанков Антон Сергеевич – e-mail: gubankov@dvo.ru; тел.: 89024884000; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Минаев Дмитрий Дмитриевич – Публичное акционерное общество «Дальприбор»; e-mail: minaev@dalpribor.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: 84232326368; к.т.н.; зам. главного конструктора.

Filaretov Vladimir Fedorovich – Far Eastern Federal University (FEFU); e-mail: filaretov@inbox.ru; Vladivostok, Russia; phone: +74232652424; dr. of eng. sc.; professor; director of the department.

Yukhimets Dmitry Aleksandrovich – e-mail: undim@dvo.ru; phone: +74232313783; dr. of eng. sc.; associate professor; leading researcher.

Zuev Alexander Valer'evich – e-mail: alvzuev@yandex.ru; phone: +74232432416; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.

Gubankov Anton Sergeevich – e-mail: gubankov@dvo.ru; phone: +79024884000; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.

Minaev Dmitry Dmitrievich – Public Joint Stock Company “Dalpribor”; e-mail: minaev@dalpribor.ru; Vladivostok, Russia; phone: +74232326368; cand. of eng. sc.; deputy chief designer.

УДК 004.896+629.58+001.891.57

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-93-101

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

АЛГОРИТМ МАНЕВРИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ПРОВОДКЕ СУДНА ЧЕРЕЗ ЗАМИНИРОВАННЫЙ РАЙОН*

Одной из задач, возлагаемых на автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), является борьба с минной опасностью, которая включает: 1) поиск и уничтожение мин в заминированном районе; 2) обеспечение собственной безопасности при проходе через заминированный район либо при работе в этом районе; 3) обеспечение проводки судов (включая подводные лодки) через заминированный район. АНПА можно рассматривать в качестве дальнейшего развития средств борьбы с минной опасностью, поскольку они имеют ряд преимуществ перед противоминными кораблями: 1) исключают гибель людей

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