Шаповалов Петр Анатольевич – АО «ЦНИИАГ»; e-mail: kinik.keni@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79267101927; начальник лаборатории.

Михайлов Юрий Владимирович – e-mail: mikhaylov.yu@gmail.com; тел.: +79268736958; к.т.н.; ведущий инженер.

Фролов Александр Владимирович – e-mail: frolov@frolov.moscow; тел.: +79037867374; к.т.н.; начальник отдела.

Савватеев Денис Олегович – e-mail: savvateev.denis24@gmail.com; начальник лаборатории.

Shapovalov Petr Anatolievich – JSC «CNIIAG»; e-mail: kinik.keni@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79267101927; head of laboratory.

Mikhaylov Yury Vladimirovich – e-mail: mikhaylov.yu@gmail.com; phone: +79268736958; cand. of eng. sc.; lead engineer.

Frolov Alexander Vladimirovich – e-mail: frolov@frolov.moscow; phone: +79037867374; cand. of eng. sc.; head of department.

Savvateev Denis Olegovich – e-mail: savvateev.denis24@gmail.com; head of laboratory.

УДК 629.05 DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-265-274

А.М. Грузликов, В.Г. Караулов, Д.А. Мухин, Н.А. Шалаев

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ АЛГОРИТМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПО ДАННЫМ ОТ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯКОВ

Статья посвящена вопросу определения координат и углов ориентации автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) относительно стационарной посадочной платформы с использованием высокочастотной гидроакустической системы ближнего радиуса действия. Задача навигации предполагает маневрирование аппарата и приближение к подводной станции, что сопряжено с формированием зон с различной акустической видимостью излучателей станции приёмными элементами аппарата. Можно выделить три зоны акустической видимости. Первая зона характеризуется наблюдением сигналов всех маяков подводной станции. Как следствие, данная зона является наиболее информативной для решения задачи позиционирования и определения ориентации АНПА. Вторая зона соответствует частичному сокращению числа наблюдаемых маяков, не оказывающему критического влияния на возможность решения задачи. Третья зона (посадка) определяется существенным сокращением числа наблюдаемых маяков, что, как следствие, значительно затрудняет решение задачи позиционирования, учитывая повышенные требования по точности в момент посадки аппарата, обусловленные обеспечением безопасности. Для сохранения точности позиционирования и определения ориентации подводного аппарата в зоне посадки, предлагается использовать результаты, полученные на ранних этапах приближения аппарата к подводной станции (первая и вторая зоны). В работе приводится математическая постановка задачи, описан алгоритм её решения. При нахождении АНПА в первой и второй зоне алгоритм решения состоит из двух подзадач. Первая подзадача – грубая оценка окрестности местоположения и углов ориентации аппарата с использованием метода K-ближайших соседей; вторая подзадача – уточнение оценок с использованием псевдодальномерного метода путём решения системы алгебраических уравнений с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта. Дополнительно осуществляется оценка времени излучения маяками. При нахождении АНПА в третьей зоне алгоритм сводится к решению системы алгебраических уравнений с использованием прогноза времени излучения сигнала маяком, полученного при нахождении аппарата в зонах один и два. Приведены результаты имитационного моделирования и результаты апробации алгоритма, полученные с использованием макета аппарата и макета подводной станции в испытательном бассейне.

Автономный необитаемый подводный аппарат; гидроакустическая навигационная система; навигация; ориентация; задача приведения.

A.M. Gruzlikov, V.G. Karaulov, D.A. Mukhin, N.A. Shalaev

RESULTS OF TESTING THE POSITIONING ALGORITHM AND DETERMINING THE ORIENTATION OF THE UNDERWATER VEHICLE BASED ON DATA FROM HYDRO-ACOUSTIC BEACONS

The article deals with the determination of coordinates and orientation angles of the autonomous underwater vehicle (AUV) relative to the stationary landing platform using high-frequency near-range hydroacoustic system. The navigation task implies maneuvering the vehicle and approaching the underwater station, which is associated with the formation of zones with different acoustic visibility of the station's emitters by the receiving elements of the vehicle. Three zones of acoustic visibility can be distinguished. The first zone is characterized by observation of signals of all beacons of the underwater station. As a consequence, this zone is the most informative for solving the problem of positioning and orientation determination of the AUV. The second zone corresponds to partial reduction of the number of observed beacons, which does not critically influence the possibility of problem solving. The third zone (landing) is defined by essential reduction of a number of observed beacons, that, as consequence, considerably complicates the solution of the positioning problem, taking into account the increased requirements on accuracy at the moment of landing of the device caused by provision of safety. To maintain positioning accuracy and determine the underwater vehicle orientation in the landing zone, it is proposed to use the results obtained in the early stages of approach of the vehicle to the underwater station (the first and second zones). A mathematical statement of the problem is given in the work, and the algorithm of its solution is described. When finding the AUV in the first and second zones, the solution algorithm consists of two subtasks. The first subtask is a rough estimation of location vicinity and angles of vehicle orientation using K-nearest neighbors method; the second subtask is specification of estimations using pseudo-dimensional method by solving system of algebraic equations with Levenberg-Marquardt algorithm. In addition, estimation of beacon emission time is carried out. At finding ANPA in the third zone the algorithm is reduced to solution of system of algebraic equations with use of forecast of time of signal emission by a beacon, received at finding of the device in zones one and two. The results of simulation modeling and results of algorithm approbation obtained using a mockup of the vehicle and a mockup of the underwater station in the test pool are presented.

Autonomous underwater vehicle; hydroacoustic navigation system; navigation; orientation; navigation task.

Введение. В статье представлены результаты апробации алгоритма позиционирования и определения ориентации АНПА с использованием высокочастотной гидроакустической системы приведения ближнего радиуса действия в интересах решения задачи навигации относительно подводной базовой станции. Указанная задача не является новой, однако, в литературе преимущественно рассматриваются системы с использованием разнородных систем на различных этапах приведения подводного аппарата:

- на этапе сближения традиционный подход основан на использовании маяков – ответчиков и предполагает излучение сигнала от АНПА с получением ответного сигнала от подводной базы [1–5]. Данный подход не применим на коротких дистанциях, поскольку не удовлетворяет требования по точности в обеспечение безопасности аппарата. Кроме того, излучение запросного сигнала делает АНПА уязвимым для внешнего обнаружения;
- на этапе стыковки применяются системы технического зрения, когда на базе устанавливаются специальные маркеры – ориентиры, а на подводном аппарате размещаются видеокамеры [6–14]. Данный подход хорошо изучен, известны работы по визуальному позиционированию с использованием нейронных сетей [15] и т.д. Однако, для решения задачи позиционирования с использованием технического зрения необходимы значительные вычислительные ресурсы на борту аппарата, и, кроме того, необходимо решить вопрос, связанный с появлением помех из-за

замутнения воды на дне водоёма (например, при маневрировании аппарата), а также возможной деградацией аппаратуры объектива видеокамеры при длительной эксплуатации в морской среде.

Используемый авторами подход предполагает решение задачи позиционирования и определения углов ориентации с использованием только излучателей на подводной базе [16–19]. Гидроакустическая система позиционирования и определения ориентации аппарата имеет в своем составе приёмные антенны, которые размещаются под килем АНПА в кормовой и носовой части, а также излучатели, устанавливаемые по краям базы и осуществляющие ненаправленное излучение сигнала, см. рис. 1. Следует отметить, что излучаемые сигналы – это тональные сигналы одной частоты, излучение которых разнесено по времени таким образом, чтобы по периоду обнаружения сигнала можно было однозначно идентифицировать источник излучения.

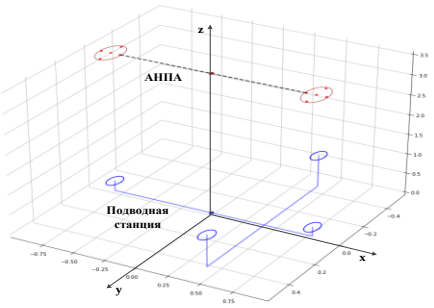

Рис. 1. Схема размещения гидроакустической системы АНПА и подводной станцией

Приведение АНПА предполагает маневрирование аппарата и последовательное приближение к базе, что приводит к необходимости решения задач определения координат и углов ориентации относительно базы при различной акустической видимости излучателей приёмными элементами антенн. При маневрировании АНПА можно выделить три зоны видимости приёмниками различных излучателей, см. рис. 2, которые обусловленны диаграммой направленности излучателей и положением аппарата:

- зона 1 – в зоне видимости каждой антенны находятся все четыре излучателя;
- зона 2 – в зоне видимости каждой антенны находятся три излучателя;
- зона 3 – в зоне видимости каждой антенны находятся по одному излучателю.

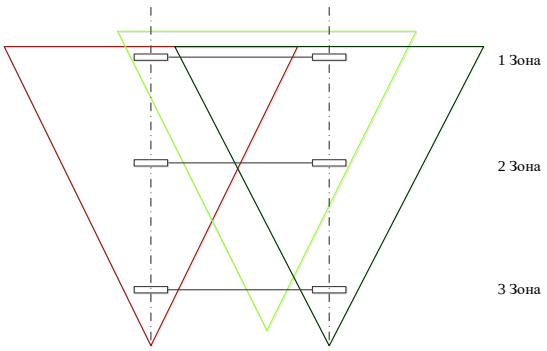

Рис. 2. Зоны видимости излучателей приемниками на АНПА

Для успешного решения задачи приведения АНПА к подводной базе необходимо обеспечить ошибку позиционирования аппарата в момент стыковки (в зоне 3) в пределах нескольких сантиметров. Решение становиться возможным при использовании информации полученной при прохождении АНПА через зону 1 и 2.

В статье приведены результаты натурной апробации разработанного авторами алгоритма навигации, которые были получены при проведении экспериментов с использованием макетов АНПА и макета подводной базы в испытательном бассейне предприятия. Приведены результаты посадки при разных скоростях и расположении относительно геометрического центра аппарата.

Постановка задачи. Для решения задачи позиционирования и определения ориентации аппарата при нахождении в зоне 1 выполняются следующие действия:

1. Обнаружение сигналов от маяков подводной базы. Пусть $\hat{t}_i$ – это оценка времени получения сигнала на входе i приёмника ($i \in 1{:}\,10$);
2. Идентификация маяков в соответствии с временной диаграммой последовательности излучений. Пусть $\hat{t}_i^j$ – это оценка времени получения сигнала $\hat{t}_i$ с учётом идентификацией излучения сигнала от маяка ($i \in 1{:}\,10, j \in 1{:}\,4$). При этом координаты $(x, y, z)^j$ и последовательность времён излучения маяков считаются известными.

Требуется разработать метод ($Fnav1$), осуществляющий преобразование множества оценок времён принятых на антенны аппарата сигналов от маяков базы в координаты $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$, углы ориентации АНПА $(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\gamma})$ и время излучения от первого маяка ($\tilde{t}^1$):

$$\langle \hat{t}_i^j, (x, y, z)^j \rangle_{i \in 1:10, j \in 1:4} \xrightarrow{Fnav1} (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\gamma}, \tilde{t}^1).$$

Тогда при нахождении АНПА в зоне 2, задача навигации определяется как:

$$\langle \hat{t}_i^j, (x, y, z)^j, \tilde{t}^1 \rangle_{(i,j)} \xrightarrow{Fnav2} (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\gamma}, \tilde{t}^1),$$

где пары $(i, j) \in \{(1{:}\,5, 1), (1{:}\,5, 3{:}\,4), (6{:}\,10, 2{:}\,4)\}$ – определяют область видимости излучателей приёмными элементами антенн АНПА.

Тогда при нахождении АНПА в зоне 3, задача навигации определяется как:

$$\langle \hat{t}_i^j, (x, y, z)^j, \tilde{t}^1 \rangle_{(i,j) \in \{(1:5,1),(6:10,2)\}} \xrightarrow{Fnav3} (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\gamma}).$$

Требуется разработать методы навигации ($Fnav1$, $Fnav2$, $Fnav3$) для позиционирования и определения углов ориентации относительно подводной базы в зависимости от полученных сигналов от маяков и от их числа (в соответствии с зоной акустической видимости).

Метод решения задачи навигации при нахождении АНПА в зоне 1. Определим следующий двух-этапный алгоритм решения задачи навигации. На первом этапе найдём окрестность координат и углов ориентации АНПА, на втором этапе найдём оценку времени излучения первого маяка. Разберём данное решение более подробно.

Этап 1. Поиск окрестности координат и углов ориентации. Воспользуемся подходом на основе метода обучения с учителем [20], где обучающая выборка будет сформирована с использованием решения геометрической задачи на заданной координатной сетке и таблицы углов ориентации. В качестве признаков выберем следующие значения:

- $\left(t_a^j - t_b^j\right)_{j \in 1:4}$ – разница времён приёма сигнала, между парами максимально разнесенных приёмных элементов (a, b) на фиксированном маяке (очевидно, что разница времён между сигналами, принятыми на приёмные элементы, входящие в одну антенну, менее информативна);
- $\left(t_i^a - t_i^b - t^{a,b}\right)_{i \in 1:10}$ – разница времён приёма сигнала между парами маяков (a, b) на фиксированном приёмном элементе и смещением по времени излучения сигнала маяками (известное значение $t^{a,b}$).

В качестве искомых значений зададим сетку возможных значений координат и углов ориентации АНПА. Предлагается использовать метод *K*-ближайших соседей с использованием метрики $L1$ (манхэттенское расстояние). Выбор метрики $L1$ позволяет нивелировать ошибку по идентичности приёмных элементов и уменьшить влияние ошибки по оценке фронта принятого сигнала от маяка подводной базы. Предлагаемый метод достаточно прост для реализации, однако стоит обратить внимание, что эффективность решения будет существенно зависеть от шага исходной сетки, т.к. полученные значения признаков (разниц времён) будут «притягиваться» к исходным узлам сетки признаков. Рассмотрим следующие варианты формирования исходной сетки признаков:

- первый вариант, предварительный расчёт исходной сетки с переменным шагом (шаг значительно уменьшается при приближении к оси z);
- второй вариант, предварительный «грубый» расчёт исходной сетки признаков, затем поиск решения с использованием метода *K*-ближайших соседей, определение границ возможной окрестности нахождения аппарата и окрестности углов ориентации, формирование «мелкой» сетки признаков исходя из полученных границ окрестностей, т.е. метод последовательного приближения искомого решения.

Первый вариант показал свою эффективность при решении задачи навигации, однако требует неприемлемо больших объёмов памяти при работе (50 Мбайт по одному угловому направлению и не менее 4 Гбайт по всем направлениям).

Второй вариант, показал свою эффективность, причём требует незначительных вычислительных затрат для генерации новой, уточненной сетки. Для проверки метода, была проведена имитация маневрирования аппарата (см. рисунок 3), проведены вычисления координат и направления (курсового угла) аппарата при первом (на грубой сетке) и на втором (уточненной сетке) приближении, истинное значение и результат оценки курсового угла представлены на рис. 4.

По результату имитационного моделирования, оценка среднеквадратического отклонения (СКО) курсового угла на «грубой» сетке (1-я оценка курса НПА) составил 16º, с последующим уточнением путем формирования «мелкой» сетке в заданной окрестности (2-я оценка курса АНПА) СКО курсового угла составило 3º.

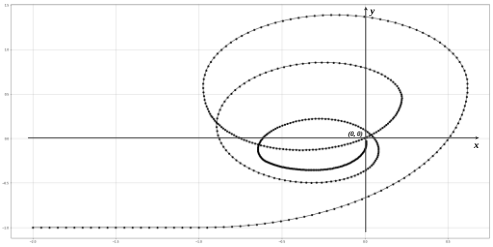

Рис. 3. Имитация маневрирования АНПА относительно подводной базы

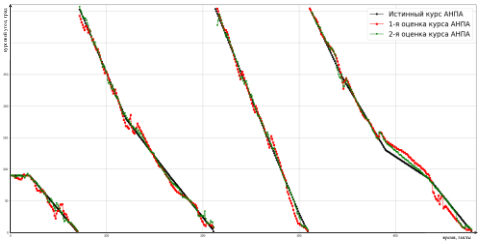

Рис. 4. Истинное значение курса носителя и его оценка при первом (грубом) и на втором (уточненном) приближении

Этап 2. Уточнение решения навигационной задачи и определение времени сводится к решению системы алгебраических уравнений с использованием метода Левенберга-Марквардта [21], где в качестве начального значения задаются координаты и углы ориентации, полученные на первом этапе.

Следует обратить внимание, что главной целью решения системы алгебраических уравнений является нахождение оценки времени излучения сигнала первым маяком $\tilde{t}^1$ и использовать данное значение для синхронизации времени излучения и времени приёма подводным аппаратом, т.е. перейти к решению задачи навигации с использованием псевдодальномерного метода [22-24].

Метод решения задачи навигации при нахождении АНПА в зоне 2 и 3. При нахождении аппарата в зоне 2 и в зоне 3, часть маяков выходят из зоны прямой акустической видимости, как следствие число информационных значений существенно уменьшается, что делает использование подхода по предварительному нахождению окрестности координат (выполнение этапа 1 в зоне 1) не целесообразным. Как следствие, определение координат и углов ориентации сводится к решению системы алгебраических уравнений на основе псевдодальномерного метода с использованием прогнозирования времени излучения сигнала от известного маяка (например, с использованием оценки времени от первого маяка $\tilde{t}^1$) подводной базы на основе оценок выполненной при нахождении аппарата в первой зоне.

Описание эксперимента. Натурная апробация алгоритма проводилась в испытательном бассейне предприятия с использованием подъёмно-поворотного устройства (ППУ), на котором размещался макет АНПА. На дно бассейна размещался макет подводной базовой станции.

До размещения макета станции, производился монтаж поплавковых индикаторов с целью измерения глубины размещения (наличия крена/дифферента для учёта неровности дна бассейна), а также для определения оси геометрического центра станции.

Приёмные антенны размещались на подъемно-поворотном устройстве, ось вращения поворотного устройства устанавливалась над геометрическим центром подводной базы и принималась за начало координат (в горизонтальной плоскости). Отсчёт вертикальной координаты производился от плоскости крепления поплавковых индикаторов при отсутствии крена/дифферента макета базы или от точки крепления поплавкового индикатора, имеющего максимальную глубину, при наличии крена/дифферента.

Проверка определения положения и углов ориентации макета АНПА относительно макета подводной станции проводился в следующей последовательности:

- ППУ с закрепленными на нем посредством держателя приёмными антеннами устанавливался в исходное положение – начало координат в горизонтальной плоскости (на оси геометрического центра подводной станции) и на поверхности воды бассейна. Начальное значение по оси – z определялся по значениям поплавковых индикаторов;
- производится включение излучения маяков в соответствии с заданной временной диаграммой;
- производилось смещение ППУ в заданную точку (в горизонтальной плоскости) и на заданную глубину для обеспечения условий текущей проверки. Контроль перемещения ППУ осуществляется посредством пульта управления ППУ комплекса испытательного бассейна;
- производится (при необходимости) поворот ППУ с закрепленными приёмными антеннами на заданный угол;
- исходя из заданных смещений в вертикальной и горизонтальной плоскостях вычисляются фактические значения координат ППУ. Полученные значения принимаются в качестве опорных для последующей проверки выполнения норм, предъявляемых к решению задачи навигации.

Эксперимент состоял в размещении макета АНПА в заданных точках координат относительно макета базовой станции с различными углами поворота в горизонтальной плоскости и получение оценок в реальном масштабе времени. Работа в зоне №3 (видимость приемных антенн только одного излучателя) проводилось с переходом из зоны №1.

Результаты. По результатам апробации алгоритма навигации в испытательном бассейне при последовательном перемещении макета АНПА из зоны 1 в зону 3 были построены зависимости СКО координат центра подводного аппарата от высоты и количества принятых периодов излучения сигналов от подводной станции. Все измерения проводились при движении аппарата при максимальном удалении (при нахождении на поверхности) до базовой станции. На рис. 5 представлены зависимости СКО при расположении макета АНПА по центру подводной станции, но разных скоростях перемещения.

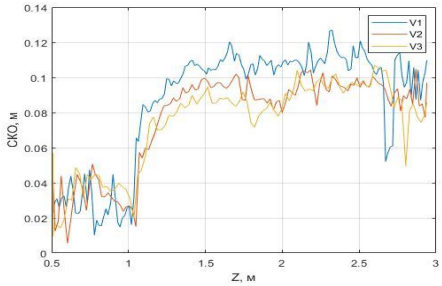

Рис. 5. Зависимость СКО координат от высоты при вертикальном спуске по центру базовой станции при разных скоростях (V1>V2>V3)

На рис. 6 и 7 представлены зависимости СКО координат при разном положении макета АНПА относительно центра подводной базовой станции и при одинаковой скорости (на 100-м такте глубина аппарата не менялась).

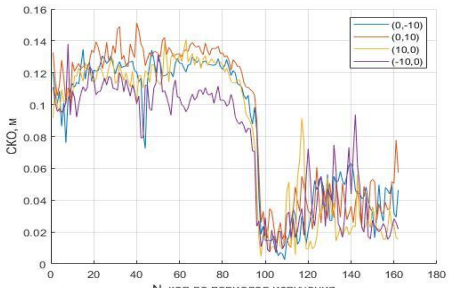

Рис. 6. Зависимость СКО координат от количества периодов излучения сигналов от излучателей при вертикальном спуске с разным расположением макета АНПА относительно геометрического центра станции

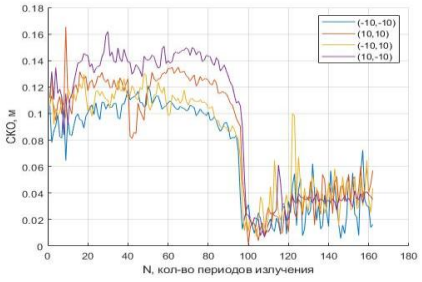

Рис. 7. Зависимость СКО координат от количества периодов излучения сигналов от излучателей при вертикальном спуске с разным расположением АНПА относительно геометрического центра станции

Заключение. Проведена апробация алгоритма позиционирования и определения углов ориентации макета АНПА в испытательном бассейне с использованием подъемно-поворотного устройства при перемещении АНПА относительно макета подводной базовой станции. По результатам работы алгоритма навигации из

зависимостей СКО координат от количества периодов излучения получено, что СКО по осям не более 17 см на всем маршруте движения и уменьшается при сокращении дистанции до макета станции, по курсовому углу СКО не превышает 3°.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ № 22-29-00339.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. и др.* Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – № 2. – С. 5-14.
2. *Liguo Tan, Shenmin Song, Xiaoyan Yang and Jianwen Song.* An overview of marine recovery methods of UAV for small ships // Journal of Harbin institute of technology. – 2019. – 10 (51). – P. 1-10.
3. *Кебкал К.Г., Машошин А.И.* Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. – 2016. – № 3. – С. 115-130.
4. *Матвиенко Ю.В.* Гидроакустический комплекс навигации подводного робота: дис. … канд. тех. наук: 01.04.06. – Владивосток, 2004. – 271 с.
5. *Wang J., Xu T. and Wang Z.* Adaptive robust unscented Kalman filter for AUV acoustic navigation // Sensors. – 2020. – Vol. 20: 60.
6. *Popescu Dan & Ichim Loretta.* Image Recognition in UAV Application Based on Texture Analysis // International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. – 2015. – P. 693-704.
7. *Pinheiro P.M., Neto A.A., Grando R.B. et al.* Trajectory Planning for Hybrid Unmanned Aerial Underwater Vehicles with Smooth Media Transition // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2022. – 104, 46. – https://doi.org/10.1007/s10846-021-01567-z.
8. *Vallicrosa G., Bosch J., Palomeras N., Ridao P., Carreras M., Gracias N.* Autonomous homing and docking for AUVs using Range-Only Localization and Light Beacons // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49. – Issue 23. – P. 54-60. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.321.
9. *Fan S., Liu C., Li B., et al.* AUV docking based on USBL navigation and vision guidance // Journal of Marine Science and Technology. – 2019. – 24. – P. 673-685.
10. *Zhong l., Li D, Lin M., Lin R., Yang C.* A Fast Binocular Localization Method for AUV Docking // Sensors (Basel). – Apr. 2019. – 19 (7). – 1735.
11. *Lin R., Zhang, F., Li, D., Lin, M., Zhou, G., Yang, C.* An Improved Localization Method for the Transition between Autonomous Underwater Vehicle Homing and Docking // Sensors. – 2021. – 21, 2468. – https://doi.org/10.3390/s21072468.
12. *Li Y., Jiang Y., Cao J., Wang B., and Li Y.* AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras // Ocean Engineering. – Dec. 2015. – Vol. 110. – P. 163-173.
13. *Liu S., Ozay M., Okatani T.* Detection and Pose Estimation for Short-Range Vision-Based Underwater Docking // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 2720-2749.
14. *Fujiyoshi Hironobu, Hirakawa Tsubasa, Yamashita Takayoshi.* Deep learning-based image recognition for autonomous driving // IATSS Research. – 2019. – 43.
15. *Степанов Д.Н.* Методы и алгоритмы определения положения и ориентации беспилотного летательного аппарата с применением бортовых видеокамер // Программные продукты и системы. – 2014. – № 1 (105).
16. *Грузликов А.М.* Навигация АНПА в ближнем поле в интересах решения задачи приведения к причальному устройству // Сб. материалов XXIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб., 2022. – С. 138-140.
17. *Караулов В.Г., Грузликов А.М.* Определение маршрута и скорости движения АНПА в задаче приведения к базовой станции // Матер. XXIV КМУ «Навигация и управление движением». – 2022. – С. 26-29.
18. *Кошаев Д.А.* Относительное позиционирование и определение ориентации автономного необитаемого подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Матер. XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. –СПб., 2022. – С. 70-77.
19. *Кошаев Д.А.* Относительное позиционирование и определение ориентации автономного необитаемого подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30, № 4 (119). – С. 122-141.
20. *Вьюгин В.В.* Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. – М., 2013. – 387 с.

21. *Измаилов А.Ф., Куренной А.С., Стецюк П.И.* Метод Левенберга-Марквардта для задачи безусловной оптимизации // Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. – 2019. – Т. 24. № 125. – С. 60-74.
22. *Прохорцов А. В., Минина О. В.* Аналитическое решение навигационной задачи на основе псевдодальномерного метода // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – Вып. 11. – С. 395-398.
23. *Барабанов О. О., Барабанова Л. П.* Математические задачи дальномерной навигации. – М.: Физматлит, 2007.
24. *Деревянкин А.В., Матасов А.И.* О конечном алгоритме определения местоположения объекта по разностям измерений псевдодальностей // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 2. – С. 106-117.

REFERENCES

1. *Inzartsev A.V., Matvienko Yu.V., Rylov N.I. i dr.* Primenenie avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata dlya nauchnykh issledovaniy v Arktike [Application of an autonomous uninhabited underwater vechicle for scientific research int the Arctic], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2007, No. 2, pp. 5-14.
2. *Liguo Tan, Shenmin Song, Xiaoyan Yang and Jianwen Song.* An overview of marine recovery methods of UAV for small ships, *Journal of Harbin institute of technology*, 2019, 10 (51), pp. 1-10.
3. *Kebkal K.G., Mashoshin A.I.* Gidroakusticheskie metody pozitsionirovaniya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Hydroacoustic methods of positioning autonomous uninhabited underwater vechicles], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2016, No. 3, pp. 115-130.
4. *Matvienko Yu.V.* Gidroakusticheskiy kompleks navigatsii podvodnogo robota: dis. … kand. tekh. nauk [Hydroacoustic navigation complex of an underwater robot: cand. of eng. sc. diss.]: 01.04.06. Vladivostok, 2004, 271 p.
5. *Wang J., Xu T. and Wang Z.* Adaptive robust unscented Kalman filter for AUV acoustic navigation, *Sensors*, 2020, Vol. 20: 60.
6. *Popescu Dan & Ichim Loretta.* Image Recognition in UAV Application Based on Texture Analysis // International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. – 2015. – P. 693-704.
7. *Pinheiro P.M., Neto A.A., Grando R.B. et al.* Trajectory Planning for Hybrid Unmanned Aerial Underwater Vehicles with Smooth Media Transition // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2022. – 104, 46. – https://doi.org/10.1007/s10846-021-01567-z.
8. *Vallicrosa G., Bosch J., Palomeras N., Ridao P., Carreras M., Gracias N.* Autonomous homing and docking for AUVs using Range-Only Localization and Light Beacons // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49. – Issue 23. – P. 54-60. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.321.
9. *Fan S., Liu C., Li B., et al.* AUV docking based on USBL navigation and vision guidance, *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 24, pp. 673-685.
10. *Zhong l., Li D, Lin M., Lin R., Yang C.* A Fast Binocular Localization Method for AUV Docking, *Sensors (Basel)*, Apr. 2019, 19 (7), 1735.
11. *Lin R., Zhang, F., Li, D., Lin, M., Zhou, G., Yang, C.* An Improved Localization Method for the Transition between Autonomous Underwater Vehicle Homing and Docking, *Sensors*, 2021, 21, 2468. Available at: https://doi.org/10.3390/s21072468.
12. *Li Y., Jiang Y., Cao J., Wang B., and Li Y.* AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras, *Ocean* Engineering, Dec. 2015, Vol. 110, pp. 163-173.
13. *Liu S., Ozay M., Okatani T.* Detection and Pose Estimation for Short-Range Vision-Based Underwater Docking, IEEE Access, 2019, Vol. 7, pp. 2720-2749.
14. *Fujiyoshi Hironobu, Hirakawa Tsubasa, Yamashita Takayoshi.* Deep learning-based image recognition for autonomous driving, *IATSS Research*, 2019, 43.
15. *Stepanov D.N.* Metody i algoritmy opredeleniya polozheniya i orientatsii bespilotnogo letatel'nogo apparata s primeneniem bortovykh videokamer [Methods and algorithms for determining the position and orientation of an unmanned aerial vehicle using onboard video cameras], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2014, No. 1 (105).
16. *Gruzlikov A.M.* Navigatsiya ANPA v blizhnem pole v interesakh resheniya zadachi privedeniya k prichal'nomu ustroystvu [Navigation of the AUV in the near field in the interests of solving the ghost problem to the mooring device], *Sb. materialov XXIX Sankt-*

Peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam [Collection of materials XXIX St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems]. Saint Petersburg, 2022, pp. 138-140.
17. *Karaulov V.G., Gruzlikov A.M.* Opredelenie marshruta i skorosti dvizheniya ANPA v zadache privedeniya k bazovoy stantsii [Determining the route and speed of AUV movement in the problem of driving to the base station], *Mater. XXIV KMU. «Navigatsiya i upravlenie dvizheniem»* [Collection XXIV KMU Navigation and motion control»], 2022, pp. 26-29.
18. *Koshaev D.A.* Otnositel'noe pozitsionirovanie i opredelenie orientatsii avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata po dannym ot gidroakusticheskikh mayakov [AUV relative position and attitude determination using acoustic beacons], *Mater. XXXIII konferentsii pamyati vydayushchegosya konstruktora giroskopicheskikh priborov N.N. Ostryakova* [Collection XXXIII conference in memory of the outstanding designer of gyroscopic devices N.N. Ostryakov]. Saint Petersburg, 2022, pp. 70-77.
19. *Koshaev D.A.* Otnositel'noe pozitsionirovanie i opredelenie orientatsii avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata po dannym ot gidroakusticheskikh mayakov [AUV relative position and attitude determination using acoustic beacons], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2022, Vol. 30, No. 4 (119), pp. 122-141.
20. *V'yugin V.V.* Matematicheskie osnovy teorii mashinnogo obucheniya i prognozirovaniya [Mathematical foundations of the theory of machine learning and forecasting]. Moscow, 2013, 387 p.
21. *Izmailov A.F., Kurennoy A.S., Stetsyuk P.I.* Metod Levenberga-Markvardta dlya zadachi bezuslovnoy optimizatsii [Levenberg-Marquardt method for the problem of unconditional optimization], *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Tambov University. Series: Natural and Technical sciences], 2019, Vol. 24. No. 125, pp. 60-74.
22. *Prokhortsov A.V., Minina O.V.* Analiticheskoe reshenie navigatsionnoy zadachi na osnove psevdodal'nomernogo metoda [Analitical solution of the navigation problem based on the pseudo-dimensional method], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of TulSU. Technical sciences], 2020, Issue 11, pp. 395-398.
23. *Barabanov O. O., Barabanova L. P.* Matematicheskie zadachi dal'nomernoy navigatsii [Mathematical problems of rangefinder navigation]. Moscow: Fizmatlit, 2007.
24. *Derevyankin A.V., Matasov A.I.* O konechnom algoritme opredeleniya mestopolozheniya ob"ekta po raznostyam izmereniy psevdodal'nostey [On a finite algorithm for determining the location of an object based on the measurement differences of pseudo-distances], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2015, No. 2, pp. 106-117.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.В. Колесов.

Грузликов Александр Михайлович – Государственный научный центр Российской Федерации АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: agruzlikov@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89312664852; к.т.н.; начальник отдела.

Караулов Владислав Германович – e-mail: vladkar0707@gmail.com; тел.: 89214027848; инженер-программист.

Мухин Дмитрий Алексеевич – e-mail: dmitriy.a.mukhin@yandex.ru; тел.: 89218974013; начальник сектора.

Шалаев Никита Александрович – e-mail: castollux@mail.ru; тел.: 89217582505; инженер 1 категории.

Gruzlikov Alexander Mikhailovich – State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor; e-mail: agruzlikov@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79312664852; cand. of eng. sc.; head of the department.

Karaulov Vladislav Germanovich – e-mail: vladkar0707@gmail.com; phone: +79214027848; software engineer.

Mukhin Dmitry Alekseevich – e-mail: dmitriy.a.mukhin@yandex.ru; phone: +79218974013; head of the sector.

Shalaev Nikita Alexandrovich – e-mail: castollux@mail.ru; phone: +79312664852; engineer of the 1st category.