

Раздел IV. Связь, навигация и наведение

УДК 681.518.3

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-227-240

Д.А. Юхимец, А.С. Губанков

НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПО АКУСТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ ОТ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ*

Предложен метод построения навигационной системы автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), использующей ограниченный набор бортовых датчиков и принимающей данные о положении АНПА по акустическим каналам связи от гидроакустической станции освещения подводной обстановки (ГАСО). Предложенный метод формирует оценки положения и скоростей АНПА на основе его динамической модели в предположении, что угловые скорости, углы ориентации и глубина АНПА определяются с помощью его бортовых датчиков. Линейные скорости непосредственно не измеряются. Для реализации навигационного алгоритма используется фильтр Калмана. При этом особенность этого алгоритма заключается в реализации двухступенчатой процедуры коррекции оценок координат и линейных скоростей АНПА, полученных на основе его динамической модели. Указанная коррекция осуществляется в двух вариантах в зависимости от того, какие данные доступны на текущем шаге работы системы. Первый вариант предполагает коррекцию указанных оценок только на основе данных от датчика глубины, обновление которых происходит на каждом шаге работы системы. А второй вариант используется, когда приходят данные от ГАСО по акустическим каналам связи. Эти данные приходят с задержкой из-за ограниченной скорости распространения акустических сигналов в водной среде, а также могут периодически искажаться и пропадать. В работе предложен метод компенсации указанных задержек, за счет сохранения массива ранее рассчитанных данных и оценки необходимых поправок за счет сравнения пришедших данных с оценками, полученными ранее. Предложенная схема построения навигационной системы позволяет обеспечить коррекцию ее показаний в условиях нерегулярного обновления данных от ГАСО. Результаты моделирования с использованием модели, описывающей все основные особенности работы ГАСО и ее взаимодействия с АНПА (задержки в получении информации, наличие шумов измерений и дискретизация данных ГАСО) показали достаточно высокую эффективность предложенного решения. При этом в качестве основного преимущества можно указать возможность использования минимального количества бортовых датчиков и возможность быстрого развертывания ГАСО для взаимодействия с АНПА.

Автономный необитаемый подводный аппарат; навигация; гидроакустическая станция освещения подводной обстановки; акустические каналы связи; инерциальное-измерительное устройство; фильтр Калмана; динамическая модель.

D.A. Yukhimets, A.S. Gubankov

NAVIGATION SYSTEM OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE BASED ON DATA TRANSMITTED VIA AN ACOUSTIC CHANNEL FROM A HYDROACOUSTIC STATION

The paper proposes a method for constructing a navigation system of an autonomous underwater vehicle (AUV) using a limited set of onboard sensors and receiving position data of the AUV via acoustic communication channels from a hydroacoustic underwater monitoring station (HUMS). The proposed method obtains estimates of the position and velocities of the AUV based on its dynam-

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 29-22-01156).

ic model, assuming that the angular velocities, orientation angles and depth of the AUV are determined using its onboard sensors. Linear velocities are not directly measured. The Kalman filter is used to implement the navigation algorithm. At the same time, the feature of this algorithm is the implementation of a two-stage procedure for correcting estimates of coordinates and linear velocities of the AUV obtained on the basis of its dynamic model. This correction is carried out in two ways, depending on what data is available at the current step of the system. The first option assumes the correction of these estimates only on the basis of data from the depth sensor, which is updated at each step of the system. And the second option is used when data comes from HUMS via acoustic communication channels. This data comes with a delay due to the limited speed of propagation of acoustic signals in the aquatic environment, and may also periodically be distorted and disappear. The paper proposes a method for compensating for these delays by saving an array of previously calculated data and evaluating the necessary corrections by comparing the received data with the estimates obtained earlier. The proposed scheme for the construction of the navigation system allows for the correction of its readings in the conditions of irregular data updates from the HUMS. The results of modeling using a model describing all the main features of the HUMS operation and its interaction with the AUV (delays in obtaining information, the presence of measurement noise and sampling of HUMS data) showed a sufficiently high efficiency of the proposed solution. At the same time, the main advantage can be indicated by the possibility of using a minimum number of on-board sensors and the possibility of fast deployment of HUMS for interaction with AUV.

Autonomous underwater vehicle; navigation; hydroacoustic underwater monitoring station; acoustic communication channels; inertial measuring unit; Kalman filter; dynamic model.

Введение. В настоящее время АНПА являются одним из самых эффективных инструментов выполнения большого количества подводных операций: картографирования, поиска подводных объектов, мониторинга окружающей среды и т.д. [1–3]. При этом недостатками, существенно ограничивающими использование АНПА, является их высокая стоимость, обусловленная необходимостью установки дорогостоящих акустических бортовых датчиков, формирующих необходимую навигационную информацию, требующуюся системе управления для формирования сигналов управления движителями.

Существует большое количество подходов к построению навигационных систем АНПА. Традиционным подходом является использование гидроакустических навигационных систем с длинной базой, которая состоит из нескольких заранее выставленных маяков-ответчиков [4, 5]. Этот подход требует длительных работ по установке и позиционированию маяков, а также для точности определения координат требуется иметь на борту дополнительно измеритель скорости звука и высокоточные синхронизированные часы. Кроме того, в таких системах происходит кратное увеличение периода обновления, если одновременно работает несколько АНПА. Вариантом таких систем являются разностно-дальномерные системы, которые могут быть использованы для реализации навигационных систем групп АНПА [6–8]. В этих системах маяки излучают сигналы, а АНПА их принимают и определяют время прохождения сигналов от маяков. Это позволяет определять положения всем АНПА группы одновременно, но требует присутствия на борту АНПА высокоточных синхронизированных часов, что является сложной задачей и приводит к существенному удорожанию АНПА [9, 10].

Также используют системы с короткой и ультракороткой базой, которые обычно устанавливаются на корабле-носителе и используются для определения положения телеуправляемых подводных аппаратов [11]. В качестве решения для быстроразвертываемой навигационной системы АНПА многими авторами предлагается использовать системы одномаяковой навигации [12–15]. В этих системах безэкипажный катер перемещает маяк, двигаясь за АНПА, и передает координаты этого маяка по акустическим каналам связи. Однако такое решение требует использование синхронизированных часов, для точного определения дистанции до маяка [16].

Так как данные от гидроакустических навигационных систем обновляются с достаточно большим периодом, что неприемлемо для работы системы управления, то в АНПА дополнительно используется инерциальная система навигации, которая основана на использовании датчиков, измеряющих параметры движения АНПА. Данные от этой инерциальной навигационной системы комплексуются с данными, полученными от гидроакустических навигационных систем, на основе различных алгоритмов [17–19]. При этом важной частью этой инерциальной системы является доплеровский лаг, позволяющий измерять линейные скорости АНПА. Доплеровский лаг имеет достаточно высокую цену и габариты, что существенно увеличивает стоимость АНПА.

Для решения указанных проблем в работе рассматривается подход к построению навигационной системы, построенной на основе гидроакустических станций освещения подводной обстановки (ГАСО), которые позволяют определять положение АНПА и передать полученную информацию по акустическим каналам связи. При этом особенностью предлагаемого подхода является замена реального доплеровского лага виртуальным, что позволит снизить стоимость системы, а также учет задержек при поступлении данных о текущем положении АНПА, а также отсутствие необходимости использовать высокоточные синхронизированные часы на борту АНПА.

Постановка задачи. В работе рассматривается АНПА, имеющий следующее бортовое оборудование:

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

Также предполагается, что в процессе выполнения миссии АНПА находится в зоне действия ГАСО, которая способна определять его положение относительно себя, формируя дистанцию D_g до АНПА и пеленг α_g .

Движение АНПА описывается следующей динамической моделью [20]:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{C}(\mathbf{M}, \mathbf{v}) + \mathbf{D}(d_1, d_2, \mathbf{v}))\mathbf{v} + \mathbf{g}(\xi) &= \boldsymbol{\tau}, \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \mathbf{J}(\xi)\mathbf{v}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{M} = \mathbf{M}_R + \mathbf{M}_A \in R^{6 \times 6}$; $\mathbf{M}_R \in R^{6 \times 6}$ – матрица инерции АНПА; $\mathbf{M}_A \in R^{6 \times 6}$ – матрица инерции присоединенных масс жидкости и их моментов инерции; $\mathbf{C}(\mathbf{M}, \mathbf{v}) \in R^{6 \times 6}$ – матрица кориолисовых и центробежных сил и моментов; $\mathbf{D}(d_1, d_2, \mathbf{v}) \in R^{6 \times 6}$ – матрица гидродинамических сил и моментов; $\mathbf{g}(\xi) \in R^6$ – вектор гидростатических сил и моментов; $\boldsymbol{\eta} = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T \in R^6$ – вектор положения и углов ориентации АНПА в АСК; $\xi = [\varphi, \theta, \psi]^T$; $\boldsymbol{\tau} = [T_x, T_y, T_z, M_x, M_y, M_z]^T \in R^6$ – вектор сил тяг и моментов, развиваемых движительным комплексом в связанной с АНПА СК; $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \in R^6$ – вектор линейных и угловых скоростей АНПА в ССК.

Матрица кориолисовых и центробежных сил и моментов, входящая в уравнения (1), описывается выражениями [20]:

$$\mathbf{C}(\mathbf{M}, \mathbf{v}) = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{M}_R, \mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{M}_A, \mathbf{v}), \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{M}_R, \mathbf{v}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) \\ -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) & -S(M_{21}v_1 + M_{22}v_2) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_A(\mathbf{M}_A, \mathbf{v}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) \\ -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) & -S(A_{21}v_1 + A_{22}v_2) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

где $v_1 = [v_x \ v_y \ v_z]^T$, $v_2 = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$, а оператор $S(\cdot)$ - выражениями:

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

Матрица гидродинамических сил и моментов является диагональной и ее элементы имеют вид [20]:

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

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

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

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

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

В работе считается, что параметры математической модели (1) (присоединенные массы и моменты инерции, гидродинамические коэффициенты) известны с определенной точностью в результате выполненных теоретических расчетов на основе известной геометрической формы АНПА [21] или выполненной процедуры идентификации с использованием экспериментальных данных [22–24].

Указанная модель может быть использована для получения оценок линейных скоростей движения АНПА в ССК, что позволяет в определенных условиях обойтись без использования доплеровского лага, являющегося дорогостоящим и габаритным устройством. Очевидно, что такой подход не может обеспечить точный расчет линейных скоростей из-за неизбежной неопределенности в параметрах модели АНПА и характеристиках движительного комплекса и, следовательно, приведет к накоплению ошибок в оценке положения АНПА в АСК. Однако использование модели (1) для оценки скоростей АНПА позволяет обеспечить физическую корректность этой оценки (АНПА не движется, если не приложена сила тяги от движительного комплекса), а для коррекции ошибок оценки линейных скоростей в ССК и координат в АСК можно использовать данные о положении АНПА формируемые ГАСО.

В процессе работы ГАСО излучает импульс, который доходит до маяка ответчика, расположенного на АНПА. Маяк, получив импульс, излучает ответный, который принимает ГАСО и определяет направление и дальность до АНПА. Эти данные ГАСО передает через акустический канал связи для АНПА. То есть данные о своем положении относительно ГАСО АНПА получает с задержкой, которая будет влиять на точность коррекции положения и скорости движения АНПА, которые, в свою очередь, требуются для функционирования его системы управления. При этом, так как данные передаются по акустическим каналам связи, то они могут приходиться с искажениями, что не позволит восстановить информацию о положении АНПА. Структура ГАСО описана в работе [25].

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

Описание алгоритма работы навигационной системы. Алгоритм функционирования навигационной системы АНПА предлагается реализовать на основе фильтра Калмана, с учетом поступления данных о положении АНПА с переменным периодом из-за потери данных, и переменными задержками, зависящими от дистанции между АНПА и ГАСО. Данные о положении АНПА поступают от двух источников информации:

- ◆ датчик глубины формирует данные о положении АНПА по координате z с периодом, равным периоду работы навигационной системы;
- ◆ акустический модем, получающий данные о дистанции и пеленге АНПА относительно ГАСО, с периодом значительно превышающим период работы навигационной системы. При этом указанный период из-за возможной потери данных может быть переменным и заранее не прогнозируемым. Также указанные данные поступают с задержкой, зависящей от дистанции от АНПА до ГАСО.

Работа навигационной системы организуется следующим образом (рис. 1). На основе данных бортовых датчиков вычисляются оценки положения АНПА с желаемым периодом обновления. Для этого в качестве исходных данных для расчета используются показания инерциально-измерительного устройства (вектор угловых скоростей в ССК и углы ориентации в АСК) и управляющие сигналы, формируемые системой управления и подаваемые на движительный комплекс АНПА.

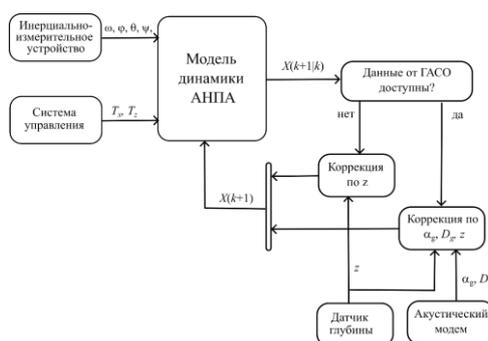


Рис. 1. Структура навигационной системы, использующей данные от ГАСО

Далее полученные на этапе оценки по динамической модели АНПА данные о линейных скоростях и координатах АНПА корректируются с использованием данных полученных от датчика глубины и ГАСО. При этом указанная коррекция в

зависимости от доступных данных может выполняться в двух вариантах: если новые данные от ГАСО не доступны, то коррекция происходит только с помощью показаний датчика глубины, а если пришли новые данные от ГАСО, то коррекция выполняется на основе этих данных и показаний датчика глубины с учетом задержки в поступлении данных от ГАСО. То есть в этом случае удастся учесть переменный и заранее неизвестный период поступления данных от ГАСО.

Расчет положения АНПА на основе инерциально-измерительного устройства и управляющих сигналов происходит с помощью динамической модели (1). В этой модели используются только уравнения, описывающие изменения линейных скоростей АНПА в ССК и его координат в АСК, с учетом того, что известны величины угловых скоростей в ССК и углов ориентации в АСК, а также развиваемые движителем комплексом силы тяги. То есть из модели (1) формируется следующая модель оценки указанных скоростей и координат в предположении, что угловые ускорения АНПА малы и ими можно пренебречь, а матрица присоединенных масс и моментов инерции имеет диагональный вид:

$$\begin{aligned} (m_a - \lambda_{11})\dot{v}_x + (d_{1x} + d_{2x}|v_x|)v_x - (m_a - \lambda_{22})\omega_z v_y + (m_a - \lambda_{33})\omega_y v_z + P s_\theta &= T_x, \\ (m_a - \lambda_{22})\dot{v}_y + (m_a - \lambda_{11})\omega_z v_x + (d_{1y} + d_{2y}|v_y|)v_y - (m_a - \lambda_{33})\omega_x v_z - P c_\theta s_\varphi &= 0 \\ (m_a - \lambda_{33})\dot{v}_z - (m_a - \lambda_{11})\omega_y v_x + (m_a - \lambda_{22})\omega_x v_y + (d_{1z} + d_{2z}|v_z|)v_z - P c_\theta c_\varphi &= T_z \\ \dot{x} &= s_\psi c_\theta v_x + (c_\psi s_\theta s_\varphi - s_\psi c_\varphi)v_y + (s_\psi s_\varphi + c_\psi c_\varphi s_\theta)v_z \\ \dot{y} &= s_\psi c_\theta v_x + (c_\psi c_\varphi + s_\varphi s_\theta s_\psi)v_y + (s_\theta s_\psi c_\varphi - c_\psi s_\varphi)v_z \\ \dot{z} &= -s_\theta v_x + c_\theta s_\varphi v_y + c_\theta c_\varphi v_z \end{aligned} \quad (5)$$

где m_a – масса АНПА; λ_{ii} – присоединенные массы жидкости; c_ξ, s_ξ – обозначение функций \cos и \sin соответствующего угла.

В модели (5) предполагается, что динамические параметры АНПА известны с некоторой точностью. А также известны характеристики движительного комплекса, то есть известны зависимости силы тяги, которые формирует каждый движитель, от скорости вращения винта.

Модель (5) в дискретном виде можно представить как:

$$X(k+1) = A(\omega, \varphi, \theta, \psi)X(k) + BF(k), \quad (6)$$

$$A = h^{-1} \begin{bmatrix} \frac{h^{-1} - (d_{1x} + d_{2x}|v_x|)}{m_a - \lambda_{11}} & \frac{(m_a - \lambda_{22})\omega_z}{m_a - \lambda_{11}} & \frac{-(m_a - \lambda_{33})\omega_y}{m_a - \lambda_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-(m_a - \lambda_{11})\omega_z}{m_a - \lambda_{22}} & \frac{h^{-1} - (d_{1y} + d_{2y}|v_y|)}{m_a - \lambda_{22}} & \frac{(m_a - \lambda_{33})\omega_x}{m_a - \lambda_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(m_a - \lambda_{11})\omega_y}{m_a - \lambda_{33}} & \frac{-(m_a - \lambda_{22})\omega_x}{m_a - \lambda_{33}} & \frac{h^{-1} - (d_{1z} + d_{2z}|v_z|)}{m_a - \lambda_{33}} & h^{-1} & 0 & 0 \\ s_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\varphi - s_\psi c_\varphi & s_\psi s_\varphi + c_\psi c_\varphi s_\theta & 0 & h^{-1} & 0 \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\varphi + s_\varphi s_\theta s_\psi & s_\theta s_\psi c_\varphi - c_\psi s_\varphi & 0 & 0 & h^{-1} \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\theta c_\varphi & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} h & 0 & 0 \\ 0 & h & 0 \\ 0 & 0 & h \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} T_x + P_a s_\theta / (m_a - \lambda_{11}) \\ -P_a c_\theta s_\varphi / (m_a - \lambda_{22}) \\ T_z - P_a c_\theta c_\varphi / (m_a - \lambda_{33}) \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

где h – шаг дискретизации системы.

Модель (6) может быть использована в фильтре Калмана для оценки вектора линейных скоростей в ССК и вектора координат в АСК на этапе прогнозирования. Следует отметить, что из-за того, что угловые скорости и углы ориентации не требуют дополнительной оценки, модель (6) является линейной и не приводит к увеличению сложности реализации фильтра.

Таким образом, этап прогнозирования выполняется с помощью следующих формул [26]:

$$\begin{aligned} X(k+1|k) &= \mathbf{A}(k)X(k) + \mathbf{B}F(k) \\ \mathbf{P}(k+1|k) &= \mathbf{A}(k)\mathbf{P}(k)\mathbf{A}(k)^T + \mathbf{Q}, \end{aligned} \quad (7)$$

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

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

$$\begin{aligned} K_{Gz} &= \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}_z^T(\mathbf{H}_z\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}_z^T + \mathbf{R}_z)^{-1} \\ X(k+1) &= X(k+1|k) + K_{Gz}(\mathbf{Y}_z - \mathbf{H}_zX(k+1|k)), \\ \mathbf{P}(k+1) &= (\mathbf{I} - K_{Gz}\mathbf{H}_z)\mathbf{P}(k+1|k), \\ \mathbf{Y}_z &= z_s, \mathbf{H}_z = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1], \end{aligned} \quad (8)$$

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

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

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

$$\begin{aligned} x_{sg} &= \left(D_g^2 - (z_g - z_s)^2\right)^{\frac{1}{2}} \cos\alpha_g, \quad y_{sg} = \left(D_g^2 - (z_g - z_s)^2\right)^{\frac{1}{2}} \sin\alpha_g, \\ x_s &= x_{sg} \cos\psi_g + y_{sg} \sin\psi_g + x_g, \\ y_s &= -x_{sg} \sin\psi_g + y_{sg} \cos\psi_g + y_g, \end{aligned} \quad (9)$$

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

Из выражений (9) видно, что в работе для простоты считается, что ориентация ГАСО по углам крена и дифферента равна 0, что обычно выполняется. При этом если указанные углы отличны от 0, то это можно учесть, используя полную матрицу поворота по трем углам ориентации.

На втором шаге происходит компенсация временной задержки, которая возникает из-за конечной скорости распространения акустических сигналов в воде. Указанная задержка рассчитывается по следующим формулам:

$$t_\Delta = \frac{3D_g}{v_s} + \frac{N_G}{B_r}, \quad (10)$$

где v_s – скорость звука в воде; N_G – количество байт в пакете данных, пересылаемых от ГАСО к АНПА; B_r – скорость передачи данных по акустическим каналам связи.

В выражении (10) используется утроенная величина дистанции между ГАСО и АНПА, так как акустический сигнал в процессе измерения проходит расстояние от ГАСО до АНПА и обратно, а затем в процессе передачи данных по акустическому каналу от ГАСО до АНПА. При этом учет указанной задержки не только позволит увеличить точность определения координат АНПА, но и увеличить точность определения линейных скоростей движения АНПА, что существенно влияет на качество работы бортовой системы управления.

Учет указанной задержки будет происходить следующим образом (рис. 2). В процессе работы навигационной системы происходит сохранение рассчитанных векторов $X(k)$ в буфер типа FIFO (First Input First Output), в котором новые данные записываются в начало буфера, наиболее старые из буфера убираются, а все остальные сдвигаются на одну позицию назад. Так как вычисления вектора $X(k)$ происходят с постоянным шагом h , то каждая ячейка хранит данные, отстоящее от текущего шага на промежуток времени nh , где n – номер ячейки буфера.

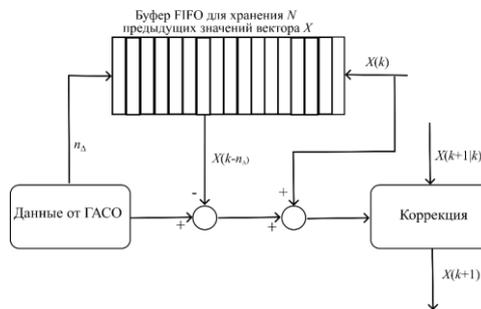


Рис. 2. Схема учета задержек получения навигационных данных от ГАСО

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

$$n_{\Delta} = \text{mod} \left(\frac{t_{\Delta}}{h} \right),$$

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

Далее формируется вектор измерений для коррекции показаний навигационной системы:

$$Y_{xyz} = \begin{bmatrix} x(k) + (x_s - x(k - n_{\Delta})) \\ y(k) + (y_s - y(k - n_{\Delta})) \\ z_s \end{bmatrix}, \quad (11)$$

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

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

$$\begin{aligned} K_{G_{xyz}} &= \mathbf{P}(k + 1|k) \mathbf{H}_{xyz}^T (\mathbf{H}_{xyz} \mathbf{P}(k + 1|k) \mathbf{H}_{xyz}^T + \mathbf{R}_{xyz})^{-1}, \\ X(k + 1) &= X(k + 1|k) + K_{G_{xyz}} (Y_{xyz} - \mathbf{H}_{xyz} X(k + 1|k)), \\ \mathbf{P}(k + 1) &= (I - K_{G_{xyz}} \mathbf{H}_{xyz}) \mathbf{P}(k + 1|k), \\ \mathbf{H}_{xyz} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (12)$$

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

В результате предложенная система навигации АНПА обеспечивает коррекцию оценок линейных скоростей и координат АНПА на основе нерегулярно поступающих от ГАСО данных с учетом переменных задержек этих данных.

Результаты моделирования. Для исследования предложенного метода построения навигационной системы было проведено математическое моделирование. Для этого была разработана модель, описывающая формирование данных о положении АНПА с помощью ГАСО. Эта модель на основе текущих координат ГАСО и АНПА, вычисляет дистанцию D_g и пеленг α_g АНПА относительно ГАСО. К рассчитанным величинам добавлялась случайная погрешность, амплитуда которой, составляла заданную долю от измеренной величины, а затем полученные зашумленные данные дискретизировались с заданным шагом по дистанции и углу пеленга, соответственно. Сформированные данные, которые имитируют навигационные данные от ГАСО передаются с задержкой, зависящей от дистанции между АНПА и ГАСО и скорости передачи данных по акустическому каналу, в модель навигационной системы АНПА, которая реализуется с помощью выражений (6)-(12). При этом передача указанных данных в модель навигационной системы АНПА происходит с заданной вероятностью, что позволяет моделировать случайный процесс искажения и потери информации при передаче данных по акустическим каналам связи.

В процессе исследования моделировалось движение АНПА с помощью модели (1). На вход этой модели подавались следующие, изменяющиеся во времени, силы и моменты: $T_x = 10H$, $M_z = 5\sin(0.01t)$, $T_z = 0$, $M_y = 0$, что имитировало движение АНПА в горизонтальной плоскости при движении по сложной криволинейной траектории.

Параметры математической модели АНПА имели следующие значения:

- ♦ матрица инерции АНПА $M_R = \text{diag}(100 \text{ кг}, 100 \text{ кг}, 100 \text{ кг}, 10.2 \text{ кгм}^2, 23.4 \text{ кгм}^2, 23.4 \text{ кгм}^2)$;
- ♦ матрица инерции присоединенных масс и моментов инерции $M_A = \text{diag}(-15 \text{ кг}, -185 \text{ кг}, -185 \text{ кг}, 5 \text{ кгм}^2, 9.6 \text{ кгм}^2, 9.6 \text{ кгм}^2)$;
- ♦ гидродинамические коэффициенты $d_1 = (18 \text{ Нс/м}, 105 \text{ Нс/м}, 105 \text{ Нс/м}, 20 \text{ Нмс}, 80 \text{ Нмс}, 80 \text{ Нмс})$, $d_2 = (18 \text{ Нс}^2/\text{м}^2, 105 \text{ Нс}^2/\text{м}^2, 105 \text{ Нс}^2/\text{м}^2, 20 \text{ Нмс}^2, 80 \text{ Нмс}^2, 80 \text{ Нмс}^2)$.

При реализации навигационной системы АНПА в модели (6) использовались параметры, отличающиеся от параметров модели (1) и имеющие следующие значения:

$$m_a = 100 \text{ кг}, \lambda_{11} = -13 \text{ кг}, \lambda_{22} = -165 \text{ кг}, \lambda_{33} = -205 \text{ кг}, d_{1x} = 16.0 \frac{\text{Нс}}{\text{м}},$$

$$d_{2x} = \frac{19.0 \text{ Нс}^2}{\text{м}^2}, \quad d_{1y} = 115.0 \frac{\text{Нс}}{\text{м}}, \quad d_{2y} = \frac{100.0 \text{ Нс}^2}{\text{м}^2}, \quad d_{1z} = 107.0 \frac{\text{Нс}}{\text{м}},$$

$$d_{2z} = 115.0 \text{ Нс}^2/\text{м}^2, P_a = 0.6H.$$

Шаг расчета навигационной системы был $h = 0.05 \text{ с}$.

Величины угловых скоростей, углов ориентации и координаты z (глубины), поступающие от соответствующих датчиков были зашумлены в соответствии с типовыми характеристиками указанных датчиков: величины угловой скорости 0.01 с^{-1} , величины углов 0.02 рад , глубина 0.1 м .

Модель ГАСО имела следующие параметры: погрешность определения дистанции 0.5% от измеренной величины; погрешность определения угла пеленга – 0.5° ; шаг дискретизации по дистанции – 0.5 м ; шаг дискретизации по углу пеленга – 0.5° ; вероятность успешной передачи данных от ГАСО к АНПА – 0.7 ; скорость звука в воде – 1500 м/с ; скорость передачи данных – 9600 бит/с ; длина навигационного пакета 172 бит .

Результаты работы навигационной системы, реализованной с помощью выражений (6)-(12) показаны на рис. 3-5.

На рис. 3,а,б показан процесс восстановления предложенной навигационной системой координат x и y АНПА в АСК.

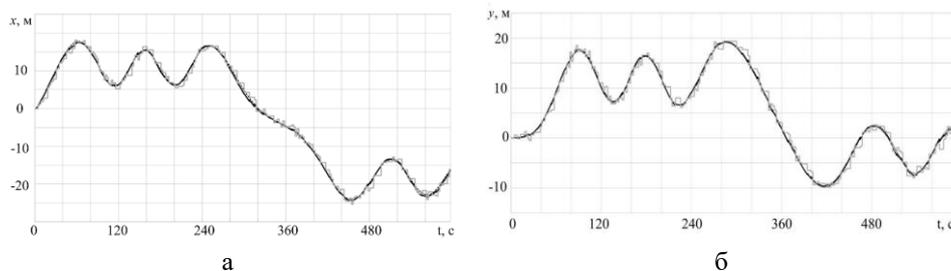


Рис. 3. Результат восстановления координат x и y с помощью предложенной навигационной системы АНПА

На этих рисунках черной сплошной линией показаны изменение оценки координат x и y с помощью предложенного алгоритма, черной пунктирной линией – изменение реальных координат АНПА, серой линией – величины координат АНПА, полученные от ГАСО. Из рисунков видно, что данные от ГАСО приходят с различным периодом, а также имеют достаточно большие ошибки и задержки.

Ошибки восстановления координат показаны на рис. 4,а,б. На этих рисунках черная кривая соответствует ошибке предложенной в работе навигационной системы, а серая кривая – ошибке определения координат с помощью ГАСО.

Как видно из представленных рисунков точность восстановления координат АНПА с помощью предложенного алгоритма увеличивается более чем в три раза по сравнению с использованием данных от ГАСО. При использовании ГАСО ошибка определения координат может достигать 3м, а при использовании предложенного алгоритма не превышает 0.9 м. При этом обновление данных от навигационной системы происходит с периодом 0.05 с, при периоде обновления данных от ГАСО не менее, чем 1.5 с. Это позволяет реализовывать высокоточные системы управления движением АНПА и решать большинство традиционных задач, стоящих перед АНПА.

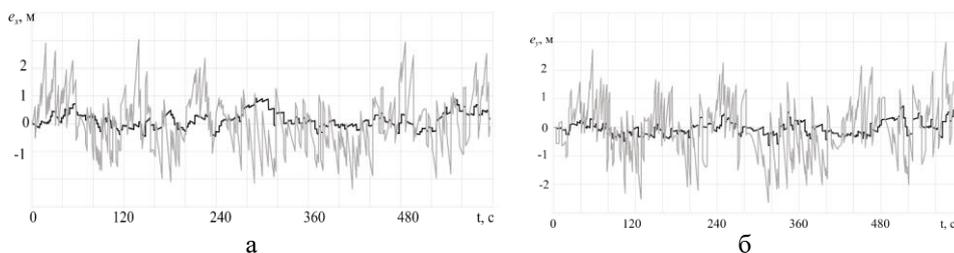


Рис. 4. Ошибка восстановления координат x и y АНПА с помощью предложенной навигационной системы

На рис. 5 представлен процесс восстановления скоростей движения АНПА в ССК: черная линия – v_x , серая линия – v_y .

Как видно из представленного рисунка, погрешность восстановления линейных скоростей движения АНПА с помощью предложенного алгоритма не превышает 0.05 м/с, что достаточно для выполнения большинства подводных операций. При этом становится возможным восстанавливать даже небольшие значения скоростей.

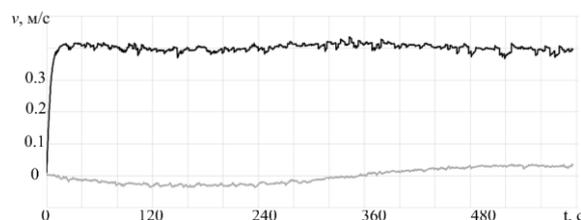


Рис. 5. Процесс восстановления скоростей АНПА в ССК

Заключение. В работе предложен метод построения навигационной системы АНПА, использующей ограниченный набор бортовых датчиков и получающей данные по акустическим каналам связи о положении АНПА от гидроакустической станции освещения подводной обстановки. Предложенный алгоритм формирует оценки положения и скоростей АНПА на основе его динамической модели в предположении, что угловые скорости, углы ориентации и глубина АНПА определяются с помощью его бортовых датчиков. Для реализации навигационного алгоритма используется фильтр Калмана. При этом особенность этого алгоритма заключается в реализации двухступенчатой процедуры коррекции оценок координат и линейных скоростей АНПА, полученных на основе его динамической модели. Указанная коррекция осуществляется в двух вариантах в зависимости от того, какие данные доступны на текущем шаге работы системы. Первый вариант предполагает коррекцию указанных оценок только на основе данных от датчика глубины, обновление которых происходит на каждом шаге работы системы. А второй вариант используется, когда приходят данные от ГАСО по акустическим каналам связи. Эти данные приходят с задержкой из-за ограниченной скорости распространения акустических сигналов в водной среде, а также могут периодически искажаться и пропадать. В работе предложен метод компенсации указанных задержек, за счет сохранения массива ранее рассчитанных данных и оценки необходимых поправок за счет сравнения пришедших данных с оценками, полученными ранее. Предложенная схема построения навигационной системы позволяет обеспечить коррекцию ее показаний в условиях нерегулярного обновления данных от ГАСО. Результаты моделирования с использованием модели, описывающей все основные особенности работы ГАСО и ее взаимодействия с АНПА (задержки в получении информации, наличие шумов измерений и дискретизация данных ГАСО) показали достаточно высокую эффективность предложенного решения. При этом в качестве основного преимущества можно указать возможность использования минимального количества бортовых датчиков и возможность быстрого развертывания навигационного оборудования для взаимодействия с АНПА.

При этом в качестве дальнейшего развития предложенного подхода является адаптивная подстройка параметров динамической модели АНПА в процессе его функционирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Yuh J., Marani G., Blidberg R.* Applications of marine robotic vehicles // *Intelligent Service Robotics*. – 2011. – No. 4. – P. 221-231.
2. *Yu L. et al.* Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends // *2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. Lancaster, United Kingdom. – 2019. – P. 1-6.
3. *Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. и др.* Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. – Владивосток: Дальнаука, 2016. – 400 с.

4. *Inzartsev A.V., Kamornyi A.V., Kiselev L.V. et al.* The Integrated Navigation System of an Autonomous Underwater Vehicle and the Experience from Its Application in High Arctic Latitudes // *Gyroscopy and Navigation*. – 2010. – Vol. 1, No. 2. – P. 107-112.
5. *Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф.* Интегрированная система навигации и связи АНПА «ММТ-3000» и опыт ее использования в работах на глубоководных протяженных трассах // *Подводные исследования и робототехника*. – 2017. – № 2 (24). – С. 14-19.
6. *Eustice R.M., Whitcomb L.L., Singh H., Grund M.* Experimental Results in Synchronous-Clock One-Way-Travel-Time Acoustic Navigation for Autonomous Underwater Vehicles // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. Rome, Italy. – 2007. – P. 4257-4264.
7. *Dubrovina F.S., Scherbatyuk A.F., Scherbatyuk D.A., Rodionov A.Yu., Vaulin Yu.V.* Some algorithms of differential-ranging acoustic positioning system intended for AUV group navigation // *Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conference*, Singapore-U.S. Gulf Coast. – 2020. – P. 1-4.
8. *Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф., Щербатюк Д.А.* Разностно-дальномерная система навигации для обеспечения групповой работы морских робототехнических комплексов // *Подводные исследования и робототехника*. – 2020. – № 2 (32). – С. 22-33.
9. *Cario G., Casavola A., Djapic V., Gjanci P., Lupia M., Petrioli C., Spaccini D.* Clock Synchronization and Ranging Estimation for Control and Cooperation of Multiple UUVs // *Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2016*. Shanghai, China. – 2016. – P. 1-9.
10. *Antonelli G., Caffaz A., Casalino G., Pollini L.* The Widely scalable Mobile Underwater Sonar Technology (WiMUST) H2020 project: First year status // *Proc. of OCEANS 2016*. Shanghai, China. – 2016. – P. 1-8.
11. *Caiti A., Calabrò V., Fabbri T., Fenucci D., Munafò A.* Underwater communication and distributed localization of AUV teams // *Proc. of the 2013 MTS/IEEE OCEANS – Bergen*. Bergen, Norway. – 2013. – P. 1-8.
12. *Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J.* Cooperative AUV Navigation using a Single Surface Craft // *Field and Service Robotics: Results of the 7th Int. Conf.* – 2009. – P. 331-340.
13. *Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J., Patrikalakis N.* Cooperative AUV Navigation using a Single Maneuvering Surface Craft // *The Int. J. of Robotics Research*. – 2010. – Vol. 29, No. 12. – P. 1-27.
14. *Papadopoulos G., Fallon M., Leonard J., Patrikalakis N.* Cooperative Localization of Marine Vehicles using Nonlinear State Estimation // *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. – 2010. – P. 1-6.
15. *Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф.* О методе оценивания точности работы одноплатформенной мобильной навигационной системы подводного аппарата с помощью водного аппарата, оснащенного DGPS // *Подводные исследования и робототехника*. – 2016. – № 1. – С. 31-40.
16. *Кебкэл К.Г. и др.* Гидроакустические модемы с интегрированными цезиевыми часами для задач подводного позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // *Подводные исследования и робототехника*. – 2019. – № 2 (28). – С. 4-12.
17. *Donovan G.T.* Position Error Correction for an Autonomous Underwater Vehicle Inertial Navigation System (INS) Using a Particle Filter // *EEE Journal of oceanic engineering*. – 2012. – Vol. 37, No. 3. – P. 431-445.
18. *Menna B.V., Villar S.A., Acosta G.G.* Particle filter based autonomous underwater vehicle navigation system aided thru acoustic communication ranging // *Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conf.*, Singapore-U.S. Gulf Coast. – 2020. – P. 1-10.
19. *Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш.* Метод комплексирования данных с навигационных датчиков подводного аппарата с использованием нелинейного фильтра Калмана // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2012. – № 8. – С. 64-70.
20. *Fossen T.* Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. – John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011. – 582 p.
21. *Пантов Е.Н., Махин Е.Е., Шереметов Б.Б.* Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1973. – 209 с.
22. *Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш.* Метод идентификации параметров математической модели подводного аппарата // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2012. – № 10. – С. 64-70.
23. *Ikonen E., Najim K.* Advanced process identification and control. – Marsel Dekker Inc, 2002. – 310 p.
24. *Golding B., Ross A., Fossen T.* Identification of nonlinear viscous damping for marine vessels // 14th IFAC Symposium on System Identification. Newcastle, Australia. – 2006. – P. 332-337.

25. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Зуев А.В., Губанков А.С., Минаев Д.Д. Цифровая платформа для реализации распределенных систем управления и навигации для подводных робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 81-93.
26. Haykin S. Kalman filtering and neural networks. – John Wiley and Sons, 2001. – 298 p.

REFERENCES

1. Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles, *Intelligent Service Robotics*, 2011, No. 4, pp. 221-231.
2. Yu L. et al. Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends, *2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. Lancaster, United Kingdom, 2019, pp. 1-6.
3. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. i dr. Osobennosti sinteza vysokotochnykh sistem upravleniya skorostnym dvizheniem i stabilizatsiey podvodnykh apparatov v prostranstve [Features of synthesis of high-precision control systems for high-speed movement and stabilization of underwater vehicles in space]. Vladivostok: Dal'nauka, 2016, 400 p.
4. Inzartsev A.V., Kamornyi A.V., Kiselev L.V. et al. The Integrated Navigation System of an Autonomous Underwater Vehicle and the Experience from Its Application in High Arctic Latitudes, *Gyroscopy and Navigation*, 2010, Vol. 1, No. 2, pp. 107-112.
5. Vaulin Yu.V., Dubrovin F.S., Shcherbatyuk A.F. Integrirovannaya sistema navigatsii i svyazi ANPA «MMT-3000» i opyt ee ispol'zovaniya v rabotakh na glubokovodnykh protyazhennykh trassakh [Integrated navigation and communication system of the AUV "MMT-3000" and experience of its use in work on deep-water extended routes], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2017, No. 2 (24), pp. 14-19.
6. Eustice R.M., Whitcomb L.L., Singh H., Grund M. Experimental Results in Synchronous-Clock One-Way-Travel-Time Acoustic Navigation for Autonomous Underwater Vehicles, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Rome, Italy*, 2007, pp. 4257-4264.
7. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F., Scherbatyuk D.A., Rodionov A.Yu., Vaulin Yu.V. Some algorithms of differential-ranging acoustic positioning system intended for AUV group navigation, *Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conference, Singapore-U.S. Gulf Coast*, 2020, pp. 1-4.
8. Vaulin Yu.V., Dubrovin F.S., Shcherbatyuk A.F., Shcherbatyuk D.A. Raznostno-dal'nomernaya sistema navigatsii dlya obespecheniya gruppovoy raboty morskikh robototekhnicheskikh kompleksov [Differential-ranging navigation system for group work of marine robotic complexes], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2020, No. 2 (32), pp. 22-33.
9. Cario G., Casavola A., Djapic V., Gjanici P., Lupia M., Petrioli C., Spaccini D. Clock Synchronization and Ranging Estimation for Control and Cooperation of Multiple UUVs, *Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2016. Shanghai, China*, 2016, pp. 1-9.
10. Antonelli G., Caffaz A., Casalino G., Pollini L. The Widely scalable Mobile Underwater Sonar Technology (WiMUST) H2020 project: First year status, *Proc. of OCEANS 2016. Shanghai, China*, 2016, pp. 1-8.
11. Caiti A., Calabrò V., Fabbri T., Fenucci D., Munafò A. Underwater communication and distributed localization of AUV teams, *Proc. of the 2013 MTS/IEEE OCEANS – Bergen. Bergen, Norway*, 2013, pp. 1-8.
12. Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J. Cooperative AUV Navigation using a Single Surface Craft, *Field and Service Robotics: Results of the 7th Int. Conf.*, 2009, pp. 331-340.
13. Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J., Patrikalakis N. Cooperative AUV Navigation using a Single Maneuvering Surface Craft, *The Int. J. of Robotics Research*, 2010, Vol. 29, No. 12, pp. 1-27.
14. Papadopoulos G., Fallon M., Leonard J., Patrikalakis N. Cooperative Localization of Marine Vehicles using Nonlinear State Estimation, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2010, pp. 1-6.
15. Dubrovin F.S., Shcherbatyuk A.F. O metode otsenivaniya tochnosti raboty odnomayakovoy mobil'noy navigatsionnoy sistemy podvodnogo apparata s pomoshch'yu vodnogo apparata, osnashchennogo DGPS [About the method of evaluating the accuracy of the operation of a single-beacon mobile navigation system of an underwater vehicle using a water vehicle equipped with DGPS], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2016, No. 1, pp. 31-40.

16. *Kebkal K.G. i dr.* Hidroakusticheskie modemy s integrirovannymi tsezievymi chasami dlya zadach podvodnogo pozitsionirovaniya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Hydroacoustic modems with integrated cesium clocks for underwater positioning tasks of autonomous uninhabited underwater vehicles], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2019, No. 2 (28), pp. 4–12.
17. *Donovan G.T.* Position Error Correction for an Autonomous Underwater Vehicle Inertial Navigation System (INS) Using a Particle Filter, *EEE Journal of oceanic engineering*, 2012, Vol. 37, No. 3, pp. 431-445.
18. *Menna B.V., Villar S.A., Acosta G.G.* Particle filter based autonomous underwater vehicle navigation system aided thru acoustic communication ranging, *Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conf., Singapore-U.S. Gulf Coast*, 2020, pp. 1-10.
19. *Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Mursalimov E.Sh.* Metod kompleksirovaniya dannykh s navigatsionnykh datchikov podvodnogo apparata s ispol'zovaniem nelineynogo fil'tra Kalmana [Method of Data Fusion from Navigation Sensors of Under-water Vehicle with Using Nonlinear Kalman Filter], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, automation and control], 2012, No. 8, pp. 64-70.
20. *Fossen T.* Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. Jonh Willey & Sons, Chichester, UK, 2011, 582 p.
21. *Pantov E.N., Makhin E.E., Sheremetov B.B.* Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov [Fundamentals of the theory of motion of underwater vehicles]. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 209 p.
22. *Filaretov V.F., YUkhimets D.A., Mursalimov E.Sh.* Metod identifikatsii parametrov matematicheskoy modeli podvodnogo apparata [Method of Parameters Identification of Mathematical Model of Underwater Vehicle], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, automation and control], 2012, No. 10, pp. 64-70.
23. *Ikonen E., Najim K.* Advanced process identification and control. Marsel Dekker Inc, 2002, 310 p.
24. *Golding B., Ross A., Fossen T.* Identification of nonlinear viscous damping for marine vessels, *14th IFAC Symposium on System Identification. Newcastle, Australia*, 2006, pp. 332-337.
25. *Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Zuev A.V., Gubankov A.S., Minaev D.D.* Tsifrovaya plat-forma dlya realizatsii raspredelennykh sistem upravleniya i navigatsii dlya podvodnykh robototekhnicheskikh kompleksov [Digital platform for the creation of distributed control and navigation systems for underwater vehicles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFEDU. Engineering sciences], 2021, No. 1, pp. 81-93.
26. *Haykin S.* Kalman filtering and neural networks. John Wiley and Sons, 2001, 298 p.

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

Юхимец Дмитрий Александрович – Дальневосточный Федеральный университет, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН; e-mail: yukhimets.da@dvfu.ru; г. Владивосток, Россия; д.т.н.; в.н.с.

Губанков Антон Сергеевич – Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского; e-mail: gubankov@dvo.ru; г. Владивосток, Россия; к.т.н.; с.н.с.

Yukhimets Dmitry Aleksandrovich – Far Eastern Federal University, Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS; e-mail: yukhimets.da@dvfu.ru; Vladivostok, Russia; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Gubankov Anton Sergeevich – Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS, Maritime State University, e-mail: gubankov@dvo.ru; Vladivostok, Russia; cand. of eng. sc.; senior researcher.