

УДК 629.584

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.46.3.029](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.029)

Концепция системы динамического позиционирования необитаемых подводных аппаратов малого класса на основе визуальной одометрии

А.Р. Алиагаев¹, И.М. Ажмухамедов^{✉1}, Т.В. Хоменко²

¹*Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, Астрахань, Российская Федерация*

²*Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Российская Федерация*

Резюме. Статья посвящена актуальной проблеме подводной робототехники – задаче динамического позиционирования необитаемых подводных аппаратов малого класса. Особое внимание уделено способам навигации необитаемых подводных аппаратов и методам создания системы динамического позиционирования, включающих в себя методы синтеза наблюдателя, регулятора и методы распределения управляющих воздействий на движительно-рулевой комплекс необитаемых подводных аппаратов. Выявлено, что в существующих системах динамического позиционирования для формирования обратной связи по положению и скорости необитаемых подводных аппаратов преимущественно используются дорогостоящие гидроакустические навигационные системы и доплеровские измерители скорости. Не все необитаемые подводные аппараты малого класса бюджетного сегмента оснащаются такими системами, тогда как видеосистемы и инерциальные датчики присутствуют практически в каждом аппарате. С развитием бортовых вычислительных средств становится возможным использовать алгоритмы визуальной одометрии для навигации необитаемых подводных аппаратов по данным с видеосистемы в качестве альтернативы гидроакустической навигации в задаче динамического позиционирования. Предложена концепция архитектуры системы динамического позиционирования необитаемых подводных аппаратов малого класса на основе визуальной одометрии, которая способствует уменьшению стоимости навигационного оборудования и позволяет повысить производительность подводно-технических работ.

Ключевые слова: динамическое позиционирование, необитаемый подводный аппарат, навигационная система, визуальная одометрия, система управления.

Для цитирования: Алиагаев А.Р., Ажмухамедов И.М., Хоменко Т.В. Концепция системы динамического позиционирования необитаемых подводных аппаратов малого класса на основе визуальной одометрии. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1695> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.029

Concept of dynamic positioning system for unmanned small-class underwater vehicles based on visual odometry

A.R. Aliagaev¹, I.M. Azhmukhamedov^{✉1}, T.V. Khomenko²

¹*Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev, Astrakhan, the Russian Federation*

²*Astrakhan State Technical University, the Astrakhan, the Russian Federation*

Abstract. The article is devoted to the actual problem of underwater robotics - the problem of dynamic positioning of unmanned underwater vehicles of small class. Particular attention is paid to the methods of navigation of unmanned underwater vehicles and methods for creating a dynamic positioning system, including methods for the synthesis of an observer, a regulator and methods for distributing control

actions on the propulsion and steering complex of unmanned underwater vehicles. It is revealed that in the existing dynamic positioning systems, expensive hydro acoustic navigation systems and Doppler speed meters are mainly used to generate feedback on the position and speed of unmanned underwater vehicles. Not all unmanned submersibles of the small class of the budget segment are equipped with such systems, while video systems and inertial sensors are present in almost every device. With the development of onboard computing facilities, it becomes possible to use visual odometry algorithms for navigation of unmanned underwater vehicles based on data from a video system as an alternative to hydro acoustic navigation in the task of dynamic positioning. The concept of architecture of the system of dynamic positioning of unmanned underwater vehicles of small class based on visual odometry is proposed, which helps to reduce the cost of navigation equipment and allows to increase the productivity of underwater technical work.

Keywords: dynamic positioning, unmanned underwater vehicle, navigation system, visual odometry, control system.

For citation: Aliagaev A.R., Azhmukhamedov I.M., Khomenko T.V. Concept of dynamic positioning system for unmanned small-class underwater vehicles based on visual odometry. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/journal/pdf?id=1695> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.029 (In Russ.).

Введение

Важным направлением в области создания систем управления (СУ) необитаемыми подводными аппаратами (НПА) является задача динамического позиционирования (ДП). Это режим управления движением НПА, который включает автоматическое удержание заданного положения и ориентации, а также маневрирование на низкой скорости с помощью движительно-рулевого комплекса (ДРК) (Рисунок 1). Режим ДП позволяет выполнять операции вблизи подводных объектов в условиях внешних воздействий со стороны течений и волнений [1].

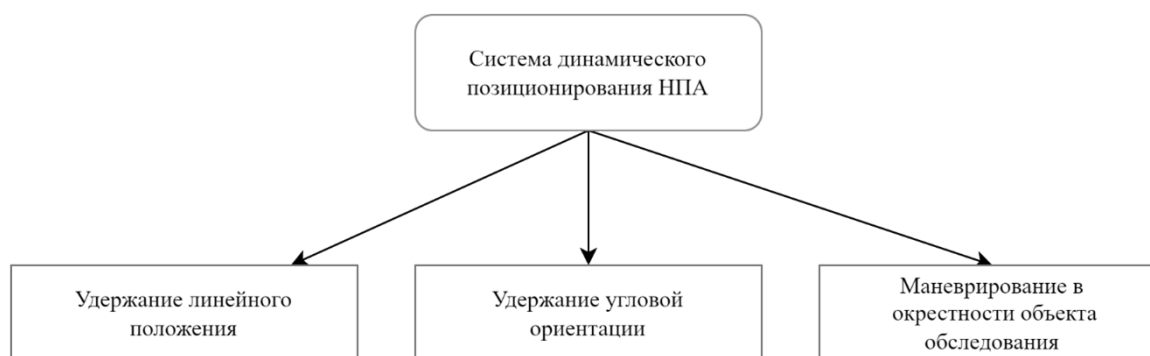


Рисунок 1 – Функции системы ДП
Figure 1 – Functions of the DP system

Существуют НПА двух типов: телеуправляемые НПА – ТНПА, где для управления требуется человек-оператор и автономные НПА – АНПА, способные выполнять миссии автономно, без участия человека. Оба типа НПА выполняют подводные работы, где может потребоваться режим ДП.

Возможность работы НПА в режиме ДП в заданной точке водной среды или над обследуемым объектом необходима для реализации большинства видов подводных работ [2]. Ниже приведены примеры подводных работ, где от НПА требуется работа в режиме ДП:

- проведение поисково-спасательных работ, в которых зачастую для тщательного визуального осмотра необходимо длительное зависание НПА над выбранным объектом;
- поиск и обследование донных объектов с применением гидролокаторов, фото- и видеосъемки с разных ракурсов также проводится при длительном зависании НПА над исследуемым объектом;
- задачи обследования подводных инженерных сооружений, таких как пирсы, опоры мостов, трубопроводы, кабельные коммуникации и т. д., как на глубине, так и на мелководье невозможны без динамического позиционирования НПА в точке или обеспечения движения по заданной траектории в условиях сильных течений;
- проведение бездокового освидетельствования корпусов судов также требует точного позиционирования относительно корпуса судна или фрагментов дефектов корпуса для тщательного визуального осмотра [3];
- мониторинг акваторий промышленных предприятий, где особенно эффективны могут оказаться НПА малого класса в задачах погружения и зависания над объектом в подводном положении [4];
- выполнение манипуляционных операций с помощью НПА, где требуется высокоточное удержание пространственного положения в заданной точке при работе манипулятора [5].

Как видно из приведенного перечня, НПА малого класса используются преимущественно в качестве «подводной камеры», когда необходимо визуально обследовать гидротехническое сооружение, донные объекты, подводную часть судна и т. д. Обычно это бюджетные малогабаритные НПА. Примером может служить аппарат ПРОМЕТЕЙ-1 (Рисунок 2) разработки компании Smelcom Robotics. Это НПА малого класса, задача которого заключается в обследовании гидротехнических сооружений средствами бортовой видеосистемы и дополнительного подвешного оборудования.



Рисунок 2 – НПА малого класса ПРОМЕТЕЙ-1
Figure 2 – Small class UUV PROMETHEUS-1

При проведении осмотра гидротехнических сооружений НПА должен зависать в различных угловых положениях (Рисунок 3), чтобы ориентировать бортовую видеосистему нужным образом.

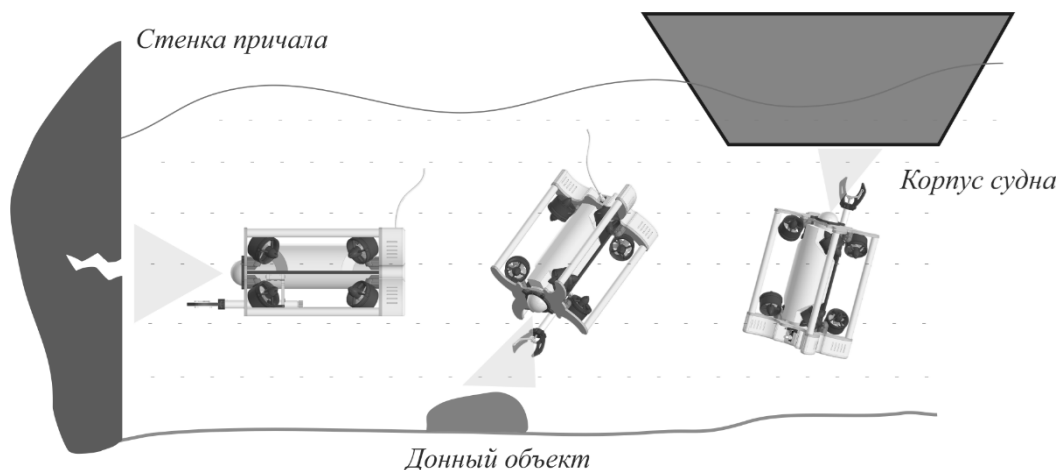


Рисунок 3 – Применение НПА малого класса
Figure 3 – Application of small class UUV

Этап детального визуального осмотра подводного объекта невозможен без стабилизации углового и линейного положения НПА в заданной точке или без возможности обеспечения движения по заданной траектории по отношению к исследуемым объектам [6]. Причем СУ НПА в этом режиме должна исключать перерегулирование (превышение целевого значения) и обеспечивать астатизм (нулевую статическую ошибку) управляемых параметров движения [7].

Во время визуального обследования оператор вынужден длительно удерживать НПА с помощью органов управления для получения качественного видеоизображения с нужного ракурса. Чтобы разгрузить оператора, необходимо применять систему ДП, которая обеспечивает автоматическое удержание аппарата в заданных положении и ориентации при воздействии возмущения подводной среды. Использование системы ДП на ТНПА дает возможность оператору сосредоточиться на мониторинге и планировании операции, что повышает эффективность работы и сокращает время выполнения подводных исследований.

В условиях мелководья применение системы ДП на НПА малого класса становится особенно востребованным, так как переменные течения и волнения вызывают существенные отклонения НПА от заданного положения [8]. Поэтому использование НПА при проведении, например, визуальной дефектоскопии, поисково-спасательных работ – сложная задача для оператора НПА [9]. Сложность заключается в необходимости постоянного контроля за перемещением НПА для своевременной компенсации смещения под действием среды. Кроме того, нестабильность подводной среды оказывает существенное воздействие именно на НПА малого класса, чья малая инерционность недостаточна для сглаживания волнений жидкости. В таких обстоятельствах ручное позиционирование НПА становится практически невозможным, поэтому возникает потребность в создании системы ДП для НПА малого класса.

НПА как объект управления является сложным и нелинейным с изменяющимися по времени гидродинамическими параметрами. В этих условиях, для обеспечения стабильного и точного ДП, требуется использование продвинутых методов управления, которые позволяют адаптироваться и быть робастными к изменениям параметров объекта управления и возмущениям внешней среды. Методы создания систем ДП освещены в различных исследованиях [8, 10–19]. В вопросе определения собственного положения, ориентации и скорости движения НПА для отслеживания отклонения НПА от заданной точки существующие исследования объединяет предположение, что положение и скорости достоверно известны или доступны для измерений

гидроакустическими навигационными системами (ГАНС) и доплеровскими измерителями скоростей (DVL). Эти гидроакустические системы получили наибольшее распространение для измерения положения и скорости НПА, однако высокая стоимость ГАНС и DVL зачастую делает их применение нецелесообразным для бюджетных НПА малого класса.

С развитием вычислительных средств и оптических систем, стали получать распространение методы визуальной одометрии (VO) для навигации НПА [6, 20–23], не требующие внешних гидроакустических систем навигации.

Таким образом, становится возможным использование штатной видеосистемы НПА малого класса для отслеживания собственного положения в режиме ДП. Исходя из этого, в данной работе предлагается архитектура системы ДП НПА, которая основана на использовании средств визуальной одометрии.

Постановка задачи

Целью работы является разработка концепции архитектуры системы ДП на основе методов визуальной одометрии для НПА малого класса, которая позволит отказаться от использования традиционных гидроакустических средств навигации и снизить стоимость навигационного оборудования.

Структура системы ДП НПА

Решение задачи ДП для НПА малого класса требует комплексного подхода, который должен учитывать область применения, особенности динамики НПА, условия окружающей среды и наличие навигационного оборудования. Ниже приведена общая структура системы ДП НПА (Рисунок 4). Она включает три основных блока:

1. **Наблюдатель (Observer)**. Выполняет оценку вектора состояния системы по неполным или зашумленным измерениям. Состояние НПА включает кинематические параметры движения – положение, ориентацию и скорость. Оценка состояния осуществляется путем комплексирования измерений бортовых навигационных датчиков, внешних навигационных систем и оптических систем, которые составляют *интегрированную навигационную систему НПА*.

2. **Регулятор (Controller)**. Закон управления, стабилизирующий НПА в заданной угловой ориентации и линейном положении в условиях воздействия возмущений подводной среды – течений и волн.

3. **Распределитель управляющих воздействий на ДРК (Thrust allocator)**. Алгоритм оптимального распределения тяг на отдельные движители ДРК по запрашиваемому от регулятора управляющему сигналу [24]. Эта проблема возникает в избыточных ДРК, где количество движителей больше, чем необходимо для обеспечения движения НПА по всем степеням свободы.

Создание системы ДП заключается в синтезе указанных блоков. В настоящее время распространены различные методы синтеза наблюдателя, регулятора и распределителя управляющих воздействий на ДРК. На Рисунке 4 кратко отражены основные используемые подходы и методы при создании системы ДП для НПА. Далее они будут освещены подробнее.

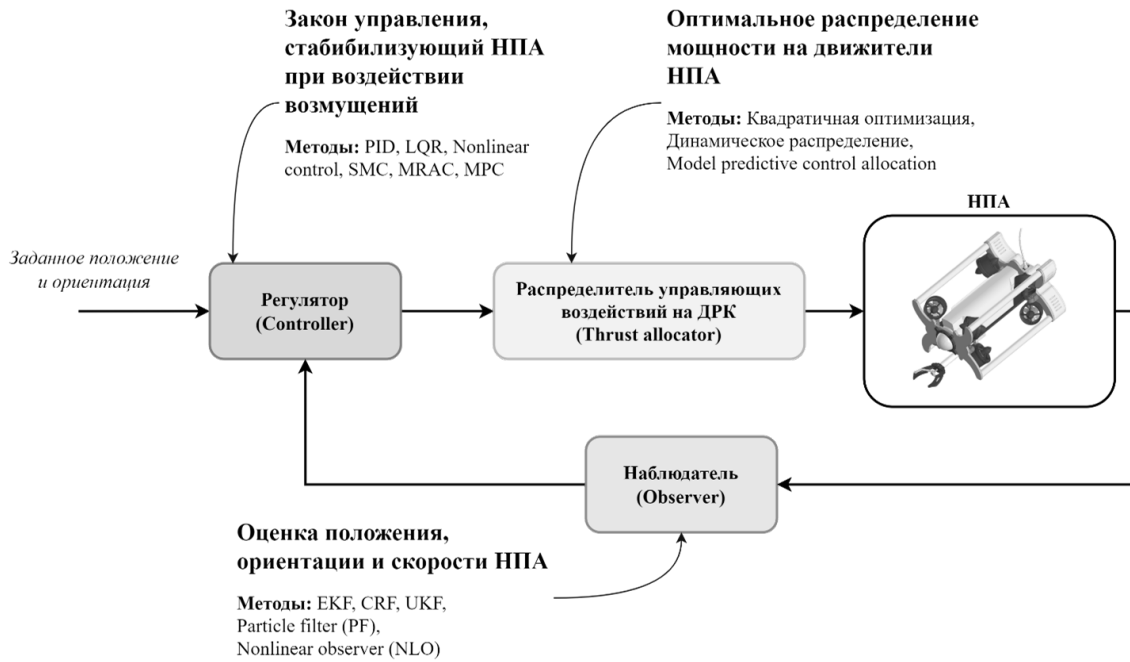


Рисунок 4 – Структура системы ДП НПА
Figure 4 – Structure of the DP UUV system

Математическая модель НПА

Прежде чем перейти к описанию методов ДП НПА, рассмотрим математическую модель НПА для выделения наиболее значимых ее параметров.

Динамика движения НПА в вязкой среде описывается матричным динамическим уравнением [25]:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + \tau_{wave}, \quad (1)$$

где $M \in R^{6 \times 6}$ – матрица инерции; $C(v) \in R^{6 \times 6}$ – матрица центробежных и кориолисовых сил и моментов; $D(v) \in R^{6 \times 6}$ – матрица гидродинамических сил и моментов; $g(\eta) \in R^6$ – вектор гидростатических сил и моментов; $\eta = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$ – вектор положения и ориентации НПА в абсолютной системе координат (СК); $v = [v_x \ v_y \ v_z \ p \ q \ r]^T$ – вектор линейных и угловых скоростей НПА в связанной СК; $\tau = [X \ Y \ Z \ K \ M \ N]^T$ – вектор суммарных сил и моментов, развиваемых ДРК, в связанной СК; $\tau_{wave} \in R^6$ – вектор возмущений со стороны подводной среды (течения и волны).

Уравнение кинематики, устанавливающей связь между проекциями линейной и угловой скоростей НПА на оси абсолютной и связанной систем координат, задается матричным уравнением [25]:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (2)$$

где $J(\eta) \in R^{6 \times 6}$ – матрица преобразования координат между абсолютной и связанной систем координат.

Таким образом, НПА описывается системой шести нелинейных дифференциальных уравнений динамики с перекрестными связями (1), и системой шести кинематических уравнений (2).

Параметры НПА в динамическом уравнении (1) в общем случае точно неизвестны из-за сложности их оценки и могут испытывать вариации вследствие изменения массогабаритных характеристик при установке дополнительного оборудования на

корпус НПА в процессе эксплуатации. Учитывая, что в (1) параметры входят линейно, динамику движения НПА можно записать в виде [10]:

$$[M + \Delta M]\dot{v} + [C(v) + \Delta C(v)]v + [D(v) + \Delta D(v)]v + [g(\eta) + \Delta g(\eta)] = \tau + \tau_{wave}, \quad (3)$$

где матрицы ΔM , $\Delta C(v)$, $\Delta D(v)$ и вектор $\Delta g(\eta)$ возникают вследствие вариации параметров НПА.

Скорости движения НПА в режиме ДП малы или близки к нулю, поэтому матрицей центробежных и кориолисовых сил и моментов $C(v)$ можно пренебречь, упростив тем самым динамическое уравнение (1):

$$M\dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau + \tau_{wave}. \quad (4)$$

Управление НПА осуществляется через вектор суммарных сил и моментов ДРК τ . То есть, на своем выходе регулятор должен сформировать вектор из 6 компонент – 3 компоненты X, Y, Z вектора тяги для линейного перемещения и 3 компоненты K, M, N вектора вращательного момента для управления угловым перемещением. Вектор возмущений подводной среды τ_{wave} в правой части (1) и (3) в общем случае неизвестен и подлежит оценке для компенсации его негативного влияния на точность ДП. Параметры $M, C(v)$ и $D(v)$ могут быть известны номинально, но их точное определение – трудоемкая задача, поэтому в общем случае их можно считать изменяющимися или неопределенными как в (3). Скорости v и координаты η являются кинематическими параметрами движения НПА, которые могут быть измерены или оценены по косвенным измерениям.

Интегрированная навигационная система НПА

Оценка кинематических параметров движения НПА для формирования сигнала обратной связи может осуществляться на основе данных датчиков бортовой автономной навигационной системы (БАНС), визуальной одометрии (VO) и внешних навигационных систем [2] (Рисунок 5).

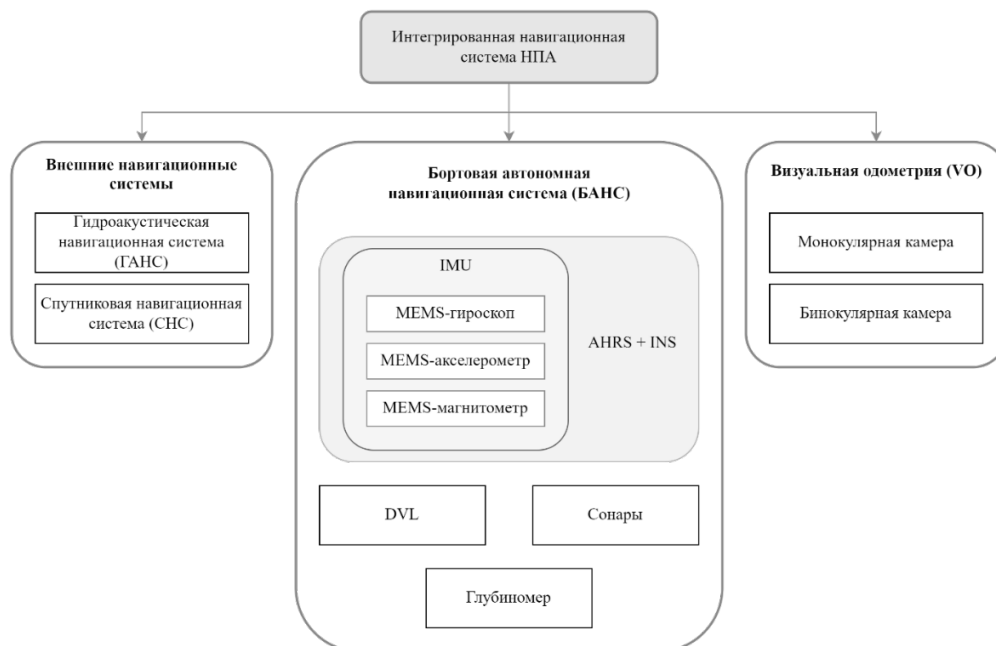


Рисунок 5 – Состав типовой интегрированной навигационной системы
Figure 5 – Composition of a typical integrated navigation system

Внешние навигационные системы

В состав внешней навигационной системы входят ГАНС и спутниковая навигационная система (СНС). Определение собственного местоположения НПА с помощью внешних навигационных систем позволяет вывести НПА на объект исследования и провести детальный осмотр с помощью гидролокационного оборудования, видеокамер и фотосистем [26]. Работа ГАНС основана на методах триангуляции и трилатерации. В состав оборудования ГАНС входят приемопередающие антенны и маяки-ответчики. По взаимному расположению приемопередающих антенн различают ультракороткобазисные, короткобазисные и длиннобазисные системы.

Использование СНС возможно только при полном или частичном всплытии НПА на поверхность. Применение ГАНС может быть ограничено низкой точностью позиционирования из-за непостоянства скорости звука и многолучевого отражения от границ раздела жидкости и близлежащих подводных объектов.

Бортовая автономная навигационная система

Для решения задачи подводной навигации НПА традиционно применяют бортовые системы счисления пути на базе бесплатформенных инерциальных навигационных систем (INS) и систем ориентации (AHRS) [27]. Такие системы строятся на основе инерциальных измерительных блоков (IMU), состоящих из микроэлектромеханических (MEMS) гироскопов и акселерометров, и магнитометров. Оценка местоположения НПА средствами бортовых INS и AHRS подвержена накоплению ошибок счисления пути, поэтому необходимо производить коррекцию положения внешними навигационными системами, данные от которых комплексируются с данными бортовых систем счисления пути для точной оценки местоположения [27, 28]. Для измерения глубины погружения используются глубиномеры на базе датчиков давления. Также распространено применение доплеровского измерителя скорости (DVL) в составе БАНС, который измеряет скорость движения НПА относительно дна [28].

Применение DVL ограничено его погрешностью измерений (несколько мм/с), что дает нарастающую со временем ошибку счисления движения. Измерения DVL можно использовать в выработке управляющих воздействий для компенсации динамики НПА.

Визуальная одометрия НПА

Существует способы навигации НПА по данным с бортовой видеосистемы, основанные на визуальной одометрии (VO – visual odometry) [6, 20, 21] и алгоритмах визуального совместного картографирования и позиционирования V-SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [22, 23, 29]. Алгоритмы VO и V-SLAM отслеживают характерные точки на непрерывных изображениях, снятых монокулярной или бинокулярной (стерео) камерой. По движению отслеживаемых характерных точек определяется положение камеры, и, соответственно, местоположение НПА. Поэтому задача удержания НПА над исследуемым объектом требует наличия визуальных ориентиров. Тогда последовательность цифровых изображений исследуемого объекта и его окружения, получаемая с бортовой видеосистемы, может служить исходной информацией для определения смещения НПА [6].

Как правило, для повышения точности оценки положения НПА в системах VO данные с бортовых камер дополняют данными, полученными от других датчиков. Имеются достаточно точные методы определения местоположения НПА в подводной

среде, использующие недорогие монокулярные камеры совместно с IMU [30] и подводным сонаром [31].

Существуют системы VO и V-SLAM на основе геометрических методов и методов глубокого обучения. В работе [32] сравниваются результаты, полученные при применении этих подходов в подводной среде на примере алгоритмов ORB-SLAM3 [33] и DF-VO [34].

Подход, основанный на глубоком обучении, дает надежные результаты в среде со слабо выраженной текстурой (малозаметные очертания подводных объектов) и динамичном движении, но требует больше вычислительных ресурсов по сравнению с геометрическим подходом в ORB-SLAM3. Последний дает хорошую точность определения положения в условиях низкой освещенности и мутности воды.

Методы VO и V-SLAM хорошо работают в подводной среде при достаточном освещении и выраженных текстурах подводных объектов [29]. Напротив, ослабление света, повышение мутности и появление большой концентрации взвешенных частиц могут ухудшить качество видеозображения и, как следствие, работу алгоритмов V-SLAM [22]. Главным преимуществом визуальных средств навигации является низкая стоимость оборудования и датчиков, необходимых для оценки местоположения.

Методы оценки вектора состояния НПА

Задача комплекса датчиков интегрированной навигационной системы получить достаточное число измерений, которые позволяют прямо или косвенно оценить кинематические параметры движения НПА – положение, скорость и ускорение, которые составляют вектор состояния системы. Для оценки вектора состояния системы синтезируется наблюдатель (observer), который восстанавливает вектор состояний по неполным и зашумленным измерениям. Алгоритм работы наблюдателя базируется на фильтрах комплексирования (или слияния – fusion) измерений от нескольких источников в составе интегрированной навигационной системы НПА. Методы синтеза алгоритмов для оценки состояния преимущественно основаны на нелинейном наблюдателе (NLO) и расширенном фильтре Калмана (ЕКФ) [35, 36]. Эти методы дают более точную оценку положения и скорости, нежели их прямое измерение с помощью ГАНС и DVL. Точность повышается, так как в оценке используется помимо комбинации датчиков, прогнозирование на основе динамической модели движения НПА (1). Существуют также нелинейные расширения фильтров Калмана для оценки нелинейных систем, такие как Cubature Kalman Filter (СКФ) и Unscented Kalman filter (UKF) [37].

Для работы фильтров Калмана и его расширений ошибки измерений датчиков интегрированной навигационной системы описывают нормальным (гауссовским) распределением. Также требуется точная информация о модели для этапа прогнозирования оценки (за исключением СКФ) [37].

В случае негауссовского шума и нелинейных систем перспективными являются иные подходы, основанные, например, на фильтре частиц (particle filter – PF) [38] и методах машинного обучения (data-driven methods) [37]. Также существуют гибридные реализации фильтров, где недостаточная производительность стандартных методов оценки компенсируется методами машинного обучения.

Методы динамического позиционирования НПА

В системе ДП управление движением НПА сводится к стабилизации заданного положения и ориентации η_d . При этом НПА остается неподвижным, то есть заданные линейные и угловые скорости v_d малы или равны нулю.

Процесс стабилизации заданного положения включает два этапа:

- 1) определение отклонения от заданной точки зависания над объектом;
- 2) формирование сигнала управления τ (1) на ДРК для устранения отклонения и компенсации возмущений, вызванных τ_{wave} .

Способы определения отклонения во многом определяются составом интегрированной навигационной системы и методом синтеза наблюдателя системы ДП.

В работе [8] рассматривается задача стабилизации НПА в режиме ДП в заданном положении при нулевом заданном векторе скоростей. Синтез оптимального нелинейного закона управления основан на добавлении дополнительного слагаемого, обеспечивающего экономичный режим работы ДРК и астатизм системы управления при действии постоянных возмущений от подводных течений.

В предложенную автором систему ДП включен асимптотический наблюдатель, который восстанавливает скорости НПА, а также фильтр-компенсатор волнений на мелководье. Фильтр проектируется для некоторого диапазона доминирующих частот волнового спектра возмущений. Для работы наблюдателя считается доступной информация о координатах НПА.

В исследовании [11] приводится описание завершённой и испытанной системы ДП для малогабаритного НПА Minerva. Архитектура системы ДП представлена наблюдателем на основе ЕКФ для оптимальной оценки скоростей, координат и курса на основе информации с ГАНС, DVL и компаса. В качестве контроллера системы ДП сравниваются пропорциональный-интегральный-дифференциальный регулятор (PID), линейно-квадратичный (LQ) и скользящий регулятор (SMC). Результаты исследования показали малую погрешность оценки положения и курса при включении всех используемых сенсоров. Но при недоступной информации с ГАНС точность оценки положения и точность ДП сильно ухудшалась. Следовательно, для точной работы системы ДП необходимы средства измерения линейного перемещения. Также следует отметить, что в [11] при синтезе закона управления не учитывались возможные вариации гидродинамических параметров модели НПА.

Параметрическая неопределённость динамической модели НПА (3) возникает, с одной стороны, из-за сложности точного определения гидродинамических параметров, с другой – вследствие изменения массогабаритных характеристик НПА, если он используется как грузовой аппарат или несущая платформа для подвесного измерительного оборудования. В работе [10] предложена двухконтурная СУ пространственным движением грузового НПА. Разделение СУ на контур управления скорости и контур управления положением позволяет упростить учёт динамических свойств НПА. Контур скорости синтезируется с учётом влияния переменных и неизвестных параметров модели НПА как комбинация нелинейного регулятора и разрывного закона управления (система переменной структуры – СПС). Результаты моделирования показали лучшую сходимость к желаемому положению в пространстве при изменении параметров НПА по сравнению с традиционными методами управления на основе PID-регуляторов.

Такой же подход был применён в [12], где дополнительно в СУ включена система аккомодации к дефектам ДРК, которая выполняет функции обнаружения и локализации дефекта с последующей его компенсацией. Таким образом обеспечиваются желаемые динамические свойства СУ в широких пределах изменения гидродинамических параметров модели.

В [13] также предложена система ДП в условиях параметрической неопределённости модели НПА, для которой достаточно только приемлемой оценки матрицы инерции в уравнении динамики (1). Система ДП включает наблюдателя

расширенного состояния (ESO) и робастный контроллер скользящего режима (SMC). Наблюдатель используется для оценки скоростей НПА и неизвестной динамики. Робастный закон управления SMC обеспечивает приемлемую точность работы системы ДП в условиях параметрической неопределенности модели.

Система ДП НПА на мелководье и в околоповерхностных зонах подвержена сильному возмущению со стороны волны. Разработка систем ДП в условиях мелководья предложена в работах [8, 14, 15]. В [14] СУ включает в себя нелинейный наблюдатель для оценки неизмеримых скоростей волн на основе модели динамики НПА на мелководье, которая получена как суперпозиция низкочастотного движения НПА и высокочастотного волнового движения воды. Волновое возмущение моделируется в виде волновой модели второго порядка. В целом, предложенная стратегия системы ДП демонстрирует хорошую эффективность и высокую точность оценки волнового возмущения.

Основной сложностью синтеза СУ НПА является нелинейность НПА как объекта управления, наличие перекрестных связей между степенями свободы и параметрическая неопределенность. Использование традиционных линейных регуляторов (PID, LQR) не позволяет компенсировать негативные эффекты динамики НПА. Поэтому распространение получают более сложные нелинейные, адаптивные и робастные регуляторы, в том числе построенные на основе нейронных сетей и нечеткой логики [16, 17, 19].

В исследовании [16] авторами предлагается двухконтурная иерархическая модель системы ДП, включающая динамический контур скорости и кинематический контур положения. Последний синтезирован на основе нелинейной модели прогнозирующего управления NMPC (Nonlinear model predictive control). Динамический контроллер скорости НПА выполнен на базе NN-MRAC (Neural network model reference adaptive control) – нейросетевого адаптивного управления с эталонной моделью. Как показывают результаты моделирования, NN-MRAC адаптируется к неопределенностям модели и внешним возмущениям, а в свою очередь NMPC обеспечивает оптимальное управление с учетом ограничений на энергию и скорость, а также доступности измерений положения с помощью ГАНС.

Методы распределения управляющих воздействий на ДРК

Необходимость в решении задачи оптимального распределения управляющих воздействий между движителями ДРК (thrust allocation) возникает естественным образом для избыточного (over-actuated) ДРК [24]. Векторное расположение 8-ми движителей, как например, на НПА ПРОМЕТЕЙ-1 и других подобных по конструкции НПА, является избыточным. Так, для обеспечения движения по всем степеням свободы достаточно 6-ти движителей. Использование избыточного ДРК мотивировано тем, что он обеспечивает отказоустойчивость и пониженное энергопотребление. В обзоре [24] приведены несколько методов решения задачи распределения для стационарного ДРК: квадратичная оптимизация, динамическое распределение, в том числе на базе модели прогнозирующего управления (Model predictive control allocation). Всех их объединяет стремление оптимизировать заданный функционал (например, энергию) при наложенных ограничениях на движители (максимальная и минимальная тяга, насыщение и т. д.). Также может учитываться динамическая модель движителей (метод динамического распределения). В рассмотренной выше работе [13] задача распределения управления на движители решается с учетом сразу нескольких факторов: минимум потребляемой энергии, минимум ошибки воспроизведения сигнала управления и удержания определенных движителей в заданных рабочих диапазонах.

Концепция архитектуры системы ДП для НПА малого класса

На основе исследований в области создания систем ДП НПА можно выделить следующие ключевые особенности управления НПА:

- НПА представляет собой сложный нелинейный объект управления с перекрестными связями между степенями свободы.

- Синтез регулятора системы ДП неразрывно связан с синтезом наблюдателя для оценки положения и скорости НПА. Наблюдателю необходимо объединять измерения от различных источников для точной результирующей оценки положения и скорости НПА.

- Как правило, система ДП иерархична и состоит из вложенного контура управления скоростью и внешнего контура управления положением НПА. Контур скорости компенсирует динамику НПА, тогда как контур положения следит за отклонением от заданного положения.

- В составе интегрированной навигационной системы должен быть достаточный набор навигационных сенсоров и систем для достоверной оценки ориентации, положения и скорости. В основном используются ГАНС, DVL и инерциальные датчики.

- Возможно применение визуальной навигации вблизи наблюдаемых объектов средствами бортовой видеосистемы на основе VO и V-SLAM.

- Работа НПА на мелководье сопряжена с действием сильных волновых возмущений. В этом случае в систему ДП необходимо добавлять компоненты оценки и компенсации волновых возмущений.

- Неопределенные гидродинамические параметры и изменения массогабаритных характеристик приводят к параметрической неопределенности динамической модели НПА. В этом случае закон управления следует синтезировать методами робастного и адаптивного управления.

- Применение избыточного ДРК позволяет повысить маневренность и отказоустойчивость, но при этом необходимо решать оптимизационную задачу распределения тяг между движителями ДРК.

Наличие средств измерения положения, ориентации и скорости НПА во многом определяет способность работы НПА в режиме ДП. На сегодняшний день де-факто стандартом является наличие в составе интегрированной навигационной системы НПА гидроакустических средств навигации – ГАНС и DVL. На рынке такие системы имеют высокую стоимость, сопоставимую с себестоимостью НПА малого класса. При этом каждый НПА, как правило, оснащены бортовой видеосистемой и дешевыми датчиками IMU. С развитием микропроцессорных вычислительных систем их производительность растет, а габариты уменьшаются, что позволяет встраивать их в аппаратное обеспечение НПА. Таким образом возникает возможность применения вычислительно сложных методов визуальной навигации VO и V-SLAM как альтернативы ГАНС и DVL.

Предлагается следующая концепция архитектуры системы ДП НПА малого класса (Рисунок 6). Интегрированная навигационная система формирует обратную связь по скорости и положению НПА на основе данных с системы визуальной одометрии VO / V-SLAM, измерений инерциального блока IMU и глубиномера.



Рисунок 6 – Концепция архитектуры системы ДП НПА малого класса
Figure 6 – Concept of the architecture of the small-class DP UUV system

Данные и измерения поступают на наблюдатель навигационной системы. На основе этой косвенной информации в нем происходит восстановление вектора состояния НПА (кинематических параметров движения) – скорости и положения относительно исследуемого подводного объекта. Наблюдатель может быть сконструирован на основе, например, расширенного фильтра Калмана ЕКФ. Тогда он будет давать оптимальную оценку вектора состояния НПА, объединяя косвенные измерения и прогноз на основе линеаризованной динамической модели НПА.

Инерциальный блок IMU состоит из распространенных и дешевых MEMS сенсоров акселерометра, гироскопа и магнитометра. Измерения с IMU дают представление об угловой ориентации НПА, а также используются в алгоритмах VO / V-SLAM для оценки глубины изображения. Связка сенсоров IMU требует проведения калибровки для устранения систематической погрешности MEMS-сенсоров. Для этого в интегрированную навигационную систему вводится блок калибровки MEMS IMU. Включает в себя оценку искажения измерений MEMS сенсоров. Калибровка может совершаться как перед использованием НПА, так и в процессе функционирования.

Глубиномер представляет собой датчик абсолютного давления, которое функционально связано с глубиной погружения.

Бортовая видеосистема, IMU и глубиномер имеются в составе практически любого НПА малого класса, поэтому данная концепция архитектуры системы ДП может быть применена к широкому кругу НПА.

Модель системы ДП двухконтурная иерархическая как в [10, 16]. Это позволит упростить синтез контуров управления, так как регулятор скорости и регулятор положения синтезируются раздельно. Регуляторы предлагается синтезировать методами робастного и адаптивного управления, так эти методы обеспечивают устойчивость системы ДП и адаптацию к неопределенностям гидродинамических параметров НПА и возмущениям со стороны волн и течений на мелководье.

Блок «Распределитель управляющих воздействий на ДРК» выполняет функцию преобразования запрошенного со стороны регулятора скорости управляющего вектора

сил и моментов в величины тяг двигателей ДРК. Его структура зависит от кинематической схемы НПА и методов преобразования. Для НПА с избыточным ДРК целесообразно применять методы оптимального распределения [24].

Заключение

В работе предложена концепция архитектуры системы ДП НПА малого класса на основе визуальной одометрии. Применение предложенной архитектуры позволит отказаться от использования дорогостоящего акустического навигационного оборудования и удешевить тем самым аппаратные реализации систем ДП для бюджетных НПА малого класса, сохранив при этом требования к точности работы в условиях меняющихся гидродинамических параметров НПА и возмущений, вызванных волнами и течениями на мелководье.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Cui W., Fu S., Hu Z. *Encyclopedia of Ocean Engineering*. Singapore: Springer; 2022. 2177 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-6946-8>
2. 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: Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук; 2018. 368 с.
Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. *Underwater robotics: systems, technologies, application*. Vladivostok: Institute of Marine Technologies Problems Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences; 2018. 368 p. (In Russ.).
3. Гладкова О.И., Вельтищев В.В., Егоров С.А. Концепция информационно-управляющей системы телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с комбинированными средствами движения для бездокового освидетельствования корпусов судов. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2020;(3):55–63. <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2020-3-55-63>
Gladkova O.I., Veltischev V.V., Egorov S.A. The concept of an information control system of a remotely operated vehicle with combined propulsion system for vessels inspection without dry-docking. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2020;(3):55–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2020-3-55-63>
4. Ефимов С.В., Князев С.И., Яцун С.Ф. Изучение управляемого движения малогабаритного подводного комплекса-анализатора загрязнений акватории. *Cloud of Science*. 2020;7(3):488–497.
Efimov S.V., Knyazev S.I., Jatsun S.F. Investigation of Controlled Movement of the Small-Size Underwater Vehicle for Water Pollution Analyse. *Cloud of science*. 2020;7(3):488–497. (In Russ.).
5. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017;18(8):543–549. <https://doi.org/10.17587/mau.18.543-549>
Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu. A System for an Automatic Implementation of the Manipulative Operations by Means of the Underwater Robots.

- Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*. 2017;18(8):543–549. (In Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.18.543-549>
6. Костенко В.В., Павин А.М. Автоматическое позиционирование необитаемого подводного аппарата над объектами морского дна с использованием фотоизображений. *Подводные исследования и робототехника*. 2014;(1):39–47. Kostenko V.V., Pavin A.M. Automatic stabilization of unmanned underwater vehicles over the seabed objects on the base of photo images. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika* = *Underwater Investigations and Robotics*. 2014;(1):39–47. (In Russ.).
 7. Данцевич И.М., Тарасенко А.А. Полуавтоматическое управление телеуправляемыми подводными аппаратами в задачах обследования подводных трубопроводов. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2012;(12):42–47. Dantsevich I.M., Tarasenko A.A. Semi-automatic control of remote-operated submersible devices while monitoring subsea pipelines. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti* = *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry*. 2012;(12):42–47. (In Russ.).
 8. Литвишко И.Р. Динамическое позиционирование автономного необитаемого подводного аппарата в мелководной зоне при воздействии внешних возмущений. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2022;18(1):72–82. <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.72-82> Litvishko I.R. Dynamic Positioning of Autonomous Underwater Vehicle in Shallow Water under the Influence of External Disturbances. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovanie* = *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022;18(1):72–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.72-82>
 9. Костенко В.В., Ляхов Д.Г., Мокеева И.Г. К вопросу оценки эффективности использования телеуправляемых подводных аппаратов обследовательского класса. *Технические проблемы освоения Мирового океана*. 2011;4:97–104. Kostenko V.V., Lyakhov D.G., Mokeeva I.G. K voprosu otsenki effektivnosti ispol'zovaniya teleupravlyaemykh podvodnykh apparatov obsledovatel'skogo klassa. *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana*. 2011;4:97–104. (In Russ.).
 10. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Двухконтурная система с эталонной моделью для управления пространственным движением грузового необитаемого подводного аппарата. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021;22(3):134–144. <https://doi.org/10.17587/mau.22.134-144> Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Two-Loop System with Reference Model for Control of Spatial Movement of Cargo Underwater Vehicle. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*. 2021;22(3):134–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.22.134-144>
 11. Dukan F., Ludvigsen M., Sørensen A.J. Dynamic positioning system for a small size ROV with experimental results. In: *OCEANS 2011 IEEE – Spain, 06–09 June 2011, Santander, Spain*. IEEE; 2011. pp. 1–10. <https://doi.org/10.1109/Oceans-Spain.2011.6003399>
 12. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Зуев А.В., Жирабок А.Н. Разработка системы управления пространственным движением автономных необитаемых подводных аппаратов с аккомодацией к дефектам в их движителях. *Робототехника и техническая кибернетика*. 2021;9(4):280–288. <https://doi.org/10.31776/RTCJ.9405> Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Zuev A.V., Zhirabok A.N. The development of AUV control system with accommodation to thruster faults. *Robototekhnika i tekhnicheskaya*

- kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*. 2021;9(4):280–288. (In Russ.). <https://doi.org/10.31776/RTCJ.9405>
13. Hosseinnajad A., Loueipour M. Design of a Robust Observer-based DP Control System for an ROV with Unknown Dynamics Including Thruster Allocation. In: *2021 7th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), 23–24 February 2021, Tabriz, Iran*. IEEE; 2021. pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCIA52082.2021.9403543>
 14. Liu S., Wang D., Poh E.K. Dynamic positioning of AUVs in shallow water environment: observer and controller design. In: *2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Proceedings, 24–28 July 2005, Monterey, USA*. IEEE; 2005. pp. 705–710. <https://doi.org/10.1109/AIM.2005.1511065>
 15. Liu S., Wang D., Poh E.K. Output feedback control design for station keeping of AUVs under shallow water wave disturbances. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2009;19(13):1447–1470. <https://doi.org/10.1002/rnc.1387>
 16. Gao J., Liu Ch., Proctor A. Nonlinear model predictive dynamic positioning control of an underwater vehicle with an onboard USBL system. *Journal of Marine Science and Technology*. 2016;21(1):57–69. <https://doi.org/10.1007/s00773-015-0332-3>
 17. Gao J., Wu P., Li T., Proctor A. Optimization-based model reference adaptive control for dynamic positioning of a fully actuated underwater vehicle. *Nonlinear Dynamics*. 2017;87(4):2611–2623. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-3214-2>
 18. Ohrem S.J., Amundsen H.B., Caharija W., Holden C. Robust adaptive backstepping DP control of ROVs. *Control Engineering Practice*. 2022;127. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105282>
 19. Cao Y., Li B., Li Q., Stokes A.A., Ingram D.M., Kiprakis A. A Nonlinear Model Predictive Controller for Remotely Operated Underwater Vehicles With Disturbance Rejection. *IEEE Access*. 2020;8:158622–158634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020530>
 20. Бобков В.А., Машенцев В.Ю. Навигация подводного робота по стереоизображениям. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016;17(2):101–109. <https://doi.org/10.17587/mau.17.101-109>
Bobkov V.A., Mashentsev V.Yu. Navigation of an Underwater Robot by Stereo Images. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2016;17(2):101–109. (In Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.17.101-109>
 21. Ferrera M., Moras J., Trouvé-Peloux P., Creuze V. Real-Time Monocular Visual Odometry for Turbid and Dynamic Underwater Environments. *Sensors*. 2019;19(3). <https://doi.org/10.3390/s19030687>
 22. Zhang S., Zhao S., An D., Liu J., Wang H., Feng Y., Daoliang L., Zhao R. Visual SLAM for underwater vehicles: A survey. *Computer Science Review*. 2022;46. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2022.100510>
 23. Wang X., Fan X., Shi P., Ni J., Zhou Z. An Overview of Key SLAM Technologies for Underwater Scenes. *Remote Sensing*. 2023;15(10). <https://doi.org/10.3390/rs15102496>
 24. 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):4–17. https://doi.org/10.37102/1992-4429_2021_35_01_01
Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu. Control allocation approaches for over-actuated underwater vehicles: a brief review. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Investigations and Robotics*. 2021;(1):4–17. (In Russ.). https://doi.org/10.37102/1992-4429_2021_35_01_01

25. Fossen T.I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.; 2011. 600 p.
26. Борейко А.А., Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Михайлов Д.Н., Павин А.М. Навигационное и алгоритмическое обеспечение комплекса АНПА-ТНПА при решении задач мониторинга донной поверхности. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2014;(3):112–127.
Boreiko A.A., Vaulin Yu.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Mikhailov D.N., Pavin A.M. Navigation and algorithmic support AUV-ROV complex in solving problems monitoring bottom surface. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2014;(3):112–127. (In Russ.).
27. Вавилова Н.Б., Парусников Н.А., Субханкулова Г.А. Навигация автономного подводного аппарата при помощи корректируемой бескарданной инерциальной навигационной системы. *Труды МАИ*. 2016;(89). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27174462_51258828.pdf
Vavilova N.B., Parusnikov N.A., Subkhankulova G.A. The navigation algorithm of the underwater vehicle with strapdown inertial navigation system. *Trudy MAI*. 2016;(89). (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27174462_51258828.pdf
28. Юхимец Д.А., Губанков А.С. Навигационная система автономного подводного аппарата на основе данных, передаваемых по акустическому каналу от гидроакустической станции. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2023;(1):227–240. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-1-227-240>
Yukhimets D.A., Gubankov A.S. Navigation system of an autonomous underwater vehicle based on data transmitted via an acoustic channel from a hydroacoustic station. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2023;(1):227–240. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-1-227-240>
29. Hidalgo F., Kahlefeldt C., Bräunl T. Monocular ORB-SLAM Application in Underwater Scenarios. In: *2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), 28–31 May 2018, Kobe, Japan*. IEEE; 2018. pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/OCEANS_KOBE.2018.8559435
30. Dabove P., Di Pietra V., Piras M. Monocular Visual Odometry with Unmanned Underwater Vehicle Using Low Cost Sensors. In: *2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 20–23 April 2020, Portland, USA*. IEEE; 2020. pp. 810–816. <https://doi.org/10.1109/PLANS46316.2020.9109841>
31. Xu Z., Haroutunian M., Murphy A.J., Neasham J., Norman R. An Integrated Visual Odometry System for Underwater Vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2021;46(3):848–863. <https://doi.org/10.1109/JOE.2020.3036710>
32. Li M., Yang Ke., Qin J., Zhong J., Jiang Z., Su Q. Comparative study on real-time pose estimation of vision-based unmanned underwater vehicles. *Cobot*. 2023;2. <https://doi.org/10.12688/cobot.17642.2>
33. Campos C., Elvira R., Rodríguez J.J.G., Montiel J.M.M., Tardós J.D. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual–Inertial, and Multimap SLAM. *IEEE Transactions on Robotics*. 2021;37(6):1874–1890. <https://doi.org/10.1109/TRO.2021.3075644>
34. Zhan H., Weerasekera C.S., Bian J.-W., Garg R., Reid I. DF-VO: What Should Be Learnt for Visual Odometry? URL: <https://arxiv.org/abs/2103.00933> [Accessed 30th August 2024].
35. Kinsey J.C., Yang Q., Howland J.C. Nonlinear Dynamic Model-Based State Estimators for Underwater Navigation of Remotely Operated Vehicles. *IEEE Transactions on*

- Control Systems Technology*. 2014;22(5):1845–1854. <https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2293958>
36. Hosseini M., Seyedtabaii S. Robust ROV path following considering disturbance and measurement error using data fusion. *Applied Ocean Research*. 2016;54:67–72. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.10.009>
37. Jin X.-B., Robert Jeremiah R.J., Su T.-L., Bai Y.-T., Kong J.-L. The New Trend of State Estimation: From Model-Driven to Hybrid-Driven Methods. *Sensors*. 2021;21(6). <https://doi.org/10.3390/s21062085>
38. Wang B., Chen C., Jiang Z., Zhao Y. ROV State Estimation Using Mixture of Gaussian Based on Expectation-Maximization Cubature Particle Filter. *Applied Sciences*. 2023;13(10). <https://doi.org/10.3390/app13105885>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алиагаев Альберт Русланович, аспирант, кафедра информационных технологий, Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, Астрахань, Российская Федерация.

e-mail: 22alber@mail.ru

Albert R. Aliagaev, Postgraduate Student, Department of Information Technologies, Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev, Astrakhan, the Russian Federation.

Ажмухамедов Искандар Маратович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационной безопасности, Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, Астрахань, Российская Федерация.

e-mail: aim_agtu@mail.ru

ORCID: [0000-0001-9058-123X](https://orcid.org/0000-0001-9058-123X)

Iskandar M. Azhmukhamedov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Security, Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev, Astrakhan, the Russian Federation.

Хоменко Татьяна Владимировна, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и управления», Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Российская Федерация.

Tatyana V. Khomenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automated Information Processing and Control Systems, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 16.09.2024; одобрена после рецензирования 25.09.2024; принята к публикации 27.09.2024.

The article was submitted 16.09.2024; approved after reviewing 25.09.2024; accepted for publication 27.09.2024.