

DOI 10.21672/2074-1707.2021.53.1.106-112
УДК 551.46.077

УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ ВЫСОКОМАНЕВРЕННОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАТЕРНИОНОВ

Статья поступила в редакцию 12.02.2021, в окончательном варианте – 26.04.2021.

Гаврилина Екатерина Андреевна, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5, стр. 1, ассистент, ORCID 0000-0002-9919-5287, e-mail: ekaterina.a.gavrilina@gmail.com

Вельтищев Вадим Викторович, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5, стр. 1, доктор технических наук, доцент, ORCID 0000-0001-6245-839X, e-mail: vvv@bmstu.ru

Традиционно необитаемые подводные аппараты эксплуатируют при малых углах наклона (дифферента и крена). Однако появляются задачи, требующие высокой маневренности и управляемости подводного аппарата во всем диапазоне углов ориентации. В то же время традиционные системы управления используют углы Эйлера – Крылова и имеют ограничения, связанные с вырождением кинематических уравнений при угле дифферента $\pm 90^\circ$, неоднозначностью углов Эйлера – Крылова и ухудшением качества работы системы при больших наклонах НПА по дифференту и крену. Таким образом, остро встает вопрос разработки методики синтеза системы управления высокоманевренными необитаемыми подводными аппаратами. В работе проводится обзор и сравнительный анализ существующих подходов к управлению ориентацией, на основании которого выбран подход с использованием кватернионов. Закон управления ориентацией на основе кватернионов, апробирован в ходе натурных испытаний на гибридном необитаемом подводном аппарате «Износ», разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты, полученные в ходе испытаний, приводятся в статье. Подход на основе кватернионов имеет простую структуру, лучшие показатели качества переходных процессов в сравнении с традиционной системой управления и может быть использован для повышения маневренности необитаемых подводных аппаратов со средними требованиями к точности позиционирования.

Ключевые слова: телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, автономный необитаемый подводный аппарат, высокая маневренность, система управления, кватернион, система управления ориентацией

QUATERNION-BASED ATTITUDE CONTROL OF HIGHLY MANEUVERABLE UNMANNED UNDERWATER VEHICLE

The article was received by the editorial board on 12.02.2021, in the final version – 26.04.2021.

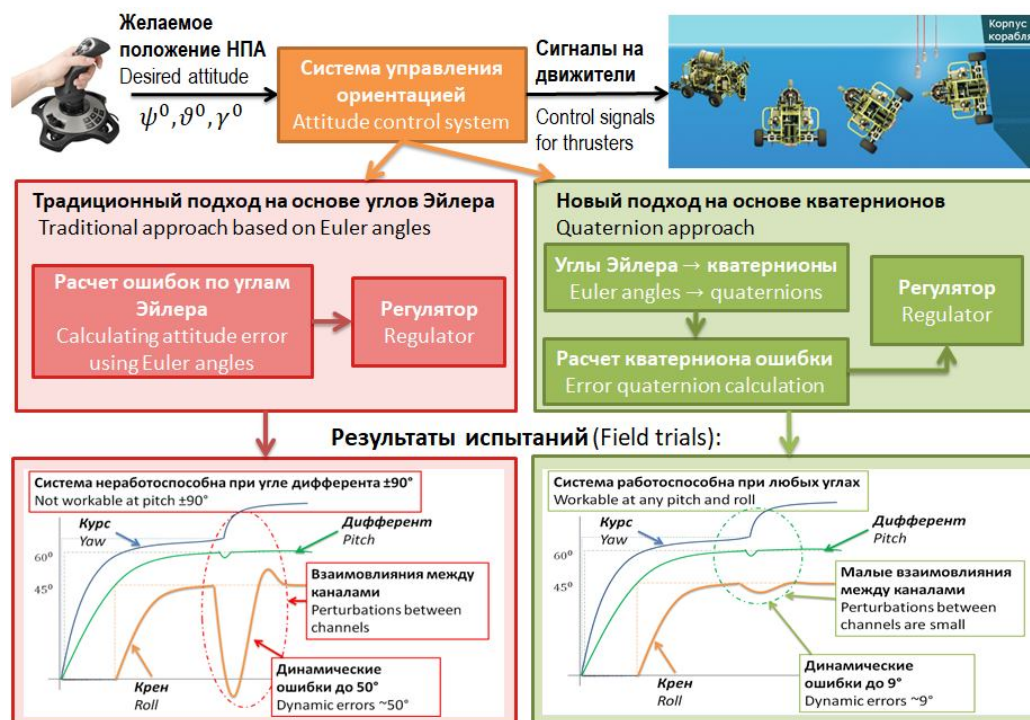
Gavrilina Ekaterina A., Moscow State Technical University N.E. Bauman, 2nd Baumanskaya St., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, assistant, ORCID 0000-0002-9919-5287, e-mail: ekaterina.a.gavrilina@gmail.com

Veltishev Vadim V., Moscow State Technical University N.E. Bauman, 2nd Baumanskaya St., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering) Associate Professor, ORCID 0000-0001-6245-839X e-mail: vvv@bmstu.ru

Traditionally, unmanned underwater vehicles are operated at low angles of inclination (pitch and roll). However, there are tasks that require high maneuverability and controllability of the underwater vehicle in the entire range of orientation angles. At the same time, traditional control systems use the Euler angles and have limitations associated with the degeneration of the kinematic equations at a pitch angle of $\pm 90^\circ$, the problem of the non-uniqueness of the Euler angles, and the deterioration of the system performance at large inclinations of the vehicle. Thus, the question of developing a synthesis method for a control system for highly maneuverable unmanned underwater vehicles arises. The paper provides a review and comparative analysis of existing approaches to attitude control, on the basis of which an approach using quaternions is chosen. The law of attitude control based on quaternions was approved during field tests on a hybrid unmanned underwater vehicle "Iznos", developed at Bauman Moscow State Technical University. The results obtained during the tests are given in the article. The quaternion-based approach has better performance in comparison with the traditional control system. In addition, control system based on quaternion approach has a simple structure and can be used to increase the maneuverability of unmanned underwater vehicles with average requirements for positioning accuracy.

Keywords: remotely operated vehicle, autonomous underwater vehicle, high maneuverability, control system, quaternion, attitude control system

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. В настоящее время необитаемые подводные аппараты (НПА) активно используются для проведения военных, инженерных и исследовательских подводных работ. Традиционно НПА эксплуатируются при близких к нулю значениях углов наклона (дифферента и крена) и не имеют жестких требований к системе управления (СУ) при больших наклонах [1]. Однако существуют задачи, для которых требуется работоспособность НПА во всем диапазоне углов ориентации. К таким задачам относятся: осмотр и идентификация миноподобных объектов, маневрирование и осмотр в условиях ограниченного пространства, обследование тоннелей системы охлаждения ядерных реакторов, осмотр корпусов судов, гребных винтов, надводных конструкций и т.п.

Несмотря на актуальность режимов движения НПА при больших углах дифферента и крена и существование аппаратов, которые их поддерживают (SEA WASP, Sea Owl, V8 SII, MARES [2]), методики построения СУ НПА, работоспособных во всем диапазоне углов ориентации проработаны недостаточно.

При этом традиционные подходы к построению СУ ориентацией НПА предполагают использование углов Эйлера – Крылова (курса, дифферента и крена) и исследованы для режимов движения при малых углах наклона, при этом они имеют ряд особенностей и ограничений при работе на больших углах:

1. Вырождение кинематических уравнений при угле дифферента $\pm 90^\circ$ [3];
2. Неоднозначность определения углов ориентации при угле дифферента $\pm 90^\circ$;
3. Увеличение взаимовлияния между каналами управления курсом, дифферентом и креном с ростом углов наклона и, как следствие, ухудшение процессов в СУ [4, 5];
4. Изменение параметров отдельных каналов управления курсом, дифферентом и креном с ростом углов дифферента и крена, что приводит к ухудшению процессов в СУ и ограничению допустимых углов наклона, при которых СУ работоспособна [4, 5].

Таким образом, остро встает вопрос разработки методики построения СУ высокоманевренным НПА. Для решения поставленной задачи в работе проводится обзор существующих подходов к построению СУ ориентацией, нацеленный на выбор наиболее перспективного. Выбранный подход апробирован в ходе натурных экспериментов на НПА «Износ» [6], разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В статье приведены результаты, полученные в ходе натурных экспериментов, а также сравнение качества работы традиционной системы и системы, основанной на кватернионах.

Обзор и сравнительный анализ подходов к построению СУ ориентацией НПА. Вопрос разработки системы управления ориентацией без ограничений на углы наклона достаточно проработан для космических, летательных аппаратов и торпед. На основе проведенного анализа можно выделить подходы к проектированию СУ ориентацией на основе: кватернионов [7, 8, 9]

матриц направляющих косинусов [10], вектора конечного поворота [11], классических [12] и модифицированных параметров Родрига [13]. Для выбора подхода для дальнейшего исследования сравним перечисленные параметры по следующим критериям: количество параметров, описывающих ориентацию, наличие проблем неоднозначности описания ориентации и вырождения кинематических уравнений. Результаты сравнения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение кинематических параметров

Кинематические параметры	Количество параметров	Неоднозначность описания ориентации	Вырождение кинематических уравнений
Углы Эйлера	3	Да	Да
Направляющие косинусы	9	Нет	Нет
Вектор конечного поворота	4	Да	Да
Кватернионы	4	Да	Нет
Классические параметры Родрига	3	Да	Да
Модифицированные параметры Родрига	3	Да	Да

По результатам, представленным в таблице, матрицы направляющих косинусов являются единственными кинематическими параметрами, которые не имеют проблемы неоднозначности описания ориентации и вырождения кинематических уравнений. Однако для описания ориентации с использованием таких матриц используется 9 параметров, которые имеют 6 уравнений связи, что значительно усложняет процесс интегрирования кинематических уравнений.

В то же время кватернионам не свойственна проблема вырождения кинематических уравнений, для описания ориентации используется 4 параметра, которые связаны одним уравнением. Кроме того, для кватернионов уже разработаны способы обхода проблемы неоднозначности описания ориентации [8].

Системы координат и модель кинематики НПА. Пространственное движение НПА рассматриваем как суперпозицию поступательного движения его полюса и вращательного движения вокруг полюса. В рамках данной работы рассматривается только вращательное движение НПА, которое задается тремя последовательными поворотами системы координат Ox_yz , связанной с НПА, на углы ψ курса, θ дифферента и γ крена относительно базовой системы координат $Ox_gy_gz_g$ полусвязанной с НПА.

Система координат $Ox_gy_gz_g$ задана следующим образом: вершина O совмещена с центром масс НПА (полюсом), ось Ox_g направлена на Север по касательной к меридиану, Oz_g – по касательной к параллели на Восток, ось Oy_g – вдоль вертикали места вверх. Полюс связанной с НПА системы координат Ox_yz , также как и $Ox_gy_gz_g$, совпадает с центром масс НПА, ось Ox направлена вдоль продольной оси в носовую часть аппарата, ось Oy лежит в диаметральной плоскости НПА и направлена вверх, ось Oz направлена на правый борт.

В соответствии с теоремой Эйлера ориентацию НПА можно также задать как поворот вокруг единичной оси конечного поворота $\vec{e}$ на угол конечного поворота χ . Поясняющая схема представлена на рисунке 1.

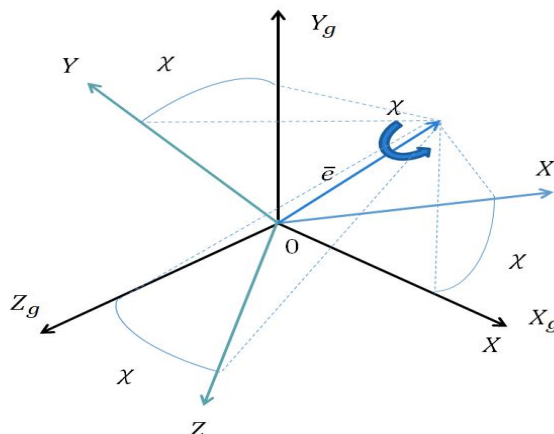


Рисунок 1 – Описание ориентации НПА с помощью угла и вектор конечного поворота

В соответствии с этой теоремой ориентация НПА в пространстве может быть представлена с помощью нормированного кватерниона, компонентами которого являются параметры Родрига – Гамильтона:

$$\Lambda = [\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3]^T = \left[\cos \frac{\chi}{2} \cos \bar{\alpha} \sin \frac{\chi}{2} \cos \bar{\beta} \sin \frac{\chi}{2} \cos \bar{\gamma} \sin \frac{\chi}{2} \right]^T, \quad (1)$$

где χ – угол поворота вокруг оси конечного поворота, а $\cos \bar{\alpha}$, $\cos \bar{\beta}$, $\cos \bar{\gamma}$ – направляющие косинусы между вектором $\bar{e}$ и осями Ox , Oy и Oz соответственно.

При этом компоненты кватерниона связаны между собой условием нормировки:

$$\lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1. \quad (2)$$

Параметры кватерниона можно вычислить, используя углы Эйлера – Крылова. Уравнение связи между параметрами имеет вид:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \cos \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2}, \\ \lambda_1 &= \cos \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2}, \\ \lambda_2 &= \cos \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2}, \\ \lambda_3 &= \cos \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Кинематические уравнения, используемые для получения текущей ориентации НПА в кватернионах, имеют вид:

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \Lambda \circ \Omega, \quad (4)$$

где Λ – нормированный кватернион, задающий текущее положение СК Ox_yz относительно полу-связанной СК $Ox_g y_g z_g$ (1), а Ω – кватернионное представление угловой скорости НПА:

$$\Omega = [0 \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T. \quad (5)$$

В начальный момент времени интегрирования компоненты кватерниона рассчитываются из начальных значений углов курса, дифферента и крена в соответствии с уравнениями (3).

Управление ориентацией с использованием кватернионов. Структурная схема системы управления ориентацией, основанной на кватернионах, приведена на рисунке 2.

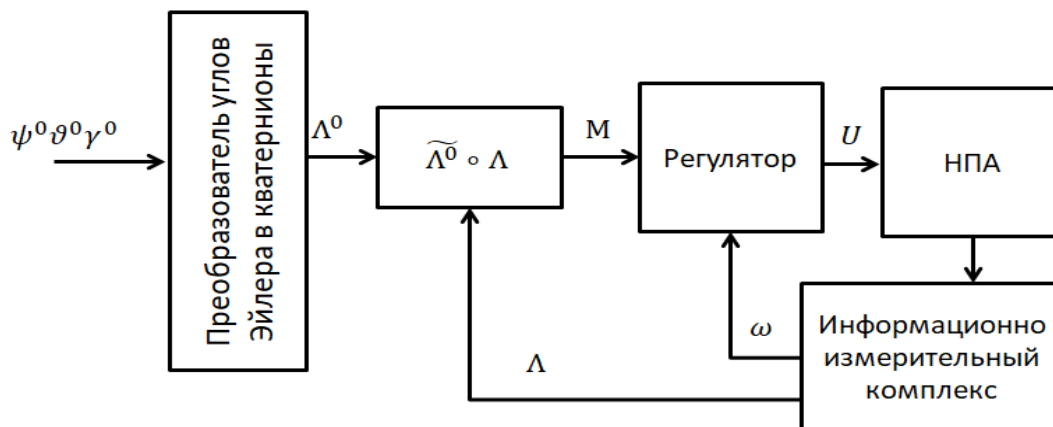


Рисунок 2 – Схема системы управления ориентацией НПА

Оператор задает желаемое положение НПА с помощью углов курса ψ^0 , дифферента ϑ^0 и крена γ^0 . Данные углы поступают в блок преобразователя углов Эйлера в кватернионы, где в соответствии с уравнениями (3) рассчитывается кватернион желаемого положения Λ^0 . При этом кватернион, который описывает текущую ориентацию НПА, рассчитывается в информационно-измерительном комплексе НПА на основе измерений текущей угловой скорости ω НПА и интегрирования кинематических уравнений (4).

Кватернион, который описывает ошибку ориентации, рассчитывается следующим образом:

$$M = [\mu_0 \mu_1 \mu_2 \mu_3]^T = \tilde{\Lambda}^0 \circ \Lambda, \quad (6)$$

где $\tilde{\Lambda}^0$ – кватернион, сопряженный Λ^0 .

Рассчитанное значение ошибки ориентации поступает в регулятор СУ, при этом закон управления имеет вид:

$$U_i = -\text{sign}(\mu_0)K_i\mu_j + \int K_{int\ i}\mu_j dt - K_{di}\omega_i, \text{ где } i = x, y, z, \text{ а } j = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где $K_x, K_y, K_z, K_{int\ x}, K_{int\ y}, K_{int\ z}, K_{dx}, K_{dy}, K_{dz}$ – коэффициенты СУ, выбранные исходя из требований устойчивости и качества сепаратных каналов управления креном, курсом и дифферентом соответственно; а компонент $\text{sign}(\mu_0)$ позволяет избежать проблемы неоднозначности описания ориентации, свойственной кватернионам.

Результаты экспериментов. Алгоритм управления ориентацией НПА был проверены в ходе натурных испытаний НПА Износ, разработанного в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. НПА «Износ» предназначен для дефектоскопии корпусов судов и подводных объектов и имеет гибридный движительный комплекс [6]. Внешний вид НПА представлен на рисунке 3 (а). Движительный комплекс включает в свой состав 8 винтомоторных агрегатов и шасси с колесами. Винтомоторные агрегаты используются для управления НПА в воде, а также позволяют «прижать» НПА к рабочей поверхности. Дальнейшее управление движением НПА по поверхности осуществляется с помощью колес. В процессе стыковки НПА должен принимать положение с большими углами крена и дифферента, как это показано на рисунке 3 (б).

Информационно-измерительный комплекс включает в свой состав 3 волоконно-оптических гироскопа, магнитометр и три акселерометра, объединенных в бесплатформенную систему ориентации, которая вычисляет текущее положение НПА в углах Эйлера-Крылова и кватернионах.

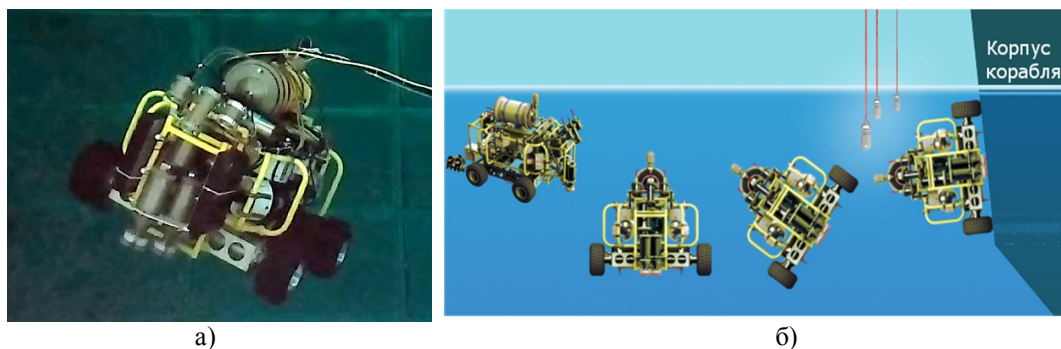
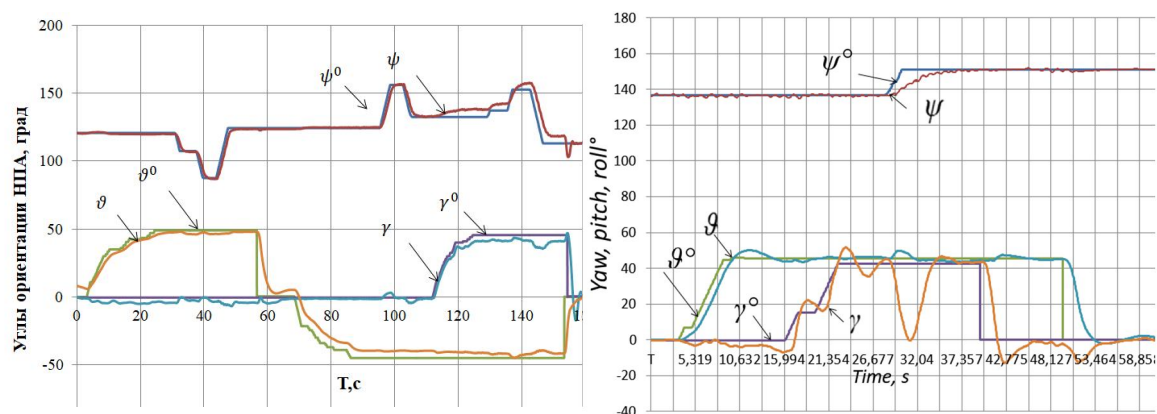


Рисунок 3 – НПА «Износ» в ходе испытаний в бассейне (а), схема выполнения стыковки с корпусом судна (б)

Исследование работы СУ проводилось следующим образом. На начальном этапе проводилась настройка СУ сепаратными каналами управления курсом, дифферентом и креном. Параметры регулятора были подобраны таким образом, чтобы перегулирование в каналах управления курсом, дифферентом и креном не превышало 5 % как для малых, так и для больших задающих значений.

На следующем этапе проводилось исследование совместной работы каналов управления ориентацией при различных углах крена и дифферента. СУ задавалось значение дифферента более 45° , по завершении переходного процесса, в контуре дифферента происходило управление НПА по курсу или крену. Аналогично совместная работа контуров проверялась при заданных углах крена и дифферента порядка 45° .

Процесс настройки и проверки совместной работы контуров на НПА «Износ» был проверен для традиционного подхода к управлению ориентацией, приведенного в работах [1, 4] и для подхода с использованием кватернионов. Вид переходных процессов в СУ с кватернионами приведен на рисунке 4 (а), а для традиционного подхода на рисунке 4 (б). Параметры переходных процессов для различных подходов приведены в таблице 2.



(а)

(б)

Рисунок 4 – Переходные процесс в СУ, основанной на кватернионах (а), основанной на углах Эйлера – Крылова (б)

Таблица 2 – Сравнение подходов

Подход к построению системы управления	Время переходного процесса			Перерегулирование			Динамические ошибки	
	$t_{п.п.\psi}$, с	$t_{п.п.\vartheta}$, с	$t_{п.п.\gamma}$, с	$\sigma_{i\psi}$, %	$\sigma_{i\vartheta}$, %	$\sigma_{i\gamma}$, %	$\Delta_{дин\vartheta}$, °	$\Delta_{дин\gamma}$, °
На основе кватернионов	5	8	8	2	–	–	4	9
Традиционная система на основе углов Эйлера – Крылова	9	9	18	5	0	20	8	45

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что подход с использованием кватернионов имеет достаточное быстродействие и меньшее взаимовлияние между каналами в сравнении с традиционным подходом к построению системы управления на основе кватернионов. Кроме того, для данного подхода отсутствует проблема вырождения кинематических уравнений, и неоднозначности определения ориентации НПА при каких-либо углах ориентации по сравнению с традиционными подходами. Подход является перспективным для высокоманевренных НПА со средними требованиями к точности позиционирования.

Библиографический список

1. Костенко В. В. Разработка телеуправляемого подводного аппарата «МАКС-300» / В. В. Костенко Д. Н. Михайлов // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – Т. 1, № 13. – С. 36–46.
2. Ferreira B. M. Control and guidance of a hovering AUV pitching up or down / B. M. Ferreira, J. Jouffroy // Proceedings of OCEANS 2012 MTS/IEEE. – 2012. – С. 1–7.
3. Матвеев В. В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. – Санкт-Петербург : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2009. – 280 с.
4. Лямина Е. А. Особенности построения системы управления угловой ориентацией подводного аппарата для больших углов наклона / Е. А. Лямина, С. А. Егоров // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – Вып. 3. – С. 351–356.
5. Gavrilina E. A. A Decomposition Algorithm for Attitude Control of the Remotely Operated Vehicle at Large Pitch and Roll Angles / E. A. Gavrilina, V. N. Chestnov, A. N. Kropotov // 2019 18th European Control Conference (ECC). Naples, Italy, 2019. – С. 3334–3339.
6. Вельтишев В. В. Роботизированная технология освидетельствования подводной части судна / В. В. Вельтишев и др. // Подводные исследования и робототехника. – 2016. – № 1 (21). – С. 15–24.
7. Грумондз В. Т., Половинкин В. В. Теория движения двусредних аппаратов. Математические модели и методы исследования / В. В. Половинкин, В. Т. Грумондз. – Москва : Вузовская книга, 2012. – 644 с.
8. Челноков Ю. Н. Кватернионные модели и методы динамики, навигации и управления движением / Ю. Н. Челноков. – Москва : Физматлит, 2011.
9. Лямина Е. А. Подходы к построению системы управления угловым положением необитаемого подводного аппарата без ограничений на углы наклона / Е. А. Лямина // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – Спецвыпуск 1. – С. 224–234.

10. Chaturvedi N. A., Asymptotic smooth stabilization of the inverted 3-D pendulum / N. A. Chaturvedi, N. H. McClamroch // *IEEE Transactions Automatic Control*. – 2009. – № 6 (54). – C. 1204–1215.
11. Ozgoren M. K. Comparative study of attitude control methods based on Euler angles, quaternions, angle-axis pairs and orientation matrices / M. K. Ozgoren // *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. – 2019. – Vol. 41, iss. 5. – P. 1189–1206.
12. Tsotras P. New control laws for the attitude stabilization of rigid bodies / P. Tsotras // *Automatic Control in Aerospace 1994 (Aerospace Control '94)*. – 1995. – P. 321–326.
13. Binette M. R. Nonlinear H_∞ Attitude Control Using Modified Rodrigues / M. R. Binette et al. // *Parameters Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2014. – № 37 (6). – P. 2017–2021.

References

1. Kostenko V. V., Mikhailov D. N. *Razrabotka teleupravlyayemogo podvodnogo apparata «MAKS-300»* [Development of the remotely operated underwater vehicle «MAKS-300»]. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater exploration and robotics], 2012, vol. 1, no. 13, pp. 36–46.
2. Ferreira B. M., Jouffroy J. Control and guidance of a hovering AUV pitching up or down. *Proceedings of OCEANS 2012 MTS/IEEE*, 2012, pp.1–7.
3. Matveev V. V., Raspopov V. Ya. *Osnovy postroyeniya besplatformennykh inertsiyalnykh navigatsionnykh sistem* [Fundamentals of building strapdown inertial navigation systems]. Saint Petersburg, SSC RF JSC «Concern “TsNII Elektropribor”», 2009. 280 p.
4. Lyamina E. A., Egorov S. A. Osobennosti postroyeniya sistemy upravleniya uglovoy oriyentatsiyei podvodnogo apparata dlya bolshikh uglov naklona [Features of constructing a control system for underwater vehicle angular orientation at large angles of inclination]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2018, no. 3, pp. 351–356.
5. Gavrilina E. A., Chestnov V. N., Kropotov A. N., A Decomposition Algorithm for Attitude Control of the Remotely Operated Vehicle at Large Pitch and Roll Angles. *2019 18th European Control Conference (ECC)*, Naples, Italy, 2019, pp. 3334–3339.
6. Veltishchev V.V. et al. Robotizirovannaya tekhnologiya osvidetelstvovaniya podvodnoy chasti sudna [Robotic technology for survey of the underwater part of the vessel]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater exploration and robotics], 2016, no. 1 (21), pp. 15–24.
7. Grumondz V. T., Polovinkin V. V. *Teoriya dvizheniya dvusrednykh apparatov. Matematicheskiye modeli i metody issledovaniya* [Theory of motion of two-averaged vehicles. Mathematical models and research methods]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2012. 644 p.
8. Chelnokov Yu. N. *Kvaternionnyye modeli i metody dinamiki, navigatsii i upravleniya dvizheniyem* [Quaternion models and methods applied to dynamics, navigation and motion control]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011.
9. Laymina E. A. Podkhody k postroyeniyu sistemy upravleniya uglovym polozheniyem neobitayemogo podvodnogo apparata bez ogranicheniy na ugly naklona [Approaches to angular position control system for underwater vehicle without tilt angle constraints]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Transactions of the Krylov State Research Centre], 2018, special issue 1, pp. 224–234.
10. Chaturvedi N. A., McClamroch N. H. Asymptotic smooth stabilization of the inverted 3-D pendulum. *IEEE Transactions Automatic Control*, 2009, no. 6 (54), pp. 1204–1215.
11. Ozgoren M. K. Comparative study of attitude control methods based on Euler angles, quaternions, angle-axis pairs and orientation matrices. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2019, vol. 41, iss. 5, pp. 1189–1206.
12. Tsotras P. New control laws for the attitude stabilization of rigid bodies. *Automatic Control in Aerospace 1994 (Aerospace Control '94)*, 1995, pp. 321–326.
13. Binette M. R. et al. Nonlinear H_∞ Attitude Control Using Modified Rodrigues. *Parameters Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, no. 37 (6), pp. 2017–2021.