УДК 007.52:629.3.05
DOI: 10.37102/1992-4429_2024_49_03_04
EDN: MFYMAS

АЛГОРИТМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

И.М. Медведев, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов

Проблема поддержания заданного строя актуальна при поиске объектов, обследовании заданной области, групповом мониторинге. В подводной среде данная проблема осложнена ограничениями на частоту получения навигационных данных и скорость обмена информацией между подводными аппаратами. Целями данной статьи являются разработка и исследование алгоритмов группового управления, обеспечивающих построение в заданный строй и поддержание данного строя при движении. В статье дан обзор результатов в области группового управления подводными аппаратами, приведена математическая модель объекта, навигационной системы, подводной среды и системы связи. В качестве математической модели использованы уравнения кинематики и динамики твердого тела в трехмерном пространстве, дополненные уравнениями исполнительных механизмов. Предложены алгоритмы распределения подвижных объектов в строю и нелинейные алгоритмы управления при движении шеренгой. При построении аппаратов принято, что имеется лидер группы, который передает свои координаты остальным подводным аппаратам. Управление движением синтезировано методом позиционно-траекторного управления в виде функции внешних координат. Численными методами проведено исследование, в ходе которого изучен процесс формирования строя и движения строем вдоль траектории, описываемой отрезками прямых линий. Исследовано влияние погрешностей навигационной системы и частоты обновления данных на ошибку поддержания заданного положения отдельным подводным аппаратом.

Ключевые слова: групповое управление, подвижные объекты, подводная среда, движение строем, виртуальный строй, группа с лидером, распределение мест в строю

Введение

Развитие подводной робототехники делает актуальным групповое применение автономных необитаемых подводных аппаратов. Однако в подводной среде существуют ограничения на средства связи и навигации, что усложняет применение групп подводных аппаратов.

В статье [1] приводится обзор опыта разработки и применения интегрированных систем навигации и управления подводных автономных роботов, функционирующих в сложных условиях. Проводится анализ задач, стоящих перед навигационным обеспечением автономных подводных роботов. Дается описание различных типов навигационных систем (НС), включая гидроакустические системы с базовыми маяками и ультракороткой базой и бортовые НС, состоящие из системы счисления пути, инерциальной НС и глобальной НС. Рассмотрены варианты комплексирования и коррекции навигационной информации на борту АПР. Описываются особенности применения гидроакустических систем навигации в условиях высоких широт и дрейфующего ледового поля на примере навигационного комплекса АПР «Клавесин». По результатам испытаний достигнута погрешность навигации около 60 м/ч. Таким образом, статья демонстрирует возможность создания эффективных навигационных систем для АПР, способных работать в сложных и экстремальных условиях.

Работа [2] посвящена обзору и классификации методов и технических средств позиционирования и навигации роботов в водной среде. Выделены факторы, осложняющие навигацию роботов под водой. Рассмотрены инерциальные, гидроакустические, оптические, электромагнитные технологии, а также технология GPS с использованием надводных буев. Описаны особенности применения SLAM в подводной среде и различные типы карт (растровые, геометрические, топологические), которые могут быть созданы с помощью SLAM. Значение представленно-

го обзора заключается в систематизации знаний в области подводной навигации роботов и возможности его использования для выбора оптимальных методов и средств навигации.

В работах [3, 4] предлагаются методы и алгоритмы формирования траекторий движения группы подводных роботов с использованием лидера группы. Рассматривается среда, в которой могут находиться некартографированные препятствия. В статье [3] предлагается метод, который позволяет обходить обнаруженные препятствия, обеспечивая отсутствие коллизий и минимизируя обмен данными между роботами. При этом лидер формирует свою траекторию независимо от остальных подводных роботов. Ведомые роботы получают информацию о текущем положении лидера. Для каждого ведомого заранее задается единственно возможная траектория смещения внутри строя, активируемая при обнаружении препятствия. И лидер, и ведомые роботы оснащены средствами обнаружения препятствий. В статье приводится пример моделирования движения группы из трех подводных роботов в среде с препятствиями с минимизацией обмена данными между роботами. Основное ограничение в данной работе – использование каналов связи между роботами.

В статье [4] такие каналы связи не используются. Ведомые подводные роботы визуально отслеживают положение и ориентацию лидера с помощью бортовых камер. На основе полученной визуальной информации вычисляются оценки положения, скорости и ускорения желаемого положения ведомого относительно лидера. При этом используются полиномиальная аппроксимация и фильтр Калмана для прогнозирования движения целевой точки в промежутках времени между обновлениями визуальных данных. В статье приведен пример моделирования движения робота-ведомого за лидером, движущимся по сложной пространственной траектории. Предлагаемый в статье метод позволяет не использовать гидроакустические каналы связи, однако визуальная система отслеживания лидера имеет существенные ограничения по дальности действия.

Работа [5] посвящена мультиагентным технологиям группового управления подводными роботами. В статье обосновывается архитектура распределенной мультиагентной системы для управления группировкой автономных роботов для решения задачи патрулирования заданной территории. Каждый робот представлен как интеллектуальный агент, способный автономно планировать свои действия, взаимодействовать с другими агентами и адаптироваться к изменяющейся обстановке. Используются одноранговая сеть агентов и метод сопряженных взаимодействий для управления ресурсами в реальном времени. В статье приводится пример задачи поиска обломков самолёта, потерпевшего крушение над морем. Рассмотрен пример распределенного решения задачи патрулирования, где агенты АНПА самостоятельно реагируют на появление нарушителя и координируют свои действия для его обнаружения и идентификации. Основные ограничения на практическое применение метода – это необходимость обмена данными между отдельными агентами.

В статье [6] приведена математическая формализация задачи управления строем группировок подводных роботов. Предложена общая динамическая модель с децентрализованным управлением и дано определение понятия устойчивости формаций с учётом навигационных и динамических ошибок, а также ограничений на ресурсы управления. Для анализа устойчивости применен метод векторных функций Ляпунова [7]. В качестве примеров рассмотрены две конфигурации подводных роботов – цепочка и дерево. Данная статья позволяет проводить количественный анализ влияния различных факторов (ошибки измерений, возмущения, неопределенности параметров) на устойчивость формаций. Однако в ней используется упрощенная модель подводного робота и не учитываются особенности подводной среды.

В работе [8] исследуются две архитектуры системы группового управления: с лидером и без лидера. Предложен метод решения задачи распределения целей для группы подводных роботов и нахождения оптимальных маршрутов их движения с использованием генетического алгоритма. Учитываются ограничения на энергоресурсы роботов и необходимость обеспечения связи между аппаратами в группе. Приведены программная реализация предложенного метода и результаты тестовых расчетов.

Статья [9] посвящена разработке многоуровневого метода планирования траектории движения группы морских робототехнических комплексов, в частности автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в априори неизвестной среде с препятствиями. Алгоритм планирования включает два уровня – глобальный и локальный. На глобальном уровне используется метод случайных деревьев, а на локальном – метод потенциальных полей, обеспечивающий обход препятствий. Проведено численное моделирование группы из четырех подводных роботов, движущихся в среде с препятствиями различной формы. Также проведены натурные испытания группы из одного подводного аппарата и трех безэкипажных катеров. Как и большинство результатов,

предложенный метод требует обмена информацией между элементами группы и решения задачи навигации.

В работах [10–12] рассматриваются различные прикладные задачи, решаемые группами подводных роботов. В статье [10] приводится анализ задач, возникающих при использовании группы автономных необитаемых подводных аппаратов для проведения сейсморазведки в подледных условиях Арктического шельфа, и разработка методов их решения. Рассматривается сценарий сейсморазведки, где часть аппаратов принимает отраженные сигналы от излучателя, а другая часть перемещается для занятия новых позиций, что обеспечивает непрерывность работ. В качестве алгоритма навигации предлагается использовать разностно-дальномерный метод, основанный на измерении задержек прихода сигналов от излучателя в различных точках траектории. Разработана иерархическая многоуровневая схема алгоритмов управления для предотвращения конфликтных ситуаций. Создана математическая модель для тестирования предложенных решений. Координация действий роботов базируется на мультиагентном подходе, что требует обеспечения устойчивой связи с учетом ограничений морской среды.

В статье [11] предлагаются алгоритмы обучения с подкреплением для решения задачи патрулирования области в подводной среде с помощью группы подводных роботов. Каждый аппарат действует на основе локальной информации и обменивается данными с другими аппаратами. Для обучения применяется алгоритм Proximal Policy Optimization (PPO) [12]. Приводятся результаты моделирования различных сценариев патрулирования, включающих обход области одним роботом, двумя роботами и выход одного аппарата из строя и потерю связи. Предложенный подход на основе обучения с подкреплением показал хорошие результаты для решения задачи патрулирования в двумерной среде.

В работе [13] представлены результаты моделирования и натурных испытаний алгоритмов управления, обеспечивающих согласованное движение группы разнородных подводных роботов в неопределенной трехмерной динамической среде. Группа подводных роботов выполняла задачу поиска объектов на дне. При этом использована гетерогенная группа подводных роботов, каждый из которых выполняет свои специализированные функции. Применяется оптическая навигация с использованием меток, расположенных на дне. Связь роботов друг с другом осуществляется через надводные буи (радиоканал) или гидроакустический модем.

Сделанный обзор позволяет сделать вывод, что проблема группового управления подводными роботами в условиях ограничений на связь и частоту получения навигационных данных, при наличии неопределенностей среды является актуальной. В этой связи в данной работе проводится разработка математического описания группы подводных роботов, среды функционирования, подсистем навигации и связи. При оговоренных ограничениях предлагаются алгоритмы группового управления. Предложенные результаты анализируются с использованием методов численного моделирования.

Математическое описание роботов и среды

При математическом описании подводного робота принимается, что его масса не изменяется с течением времени, деформациями корпуса можно пренебречь, а дальность и скорость движения позволяют пренебречь сферичностью Земли. Тогда в качестве уравнений подводного робота используем известные уравнения движения твердого тела в трехмерном пространстве [14–16]:

$$\dot{p} = R(p)v, \tag{1}$$

$$\dot{v} = M^{-1}\left(F_u + F_d\right), \tag{2}$$

$$T_\delta \dot{\delta} = K_u u - \delta, \tag{3}$$

где $p = \left[\chi, y, z, \psi, \theta, \gamma\right]^T$ – вектор линейных и угловых координат робота в неподвижной системе координат; $v = \left[V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z\right]^T$ – вектор линейных и угловых скоростей в связанной с роботом системе координат; $R(p)$ – матрица кинематики твердого тела [14–16]; M – матрица масс и моментов инерции; δ – вектор состояния исполнительных механизмов агента; $F_u = K_\delta \delta$ – вектор управляющих сил и моментов; F_d – вектор прочих сил и моментов, действующих на агента; u – вектор управлений; K_u, T_δ – матрицы постоянных коэффициентов.

Матрица кинематики $R(p)$, которая определяет связь между неподвижной и связанной системами координат, имеет вид:

$$R = \begin{bmatrix} A & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & A_\omega \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\cos\psi\sin\theta\cos\gamma + \sin\psi\sin\gamma & \cos\psi\sin\theta\sin\gamma + \sin\psi\cos\gamma \\ \sin\theta & \cos\theta\cos\gamma & -\cos\theta\sin\gamma \\ -\sin\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\gamma + \sin\psi\sin\theta\cos\gamma & \cos\psi\cos\gamma - \sin\psi\sin\theta\sin\gamma \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$A_\omega = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{\cos\gamma}{\cos\theta} & -\dfrac{\sin\gamma}{\cos y_5} \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \\ 1 & -\tan\theta\cos\gamma & \tan\theta\sin\gamma \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$0_{3\times3}$ – нулевая матрица размерности 3×3.

Неподвижная и связанная системы координат представлены на рис. 1.

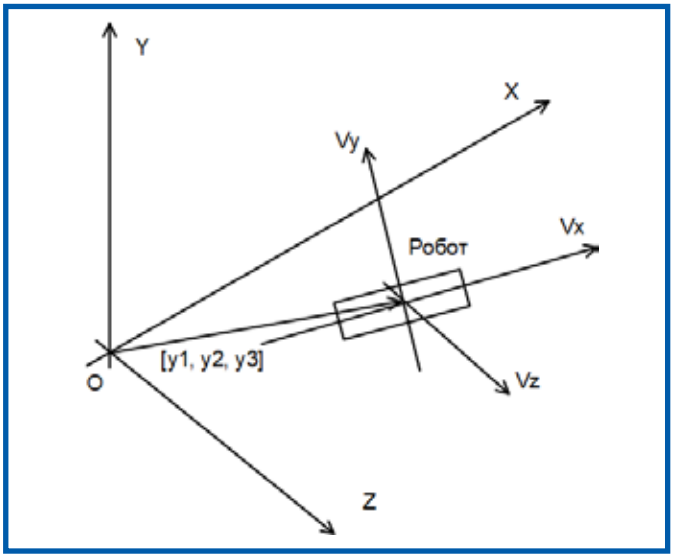


Рис. 1. Неподвижная и связанная системы координат

Таким образом, выражения (1), (4)–(6) образуют уравнения кинематики робота.

Динамика подводного робота представлена уравнением (2). Матрица инерционных параметров имеет вид:

$$M = \begin{bmatrix} m+\lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & mz_T+\lambda_{15} & -my_T+\lambda_{16} \\ \lambda_{12} & m+\lambda_{22} & \lambda_{23} & -mz_T+\lambda_{24} & \lambda_{25} & mx_T+\lambda_{26} \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & m+\lambda_{33} & my_T+\lambda_{34} & -mx_T+\lambda_{35} & \lambda_{36} \\ \lambda_{14} & -mz_T+\lambda_{24} & my_T+\lambda_{34} & J_x+\lambda_{44} & -J_{xy}+\lambda_{45} & -J_{xz}+\lambda_{46} \\ mz_T+\lambda_{15} & \lambda_{25} & -mx_T+\lambda_{35} & -J_{xy}+\lambda_{45} & J_y+\lambda_{55} & -J_{yz}+\lambda_{56} \\ -my_T+\lambda_{16} & mx_T+\lambda_{26} & \lambda_{36} & -J_{xz}+\lambda_{46} & -J_{yz}+\lambda_{56} & J_z+\lambda_{66} \end{bmatrix},$$

где m – масса агента; J_x, J_y, J_z, J_{xy}, J_{xz}, J_{yz} – моменты инерции относительно осей связанной системы координат; λ_{ij} – присоединенные массы; x_T, y_T, z_T – координаты центра масс робота относительно начала координат связанной системы.

Вектор сил и моментов F_d, действующих на робота, состоит из следующих составляющих:

$$F_d = F_g + F_J + F_h + F_A,$$

где F_g – вектор силы тяжести; F_J – вектор инерционных сил; F_h – вектор сил и моментов сопротивления движения; F_A – вектор силы Архимеда.

Вектор силы тяжести определяется в неподвижной системе координат и имеет компоненты $[0, -mg, 0]^T$. С помощью матрицы A (5) находятся его компоненты в связанной системе координат OVxVyVz:

$$F_g = \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ -\cos\theta\cos\gamma \\ \cos\theta\sin\gamma \\ y_T\cos\theta\sin\gamma + z_T\cos\theta\cos\gamma \\ -z_T\sin\theta - x_T\cos\theta\sin\gamma \\ y_T\sin\theta - x_T\cos\theta\cos\gamma \end{bmatrix} mg.$$

Вектор инерционных сил вращающегося твердого тела равен:

$$F_J = \begin{bmatrix} m\left(\omega_z V_y - \omega_y V_z\right) \\ m\left(\omega_x V_z - \omega_z V_x\right) \\ m\left(\omega_x V_y - \omega_y V_x\right) \\ \left(J_y - J_z\right)\omega_y\omega_z \\ \left(J_z - J_x\right)\omega_z\omega_x \\ \left(J_x - J_y\right)\omega_x\omega_y \end{bmatrix}.$$

Сила Архимеда приложена в начале системы координат OVxVyVz и направлена вертикально вверх, а её величина пропорциональна плотности ρ среды и объему U оболочки робота, то есть $F_A = \rho g U$. В этой связи компоненты вектора силы Архимеда в системе OVxVyVz определяются выражениями:

$$F_A = \begin{bmatrix} \rho g U\sin\theta \\ \rho g U\cos\theta\cos\gamma \\ -\rho g U\cos\theta\sin\gamma \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Вектор сил и моментов сопротивления движению, действующих на подводного робота, определяется выражением:

$$F_h = 0{,}5\rho V^2 \begin{bmatrix} Sc_x \\ Sc_y \\ Sc_z \\ Um_x \\ Um_y \\ Um_z \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$S=U^{2/3}$ – характеристическая площадь; V – модуль вектора скорости движения робота относительно среды; c_x, c_y, c_z, m_x, m_y, m_z – аэродинамические или гидродинамические коэффициенты.

Вектор управляющих сил представляется в виде:

$$F_u = \begin{bmatrix} F_{ux} \\ F_{uy} \\ F_{uz} \\ N_{ux} \\ N_{uy} \\ N_{uz} \end{bmatrix} = K_\delta \delta, \qquad (8)$$

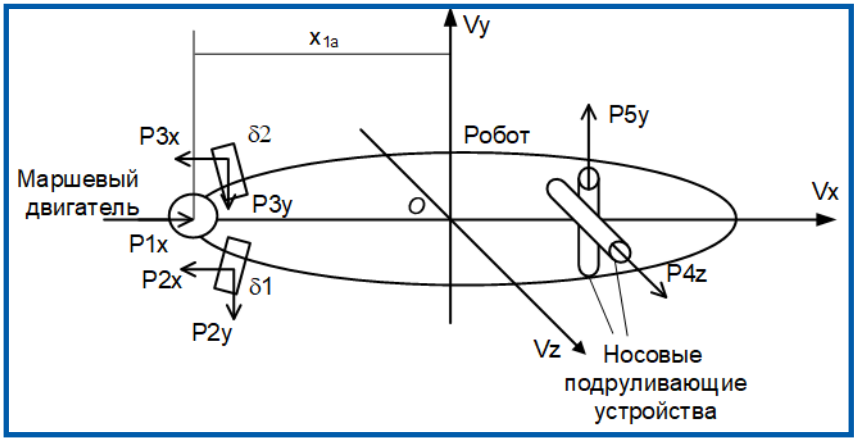


Рис. 2. Движительно-рулевой комплекс робота

где F_{ux}, F_{uy}, F_{uz} – проекции главного вектора управляющих сил на оси системы координат OX1X2X3; N_{ux}, N_{uy}, N_{uz} – проекции главного вектора управляющих моментов относительно осей системы координат OVxVyVz.

Обозначим через вектор $P_i = \left[P_{i,x}, P_{i,y}, P_{i,z}\right]^T$ вектор сил, создаваемых i-м исполнительным механизмом, i=1,2,…n_a, n_a – число исполнительных механизмов. Также обозначим вектор координат i-го исполнительного механизма как $p_{ia} = \left[P_{i,x}, P_{i,y}, P_{i,z}\right]^T$.

Тогда связь главного вектора управляющих сил F_u (8) и проекций управляющих сил, создаваемых исполнительными механизмами, задается соотношением:

$$F_u = K_F P,$$

$$K_F = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & z_{1a} & \cdots & z_{na} & y_{1a} & \cdots & y_{na} \\ z_{1a} & \cdots & z_{na} & 0 & \cdots & 0 & x_{1a} & \cdots & x_{na} \\ y_{1a} & \cdots & y_{na} & x_{1a} & \cdots & x_{na} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix},$$

$$P = \left[P_{1,x} \cdots P_{na,x}\ P_{1,y} \cdots P_{na,y}\ P_{1,z} \cdots P_{na,z}\right]^T.$$

Связь между вектором управляющих сил и моментов и вектором координат δ исполнительных механизмов определяется выражением вида

$$F_u = K_F K_p \delta,$$

где матрица K_p определяется характеристиками конкретных исполнительных механизмов.

В данной статье рассматривается случай, когда подводный робот оснащен маршевым двигателем, носовыми подруливающими устройствами и кормовыми горизонтальными рулями, как показано на рис. 2. Для данного расположения исполнительных механизмов силы, действующие вдоль оси OVx связанной системы координат: тяга маршевого двигателя P_{1x} и силы сопротивления движению хвостового оперения P_{2x}, P_{3x}. Силы, действующие вдоль оси OVy связанной системы координат: силы сопротивления движению хвостового оперения P_{2y}, P_{3y} и сила, создаваемая подруливающим устройством P_{5y}. Сила, действующая вдоль оси OZ связанной системы координат, создается подруливающим устройством P_{4z}.

Маршевый двигатель расположен в хвостовой части в точке с координатами $\left[x_{1a}, 0, 0\right]^T$ в связанной системе OVxVyVz. Хвостовое оперение $\delta 1$ расположено в точке $\left[x_{2a}, 0, z_{2a}\right]^T$, а $\delta 2$ расположено в точке $\left[x_{2a}, 0, -z_{2a}\right]^T$.

Координаты горизонтального носового подруливающего устройства равны $\left[x_{14a}, 0, 0\right]^T$, координаты вертикального носового подруливающего устройства равны $\left[x_{15a}, 0, 0\right]^T$.

Моменты, создаваемые относительно оси OVx связанной системы координат, включают момент хвостового оперения $\delta 1 - P_{2y} z_{2a}$ и момент хвостового оперения $\delta 2 - P_{3y} z_{2a}$. Моменты, создаваемые относительно оси OVy связанной системы координат, включают момент хвостового оперения $\delta 1 - P_{2x} z_{2a}$, момент хвостового оперения $\delta 2 - P_{3x} z_{2a}$, и момент носового горизонтального подруливающего устройства равен $P_{4z} x_{4a}$. Моменты, создаваемые относительно оси OVz связанной системы координат, включают момент хвостового оперения $\delta 1 - P_{2y} x_{2a}$, момент хвостового оперения $\delta 2 - P_{3y} x_{2a}$ и момент носового вертикального подруливающего устройства равен $P_{5y} x_{5a}$.

Таким образом, выражение для управляющих сил и моментов имеет вид:

$$F_u = \begin{bmatrix} P_{1x} - P_{2x} - P_{3x} \\ -P_{2y} - P_{3y} + P_{4y} \\ P_{5z} \\ P_{2y} z_{2a} - P_{3y} z_{2a} \\ P_{2x} z_{2a} - P_{3x} z_{2a} + P_{4z} x_{5a} \\ P_{2y} x_{2a} + P_{3y} x_{2a} + P_{5y} x_{5a} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Рассмотрим теперь математическое описание навигационной системы. Обозначим вектор истинных значений координат подводного робота в неподвижной системе OXYZ в момент времени t как $\left[x(t), y(t), z(t)\right]^T$. Внешняя навигационная система позволяет определять измеренные значения координат $\left[x_и(t_i), y_и(t_i), z_и(t_i)\right]^T$ в моменты времени t_i, $i = 0$, 1, 2, ... с интервалом $\Delta t_{нс} = 1/f_{нс}$. Погрешность определения координат агента в момент времени t обозначим $\left[\Delta x_{нс}, \Delta y_{нс}, \Delta z_{нс}\right]^T$. Бортовая навигационная система позволяет в промежутках между интервалами времени t_i и t_{i+1} определять координаты с погрешностью $\left[\Delta x, \Delta y, \Delta z\right]^T$ и частотой $f_{БНС}$. Как правило, выполняется условие $f_{БНС} \gg f_{НС}$. Таким образом, связь между истинными и измеренными значениями линейных координат робота на интервале времени $\left[t_i, t_{i+1}\right)$ определяется выражением:

$$\begin{bmatrix} x_И(t) \\ y_И(t) \\ z_И(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t_i) \\ y(t_i) \\ z(t_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_{НС}(t_i) \\ \Delta y_{НС}(t_i) \\ \Delta z_{НС}(t_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x(t) \\ \Delta y(t) \\ \Delta z(t) \end{bmatrix}, \quad t_i < t < t_{i+1}. \quad (10)$$

Математическое описание погрешностей $\Delta x_{НС}$, $\Delta y_{НС}$, $\Delta z_{НС}$ имеет следующий вид:

$$\frac{d\xi_{jНС}}{dt} = -\tau_{jНС}\left(\xi_{jНС} - \zeta_j\right),$$
$$\Delta p_{jНС} = k_{jНС}\xi_{jНС},\ p_j = x, y, z, \quad (11)$$

где ζ_j – случайный сигнал типа «белый шум»; $\xi_{jНС}$ – выходной сигнал инерционного звена; $\tau_{jНС}$ – постоянная времени инерционного звена, которая определяет время корреляции шума; $t_{jНС}$ – коэффициент, задающий амплитуду погрешностей; $j = 1, 2, 3$.

Погрешности Δy_1, Δy_2, Δy_3 содержат две составляющие:

$$\Delta p_j = k_j\xi_j + E_j t, \quad j = 1,2,3,$$

где ξ_j – случайные величины, получаемые в результате пропускания сигнала «белый шум» через уравнения инерционного звена первого порядка:

$$\frac{d\xi_j}{dt} = -\tau_j\left(\xi_j - \zeta_j\right), \quad \Delta p_j = k_j\xi_j, \quad p_j = x, y, z, \quad j = 1,2,3, \quad (12)$$

k_j – постоянные коэффициенты, задающие амплитуду погрешностей; E_j – случайная величина, определяющая скорость, с которой накапливаются погрешности измерения координат робота при отсутствии сигнала внешней навигационной системы. Величина E_j генерируется в момент t_i и далее на всем интервале $\left[t_i, t_{i+1}\right)$ остается постоянной.

В связи с тем, что величины $\xi_{jНС}$ и ξ_j генерируются аналогично, будем использовать только одну из них для моделирования погрешностей. Тогда выражение (10) принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} x_И(t) \\ y_И(t) \\ z_И(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t_i) \\ y(t_i) \\ z(t_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{1НС}\xi_{1НС} \\ k_{2НС}\xi_{2НС} \\ k_{3НС}\xi_{3НС} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 t \\ E_2 t \\ E_3 t \end{bmatrix}, t \in \left[t_i, t_{i+1}\right), \quad (13)$$

где случайные величины $\xi_{jНС}$ определяются выражением (10), $j = 1,2,3$, $i = 0, 1, 2, ...$, а E_j генерируются в дискретные моменты времени t_i генератором случайных чисел:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rand_1(t_i) \\ rand_2(t_i) \\ rand_3(t_i) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $rand_j$ – генератор случайного числа.

Таким образом уравнения (11)–(14) представляют собой модель навигационной системы в части измерения линейных положений агента в неподвижной системе координат OXYZ.

На рис. 3 представлен пример моделирования переменной $x_И(t)$ согласно уравнениям (11)–(14) при следующих параметрах: $\tau_{jНС}$=1, $k_{jНС}$=3, ζ_1 = 5*(0.5 – *rand*), ζ_2 = 7*(0.5 – *rand*), ζ_3 = 5*(0.5 – *rand*), $E_1(t_i)$ = 2*(0.5 – *rand*), $E_2(t_i)$ = 2*(0.5 – *rand*), $E_3(t_i)$ = 2*(0.5 – *rand*).

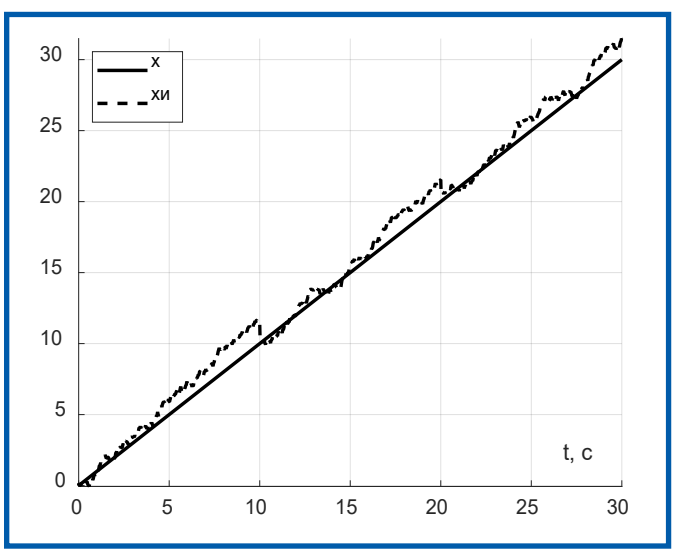


Рис. 3. Координата $x(t)$ и измеренная величина $x_и(t_i)$

Отметим, что уравнения (11)–(13) представляют собой имитационную модель, которая может настраиваться в соответствии с паспортными характеристиками конкретной навигационной системы.

При построении модели навигационной системы в части определения угловых положений, будем полагать, что они измеряются с помощью компаса и гироскопов. Обозначим истинные значения угловых положений в неподвижной системе координат OXYZ как $\left[\psi(t), \theta(t), \gamma(t)\right]^T$. Тогда измеренные значения указанных величин обозначим как $\left[\psi_И(t), \theta_И(t), \gamma_И(t)\right]^T$, причем частота измерений равна $f_{БНС}$.

Запишем уравнение измерения угловых положений агента в неподвижной системе координат следующим образом:

$$\begin{bmatrix}\psi_И(t)\\ \theta_И(t)\\ \gamma_И(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\psi(t)\\ \theta(t)\\ \gamma(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Delta\psi\\ \Delta\theta\\ \Delta\gamma\end{bmatrix}.$$

где $\left[\Delta\psi, \Delta\theta, \Delta\gamma\right]^T$ – погрешности навигационной системы при определении угловых положений в неподвижной системе координат OXYZ.

Погрешности $\left[\Delta\psi, \Delta\theta, \Delta\gamma\right]^T$ по угловым координатам моделируются аналогично погрешностям по линейным координатам, путем пропускания сигнала «белый шум» через уравнения инерционного звена первого порядка вида (11) при $j = 4,5,6$.

Погрешности измерения скоростей моделируются аналогично согласно уравнениям:

$$\begin{bmatrix}x_И(t)\\ y_И(t)\\ z_И(t)\\ \omega_{xИ}(t)\\ \omega_{yИ}(t)\\ \omega_{zИ}(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x(t)\\ y(t)\\ z(t)\\ \omega_x(t)\\ \omega_y(t)\\ \omega_z(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\\ \Delta z\\ \Delta\omega_z\\ \Delta\omega_y\\ \Delta\omega_z\end{bmatrix},$$

где Δx_j – погрешности, моделируемые в соответствии с уравнением (12).

При моделировании системы связи будем полагать, что сообщения передаются от лидера ведомым группам одним пакетом. Обозначим момент времени окончания передачи сообщения через $t_{перi}$. Также обозначим скорость распространения сигнала как $V_{сиг}$. Расстояние от j-го робота, получающего информацию, до i-го робота, передающего информацию, обозначим как D_{ij}. Тогда момент получения сообщения j-м роботом определяется выражением:

$$t_{прij} = t_{перi} + V_{сиг} / D_{ij}.$$

Будем полагать, что в среде существует вероятность сбоя сообщения. Обозначим ее как $P_{сбой}$. Обозначим событие «Получение сообщения» как $S_{сооб}$:

$$R_s = rand(0,1),\ \ S_{сооб} = \begin{cases}1, & если\ R_s > P_{сбой},\\ 0, & если\ R_s \le P_{сбой},\end{cases}$$

где $rand(0,1)$ – генератор случайного числа в диапазоне [0, 1]; $S_{сооб} = 1$, если сообщение получено успешно; $S_{сооб} = 0$, если сообщение не получено.

При моделировании среды будем полагать плотность воды постоянной, так как согласно [17] изменение температуры на 10° приводит к изменению плотности на 0,23 %, а изменение глубины на 100 м приводит к изменению плотности на 0,046 %.

Алгоритмы управления при движении группы роботов строем

Рассматривается группа из N подводных роботов (ПР). Первый подводный робот является лидером группы. Предполагается, что в начальный момент времени t_0 ПР располагаются так, что в горизонтальной плоскости через лидера можно провести прямую, делящую среду на две полуплоскости. При этом все ПР группы располагаются в одной полуплоскости позади лидера.

Каждый ПР оснащен бортовой навигационной системой, которая с заданной частотой $f_{БНС}$ измеряет вектор линейных положений $\left[x, y, z\right]^T$, вектор угловых положений $\left[\psi, \theta, \gamma\right]^T$, вектор линейных скоростей $\left[V_x, V_y, V_z\right]^T$ и угловых скоростей $\left[\omega_x, \omega_y, \omega_z\right]^T$ с погрешностями, описанными в разделе «Математическое описание роботов и среды». Среда функционирования оснащена внешними навигационными станциями, которые позволяют определить с частотой $f_{НС}$ вектор положения ПР $\left[x, y, z\right]^T$ с погрешностями $\left[\Delta x_{НС}, \Delta y_{НС}, \Delta z_{НС}\right]^T$, описываемыми выражением (11).

Лидер с частотой $f_{ЛИД}$ передает собственные координаты другим агентам. Дальность передачи координат обозначается как Rсв. Предполагается, что агент является членом группы, если он располагается от лидера на расстоянии, не превышающем величину Rсв.

Задачей группы является формирование строя, который представляет собой виртуальную структуру [18, 19] в виде шеренги с заданным между ПР расстоянием, и поддержание строя при движении. Лидер группы движется по заданной программной траектории с заданной скоростью. Относительно него фор-

мируется виртуальный строй. Ведомые подводные роботы имеют назначенные заранее места в виртуальном строю. Ставится задача синтезировать управление движением ПР при их перемещении в строю и исследовать влияние погрешностей навигации и частоты обновления навигационных данных на точность поддержания строя.

Точность поддержания строя оценивается среднеквадратическим отклонением при прямолинейном движении с постоянной скоростью. При выполнении поворотов точность оценивается максимальным отклонением ПР от заданного места в строю.

Для того чтобы минимизировать вероятность столкновения подводных роботов друг с другом, формирование строя будем осуществлять в соответствии со следующими этапами:

1) распределение роботов по ширине строя;

2) стабилизация глубины движения роботов;

3) выравнивание шеренги роботов по фронту;

4) движение строя подводных роботов в заданном направлении

5) разворот группы роботов на заданный угол курса.

При распределении роботов по ширине строя робот-лидер движется прямолинейно и равномерно с некоторой скоростью $V_1 < V_{max}$. Пояснения к построению роботов в шеренгу представлены на рис. 4.

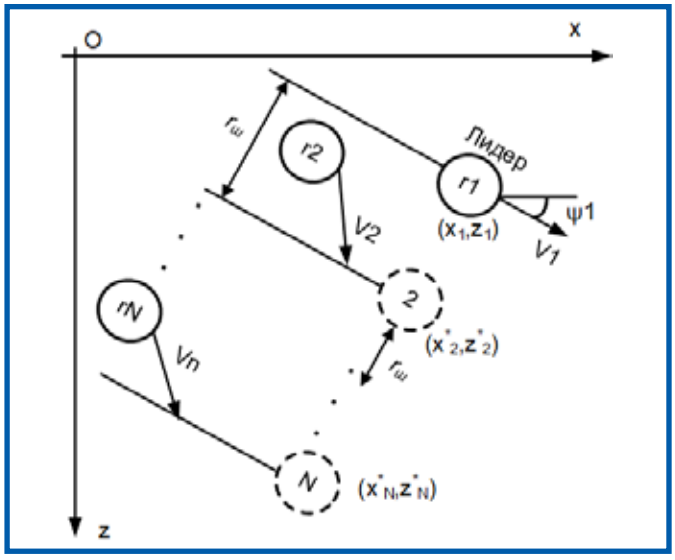


Рис. 4. Пояснения к построению роботов в шеренгу

Точки (2, 3, …, N) являются точками виртуального строя. Они рассчитываются в соответствии с матрицами однородных преобразований:

$$\begin{bmatrix} x_k^* \\ z_k^* \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi_1 & -\sin\psi_1 & 0 \\ \sin\psi_1 & \cos\psi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_1 \\ 0 & 1 & -z_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ r_\omega \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$k = 2,3,\ldots,N. \quad (15)$$

Уравнение прямой, проходящей через точку (x_1, z_1) в направлении ψ_1, имеет вид:

$$z - z_1 = \tan\psi_1 (x - x_1). \quad (16)$$

Уравнение прямой, проходящей через точку (x_k^*, z_k^*) (14) параллельной прямой (16), имеет вид:

$$z_1 = \tan\psi_1 x_1 + z_k^* - \tan\psi_1 x_k^*, \; k = 2,3,\ldots,N. \quad (17)$$

Прямая (17) определяют желаемое направление движения k-го подводного робота в горизонтальной плоскости. По уравнениям (17) определяется задающее воздействие по углу курса подводного робота в соответствии с выражением:

$$\psi_k^* = \begin{cases} \psi_1 - \dfrac{\pi}{2}, & r_k > r_0 \\ \psi_1 - \dfrac{\pi}{2} + \dfrac{\pi}{2}\dfrac{r_0 - r_k}{r_0}, & r_k \le r_0 \end{cases}, \; k = 2,3,\ldots,N, \quad (18)$$

где r_k – расстояние от k-го подводного робота до прямой (16); r_0 – расстояние, на котором начинается поворот подводного робота на заданный курс ψ_1.

Выражения (15)–(18) позволяют определить желаемый курс подводного робота ψ_k^*.

Вычисление желаемого угла дифферента производится в соответствии со следующим выражением:

$$\theta_k^* = k_\theta (y_k - y^*), \; k = 2,3,\ldots,N, \quad (19)$$

где θ_k^* – желаемый дифферент подводного робота; y^* – заданная глубина движения.

Желаемый крен подводного робота полагается равным нулю, т.е.

$$\gamma_k^* = 0, \; k = 2,3,\ldots,N. \quad (20)$$

Управление скоростью подводных роботов осуществляется с целью выравнивания шеренги по фронту. Желаемая скорость движения определяется выражением:

$$V_k^* = \begin{cases} V_{max}, & e_k < -e_0 \\ V_{max} + (V_{min} - V_{max})\dfrac{e_k + e_0}{2e_0}, & -e_0 \le e_k \le e_0, \\ V_{min}, & e_k > e_0 \end{cases}$$

$$k = 2,3,\ldots,N, \quad (21)$$

где V_{max} – максимальная скорость движения подводного робота; V_{min} – минимальная скорость движения подводного робота; e_k – ошибка положения

робота относительно фронта робота; e_0 – значение ошибки, при котором превышается максимальное / минимальное значение скоростей.

При этом номинальная скорость строя равна $(V_{max} + V_{min})/2$.

Выражения (15)–(21) позволяют рассчитать желаемые значения курса, дифферента, крена и скорости движения подводного аппарата.

Для синтеза регулятора, обеспечивающего движение подводного робота в соответствии с задающими воздействиями (15)–(21) воспользуемся методом позиционно-траекторного управления [16, 20, 21]. В соответствии с данным методом сформируем вектор желаемого состояния k-го робота:

$$[\psi_k,\ \theta_k,\ \gamma_k]^T = [\psi_k^*,\ \theta_k^*,\ \gamma_k^*]^T, \quad (22)$$

$$x_k = x_k^*, k = 1,2,..,N. \quad (23)$$

В соответствии с выражениями (22), (23), сформируем ошибки по угловым положениям и скорости движения в следующем виде:

$$e_{1k} = A_1 p_k + A_2,\ e_{2k} = A_3 v_k + A_4, \quad (24)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\ A_2 = \begin{bmatrix} -\psi_k^* \\ -\theta_k^* \\ -\tilde{a}_k^* \end{bmatrix},\ A_3 = 1,$$

$$A_4 = -x_k^*.$$

Введем дифференциальные уравнения, описывающие желаемое изменение ошибок (24) в следующем виде:

$$\ddot{e}_1 + T_1\dot{e}_1 + T_0 e_1 = 0, \quad (25)$$

$$\dot{e}_2 + T_2 e_2 = 0, \quad (26)$$

где T_0, T_1, T_2 – положительно определенные матрицы.

Продифференцировав выражения (24), в силу модели объекта (1)–(3) из выражений (25), (26) получим выражение для вектора управляющих воздействий:

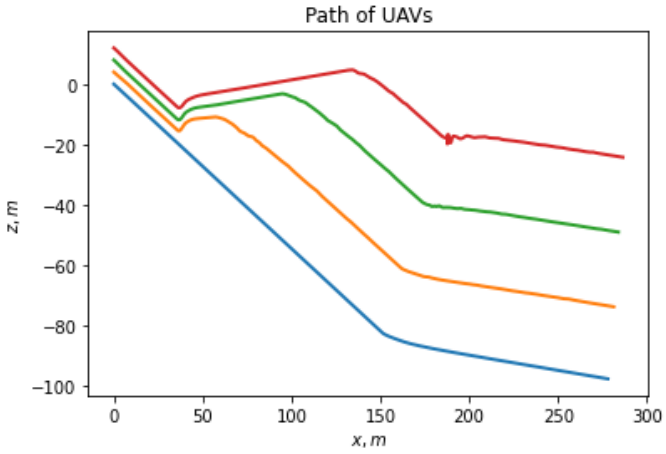
$$\begin{bmatrix} A_1 R \\ A_3 \end{bmatrix} M^{-1} F_u = -\begin{bmatrix} A_1 R \\ A_3 \end{bmatrix} M^{-1} F_d - \begin{bmatrix} A_1 \dot{R}x + T_1\dot{e}_1 + T_0 e_1 \\ T_2 e_2 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Выражение (27) позволяет вычислить вектор F_u. Переход к силам, создаваемым исполнительными механизмами, осуществляется в соответствии с (9).

Моделирование движения группы подводных роботов

Численное моделирование проведено на языке Python. Моделировалось движение двух линий подводных роботов по 4 робота в каждой линии. При моделировании изменялось заданное расстояние между роботами, среднеквадратическая погрешность навигационной системы и время корреляции погрешностей навигации.

На рис. 5–7 и в таблице представлены результаты моделирования движения группы подводных роботов при погрешности навигации 7 м, заданном расстоянии между роботами 25 м, времени корреляции шумов навигации 0,2 с. Желаемая глубина движения равна 20 м. Скорость движения строя равна 1,0 м. На рис. 5 представлены траектории движения роботов в горизонтальной плоскости.



а б

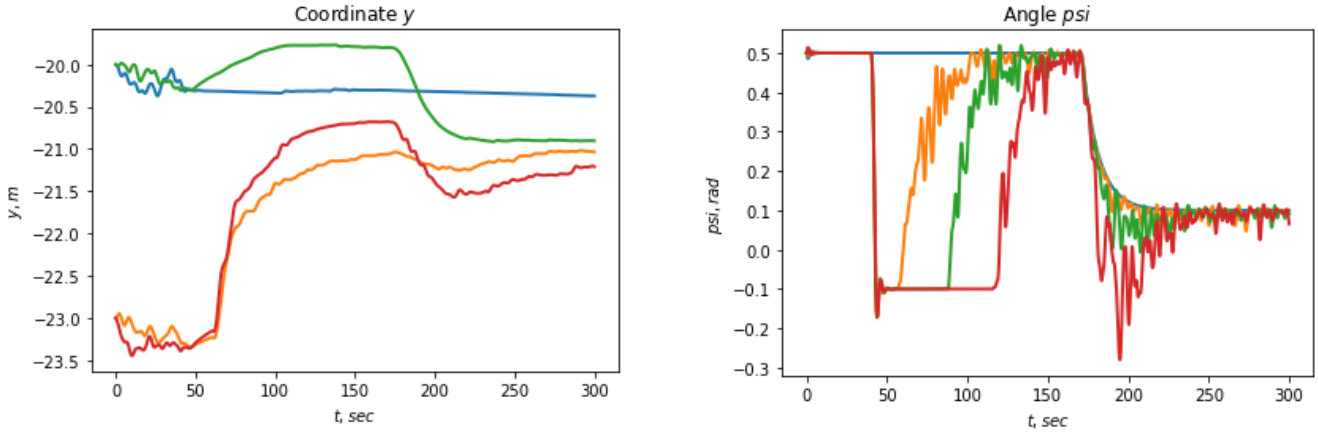
Рис. 5. Траектории движения подводных роботов: *а – пер*вая линия строя, б – вторая линия строя

В начальный момент времени роботы находятся на различных глубинах (20 и 23 м), на расстоянии 4 м друг от друга в горизонтальной плоскости. Движение разбито на этап стабилизации параметров движения, этап расхождения на заданное расстояние, этап изменения глубины и этап разворота и построения для движения в заданном направлении. На рис. 5 и далее синяя линия соответствует подводному роботу-лидеру, а остальные аппараты ведомые.

На рис. 6 представлены изменения глубины и курса подводных роботов первой линии строя.

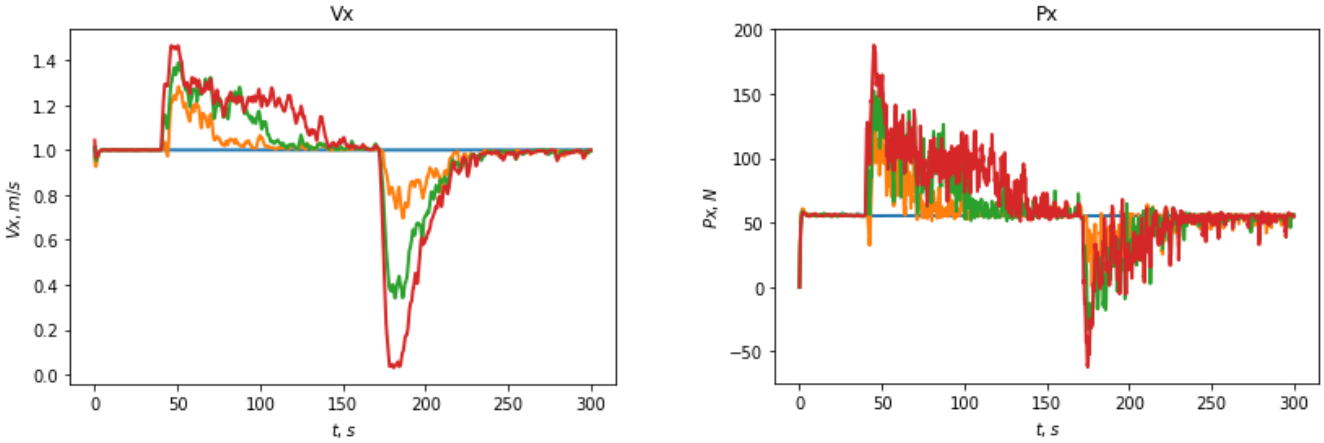
Как видно из рис. 6, наибольшие колебания глубины движения происходят в переходных режимах при выполнении маневров. Максимальная ошибка по глубине составляет около 3,5 м.

На рис. 7 представлены продольные скорости и тяги двигателей подводных роботов.



а б

Рис. 6. Глубины (а) и курс (б) роботов



а б

Рис. 7. Продольные скорости (а) и тяги двигателей (б) роботов

Максимальные скорости движения подводных роботов заданы 2,0 м/с, поэтому ограничений сверху достигнуто в процессе моделирования не было. Минимальная скорость принята 0,05 м/с. Двигатели подводных роботов создают тяги, ограниченные 200 Н*м, двигатели приняты реверсивными. При моделировании дополнительно учтена динамика исполнительных механизмов в виде инерционных звеньев с постоянной времени 0,5 с:

$$\dot{P}_{id} = -\frac{1}{T_{di}}\left(P_{id} - P_i\right),$$

где P_{id} – вектор тяги, вырабатываемый маршевым двигателем k-го робота, P_i – вектор, вычисленный в регуляторе k-го робота.

Тот факт, что ошибка системы управления не превышает ошибку навигации, объясняется тем, что время корреляции моделируемого навигационного сигнала составляет 0,2 с, что соответствует высокочастотному шуму. Увеличение времени корреляции шума приводит к заметному возрастанию ошибки системы управления. Так, траектории движения подво-

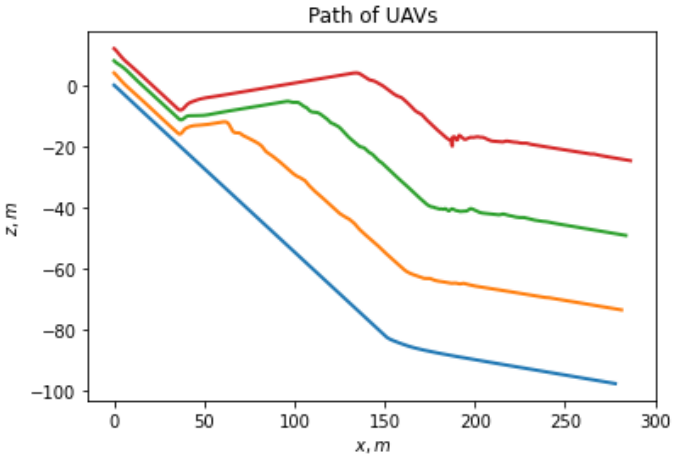


Рис. 8. Траектории движения роботов при времени корреляции шумов 2 с

дных роботов при времени корреляции шума, равном 2 с, представлены на рис. 8.

Время корреляции шума может интерпретироваться как частота обновления данных от внешней навигационной системы. Между соседними измерениями навигация подводного робота осуществляется по данным инерциальной навигационной системы, для которой характерно накопление ошибок.

В таблице представлены результаты исследования влияния интервала обновления данных внешней навигационной системы на погрешность замкнутой системы управления подводных роботов.

Влияние интервала обновления данных внешней навигационной системы на погрешность замкнутой системы

Координата	Интервал обновления данных	Среднеквадратическая погрешность навигационной системы, м		
		2,0	5,0	8,0
Ошибка по координате y2	Δtнав=0,2 с	2,77	6,15	9,84
	Δtнав=0,5 с	2,67	6,23	9,99
	Δtнав=1,0 с	3,6	6,84	10,42
Ошибка по координате y1	Δtнав=0,2 с	7,17	8,15	10,01
	Δtнав=0,5 с	6,77	7,74	11,3
	Δtнав=1,0 с	6,57	8,88	12,43
Ошибка по координате y3	Δtнав=0,2 с	3,77	6,28	10,07
	Δtнав=0,5 с	4,57	6,93	12,21
	Δtнав=1,0 с	4,17	7,46	13,40

Из данных таблицы следует, что с ростом погрешности навигационной системы растет и погрешность поддержания заданного положения в строю группой подводных аппаратов. При этом наибольшая точность обеспечивается по каналу управления высотой, т.к. она поддерживается независимо друг от друга. Наибольшая погрешность наблюдается в каналах управления по координатам y_1 и y_3, что связано с необходимостью отслеживать группой положения лидера. В качестве погрешности навигационной системы выбрано среднеквадратичное отклонение, а в качестве погрешности системы управления – усредненное по реализациям значение от максимальных ошибок в процессе полета.

Отметим, что погрешность системы группового управления с лидером слабо зависит от интервала обновления навигационных данных до того момента, пока он не приблизится к постоянной времени замкнутой системы. После этого система управления резко теряет качество и устойчивость. Так, в моделируемом примере потеря устойчивости наблюдается при интервале обновления навигационных данных около 2,0 с, что примерно соответствует постоянной времени замкнутой системы, равной 2,5 с.

Заключение

В данной статье представлены математическое описание подводных роботов, алгоритмы группового управления движением и результаты численного моделирования. Рассмотрена нелинейная математическая модель, позволяющая рассматривать многосвязное движение подводного робота и моделировать эффекты взаимодействия со средой. Предложено математическое описание исполнительных механизмов, позволяющее моделировать произвольный движительно-рулевой комплекс подводного робота с учетом его инерционных характеристик. Предложенный в статье алгоритм группового управления движением учитывает ограничения на каналы связи, предполагается, что передавать информацию может только подводный робот – лидер группы. Также предполагается, что область функционирования оборудована навигационной системой, позволяющей подводным роботам с заданным интервалом времени определять свои координаты. Разработанная система группового управления позволяет осуществлять движение шеренгой, в которой каждый робот стремится занять заранее предписанное положение. Проведенное численное моделирование показало, что погрешности замкнутой системы управления при интервале обновления навигационных данных меньшем, чем постоянная времени замкнутой системы, примерно соответствует погрешности навигационной системы.

Влияние возмущений среды в данной статье не рассмотрено. Это влияние может быть учтено применением методов адаптации, которые рассмотрены в работе [21].

Основное ограничение рассмотренного в данной статье подхода заключается в отсутствии у отдельного подводного робота информации о положении других роботов, кроме лидера. Этот факт обусловливает возможность возникновения коллизий между роботами. Учет таких коллизий возможен только путем обмена данными о собственных координатах между роботами группы, что налагает определенные требования к оборудованию и каналам связи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00063, «Теоретические основы и методы группового управления безэкипажными подводными аппаратами», https://rscf.ru/project/24-19-00063/ на базе ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. Навигация и управление автономных подводных роботов // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3. С. 164–169.

2. Ле В.Н., Ронжин А.Л. Способы и технические средства позиционирования и навигации роботов в водной среде // Изв. Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 167–178. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178.

3. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Разработка метода формирования траекторий движения группы подводных роботов в среде с препятствиями во время их обхода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. № 21(6). С. 403–411. URL: https://mech.novtex.ru/jour/article/view/824

4. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Метод управления движением АНПА-ведомого на основе визуальной информации о положении АНПА-лидера // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 4(42). С. 25–39. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_03

5. Машошин А.И., Скобелев П.О. Применение мультиагентных технологий для управления группой автономных необитаемых подводных аппаратов // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1(174). С. 45–59.

6. Козлов Р.И., Максимкин Н.Н., Киселев Л.В., Ульянов С.А. Устойчивость конфигураций группового движения автономных подводных роботов в условиях неопределённости // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 1(9). С. 40–46.

7. Матросов В.М. Метод векторных функций Ляпунова в системах с обратной связью // Автоматика и телемеханика. 1972. № 9. С. 63–75.

8. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Бычков И.В., Максимкин Н.Н., Хмельнов А.Е., Кензин М.Ю. Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2(8). С. 34-43.

9. Маевский А.М., Морозов Р.О., Рыжов В.А., Горелый А.Е. Разработка многоуровневой системы планирования траектории движения группы АНПА в неизвестной среде с препятствиями // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2021. № 1. С. 30–47. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-30-47

10. Мартынова Л.А., Конюхов Г.В., Пашкевич И.В., Рухлов Н.Н. Особенности группового управления АНПА при ведении сейсморазведки // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2017. № 9. С. 21–34.

11. Спорышев М.С., Щербатюк А.Ф. О некоторых алгоритмах решения задачи патрулирования подводной среды с помощью группы взаимодействующих АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4(30). С. 21–26. DOI: 10.25808/24094609.2019.30.4.003

12. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., Klimov O. Proximal Policy Optimization Algorithms // ArXiv. 2017. Vol. abs/1707.06347.

13. Semenov N.N., Chemodanov M.N., Shestakov I.V., Akhmetov D.B. Testing a heterogeneous group of autonomous unmanned underwater vehicles for search of objects on the bottom // Computing, Telecommunications and Control. 2023. No. 16(3). C. 39–53. DOI: 10.18721/JCSTCS.16304

14. Pshikhopov V., Krukhmalev V., Medvedev M., Neydorf R. Estimation of Energy Potential for Control of Feeder of Novel Cruiser/Feeder MAAT System // SAE Technical Paper. 2012. DOI:10.4271/2012-01-2099

15. Пантов Е.И., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 209 с.

16. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Fedorenko R.V., Krukhmalev V.A., Gurenko B.V. Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship // IFAC-PapersOnline. 2014. P. 8953–8958.

17. Зори А.А., Корнеев В.Д., Хламов М.Г. Методы, средства, системы измерения и контроля параметров водных средств. Донецк: ДонГТУ, 2000. 388 с.

18. Tan K-H., Lewis M. Virtual Structures for High-Precision Cooperative Mobile Robotic Control // Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Osaka; Japan. 1996. P. 132–139.

19. Морозова Н.С. Виртуальные формации и виртуальные лидеры в задаче о движении строем группы роботов // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2015. № 1. С. 135–149.

20. Пшихопов В.Х., Суконкин С.Я., Нагучев Д.Ш., Стракович В.В., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В., Костюков В.А., Волощенко Ю.П. Автономный подводный аппарат «Скат» для решения задач поиска и обнаружения заиленных объектов // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3(104). С.153–162.

21. Pshikhopov V., Medvedev M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks // Automation and Remote Control. 2020. Vol. 81, No. 11. P. 2078–2093. https://doi.org/10.1134/S0005117920110090

Справка об авторах

МЕДВЕДЕВ Илья Михайлович, студент
Южный федеральный университет
Адрес: 347922, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовкий, 44
Область научных интересов: программирование и вычислительные системы
E-mail: imedvede@sfedu.ru
Тел.: +7(8634) 37-16-94

МЕДВЕДЕВ Михаил Юрьевич, д.т.н., доцент, в. н. с.
Южный федеральный университет
Адрес: 347922, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовкий, 44
Область научных интересов: адаптивное и робастное управление подвижными объектами, интеллектуальные системы управления
E-mail: medvmihal@sfedu.ru
Тел.: +7(8634) 37-16-94
ORCID: 0000-0003-2310-3216

ПШИХОПОВ Вячеслав Хасанович, д.т.н., профессор, директор НИИ робототехники и процессов управления
Южный федеральный университет
Адрес: 347922, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовкий, 44
Область научных интересов: управление мобильными роботами в неопределенных средах
E-mail: pshichop@rambler.ru
Тел.: +7(8634) 37-16-94
ORCID: 0000-0003-3369-3803

DOI: 10.37102/1992-4429_2024_49_03_04

ALGORITHMS FOR GROUP CONTROL OF UNDERWATER MOBILE OBJECTS

I.M. Medvedev, M.Y. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov

The problem of formation control is relevant when searching for objects, surveying a given area, and group monitoring. In the underwater environment, this problem is complicated by restrictions on the frequency of receiving navigation data and the speed of information exchange between underwater robots. The purpose of this article is to develop and study group control algorithms that ensure the given formation and the maintenance of this formation during movement. The article provides an overview of the results in the field of group control of underwater vehicles, provides a mathematical model of the object, navigation system, underwater environment and communication system. The equations of kinematics and dynamics of a solid body in three-dimensional space, supplemented by equations of actuators, are used as a mathematical model. Algorithms for the distribution of moving objects in formation and nonlinear control algorithms for moving in a line are proposed. When constructing the devices, it is assumed that there is a group leader who transmits his coordinates to the rest of the underwater robots. Motion control is synthesized by the method of positional trajectory control in the form of a function of external coordinates. A study was carried out using numerical methods, during which the process of the formation and movement along the trajectory described by straight line segments was studied. The influence of errors in the navigation system and the frequency of data updates on the error of maintaining a given position by a separate underwater robot is investigated.

Keywords: group control, mobile objects, underwater environment, movement in formation, virtual formation, group with a leader, allocation of places in formation

References

1. Inzarcev A.V., Kiselev L.V., Matvienko Ju.V. Navigacija i upravlenie avtonomnyh podvodnyh robotov. Izv. JuFU. Tehnicheskie nauki. 2010. No. 3. P. 164–169. (In Russ.).

2. Le V.N., Ronzhin A.L. Sposoby i tehnicheskie sredstva pozicionirovanija i navigacii robotov v vodnoj srede. Izv. Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN. 2023. No. 6(116). P. 167–178. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178. (In Russ.).

3. Filaretov V.F., Juhimec D.A. Razrabotka metoda formirovanija traektorij dvizhenija gruppy podvodnyh robotov v srede s prepjatstvijami vo vremja ih obhoda. Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. 2020. No. 21(6). P. 403–411. URL: https://mech.novtex.ru/jour/article/view/824. (In Russ.).

4. Filaretov V.F., Juhimec D.A. Metod upravlenija dvizheniem ANPA-vedomogo na osnove vizual'noj informacii o polozhenii ANPA-lidera. Podvodnye issledovanija i robototehnika. 2022. No. 4(42). P. 25–39. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_03. (In Russ.).

5. Mashoshin A.I., Skobelev P.O. Primenenie mul'tiagentnyh tehnologij dlja upravlenija gruppoj avtonomnyh neobitaemyh podvodnyh apparatov. Izv. JuFU. Tehnicheskie nauki. 2016. No. 1(174). P. 45–59. (In Russ.).

6. Kozlov R.I., Maksimkin N.N., Kiselev L.V., Ul'janov S.A. Ustojchivost' konfiguracij gruppovogo dvizhenija avtonomnyh podvodnyh robotov v uslovijah neopredeljonnosti. Podvodnye issledovanija i robototehnika. 2010. No. 1(9). P. 40–46. (In Russ.).

7. Matrosov V.M. Metod vektornyh funkcij Ljapunova v sistemah s obratnoj svjaz'ju. Avtomatika i telemehanika. 1972. No. 9. P. 63–75. (In Russ.).

8. Kiselev L.V., Inzarcev A.V., Bychkov I.V., Maksimkin N.N., Hmel'nov A.E., Kenzin M.Ju. Situacionnoe upravlenie gruppirovkoj avtonomnyh podvodnyh robotov na osnove geneticheskih algoritmov. Podvodnye issledovanija i robototehnika. 2009. No. 2(8). P. 34-43. (In Russ.).

9. Maevskij A.M., Morozov R.O., Ryzhov V.A., Gorelyj A.E. Razrabotka mnogourovnevoj sistemy planirovanija traektorii dvizhenija gruppy ANPA v neizvestnoj srede s prepjatstvijami. Izv. JuFU. Tehnicheskie nauki. 2021. No. 1. P. 30–47. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-30-47. (In Russ.).

10. Martynova L.A., Konjuhov G.V., Pashkevich I.V., Ruhlov N.N. Osobennosti gruppovogo upravlenija ANPA pri vedenii sejsmorazvedki. Izv. JuFU. Tehnicheskie nauki. 2017. No. 9. S. 21–34. (In Russ.).

11. Sporyshev M.S., Shherbatjuk A.F. O nekotoryh algoritmah reshenija zadachi patrulirovanija podvodnoj sredy s pomoshh'ju gruppy vzaimodejstvujushhih ANPA. Podvodnye issledovanija i robototehnika. 2019. No. 4(30). P. 21–26. DOI: 10.25808/24094609.2019.30.4.003. (In Russ.).

12. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., Klimov O. Proximal Policy Optimization Algorithms. ArXiv. 2017. Vol. abs/1707.06347.

13. Semenov N.N., Chemodanov M.N., Shestakov I.V., Akhmetov D.B. Testing a heterogeneous group of autonomous unmanned underwater vehicles for search of objects on the bottom. Computing, Telecommunications and Control. 2023. No. 16(3). P. 39–53. DOI: 10.18721/JCSTCS.16304

14. Pshikhopov V., Krukhmalev V., Medvedev M., Neydorf R. Estimation of Energy Potential for Control of Feeder of Novel Cruiser/Feeder MAAT System. SAE Technical Paper. 2012. doi:10.4271/2012-01-2099

15. Pantov E.I., Mahin N.N., Sheremetov B.B. Osnovy teorii dvizhenija podvodnyh apparatov. L.: Sudostroenie, 1973. 209 p. (In Russ.).

16. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Fedorenko R.V., Krukhmalev V.A., Gurenko B.V. Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship. IFAC-PapersOnline. 2014. P. 8953 – 8958.

17. Zori A.A., Korneev V.D., Hlamov M.G. Metody, sredstva, sistemy izmerenija i kontrolja parametrov vodnyh sredstv. Doneck: DonGTU, 2000. 388 p. (In Russ.).

18. Tan K-H., Lewis M. Virtual Structures for High-Precision Cooperative Mobile Robotic Control. Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. 1996. P. 132–139.

19. Morozova N.S. Virtual'nye formacii i virtual'nye lidery v zadache o dvizhenii stroem gruppy robotov. Vestn. Sankt-Peterburgskogo un-ta. Serija 10. Prikladnaja matematika. Informatika. Processy upravlenija. 2015. No. 1. P. 135–149. (In Russ.).

20. Pshihopov V.H., Sukonkin S.Ja., Naguchev D.Sh., Strakovich V.V., Medvedev M.Ju., Gurenko B.V., Kostjukov V.A., Voloshhenko Ju.P. Avtonomnyj podvodnyj apparat «Skat» dlja reshenija zadach poiska i obnaruzhenija zailennyh ob#ektov. Izv. JuFU. Tehnicheskie nauki. 2010. No. 3(104). P. 153–162. (In Russ.).

21. Pshikhopov V., Medvedev M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks. Automation and Remote Control. 2020. Vol. 81, No. 11. P. 2078–2093. https://doi.org/10.1134/S0005117920110090

Information about the authors

MEDVEDEV Ilya Mikhailovich, student
Southern Federal University
Work address: 347922, Russia, Taganrog, Nekrasovsky, 44.
Research Interests: programming and computing systems
E-mail imedvede@sfedu.ru
Phone: +7(8634) 37-16-94
ORCID: (mandatory), other author identifiers (optional).

MEDVEDEV Mikhail Yurjevich, Doctor of Technical Science, Professor, Leading Reasercher
Southern Federal University
Work address: 347922, Russia, Taganrog, Nekrasovsky, 44.
Research Interests: adaptive and robust control of mobile objects, intelligent control systems
E-mail: medvmihal@sfedu.ru
Phone: +7(8634) 37-16-94
ORCID: 0000-0003-2310-3216

PSHIKHOPOV Viacheslav Khasanovich, Doctor of Technical Science, Professor, Director of Scientific Research Institute of Robotics and Control Processes
Southern Federal University
Work address: 347922, Russia, Taganrog, Nekrasovsky, 44.
Research Interests: control of mobile robots in uncertain environment
E-mail: pshichop@rambler.ru
Phone: +7(8634) 37-16-94
ORCID: 0000-0003-3369-3803

Recommended citation:

Medvedev I.M., Medvedev M.Y., Pshikhopov V.Kh. ALGORITHMS FOR GROUP CONTROL OF UNDERWATER MOBILE OBJECTS. Underwater investigations and robotics. 2024. No. 3 (49). P. 38–51. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_49_03_04. EDN: MFYMAS.