

УДК 681.5.013

РЕГУЛЯТОР ГЛУБИНЫ ДЛЯ ВЫСОКОМАНЕВРЕННОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В.А. Александров

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: va.alexandrov@yandex.ru

А.Н. Абраменков

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: aabramenkov@asmon.ru

А.В. Абдулов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: aabdulov@asmon.ru

Д.В. Шатов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: dvshatov@gmail.com

Ключевые слова: подводный аппарат, система управления, преобразование координат, ПИД-регулятор.

Аннотация: В работе рассматривается регулятор глубины высокоманевренного подводного аппарата с шестью степенями свободы. Синтезированные по идентифицированной модели ПИД-регуляторы обеспечивают раздельное управление поступательным и вращательным движением относительно каждой из трех осей в локальной системе координат, связанной с центром масс аппарата. Особенность задачи в том, что аппарат может двигаться в вертикальном направлении в системе координат, связанной с Землей, сохраняя при этом свою ориентацию. Проведено сравнение двух реализаций управления глубиной. Первая реализация использует регулятор, синтезированный для локальной оси z , пересчитывая управление на моторы в соответствии с текущей ориентацией. Другая реализация пересчитывает в соответствии с текущей ориентацией заданное значение положения по вертикали в глобальной системе координат в заданные значения положения по трем осям локальной системы координат, задействовав таким образом три регулятора поступательного движения. Второй подход обеспечивает лучшее быстродействие и точность управления глубиной за счет учета зависимости динамики аппарата от его текущей ориентации.

1. Введение

Рассматриваемый высокоманевренный подводный аппарат является многомерной системой управления, в которой управление поступательным и вращательным движением осуществляется шестью винтомоторными агрегатами (ВМА). ВМА расположены так, что могут обеспечивать независимое управление для каждой из шести степеней свободы [1]. Это позволяет рассматривать шесть контуров управления раздельно, пренебрегая их взаимным влиянием. В [2] экспериментально получены передаточные функции для поступательного движения, по которым построены ПИД-регуляторы отслеживания положения для каждой из осей. Следует заметить, что идентификация проводилась в условиях, когда углы наклона по крену и дифференту равны нулю. При этом, если принять угол курса также равным нулю, то локальная и глобальная системы координат совпадают. Если же наклон аппарата отличается от нуля, то при использовании для управления глубиной ПИД-регулятора, разработанного для локальной оси z , он кроме вертикального движения будет создавать и ненужное горизонтальное, а при наклоне 90 градусов совсем не сможет управлять глубиной погружения. В работе сравниваются два способа решения этой задачи: 1) пересчет сигнала управления ПИД-регулятора для локальной оси z в значения управления ВМА, используя матрицу поворота для текущего значения ориентации и 2) пересчет через матрицу поворота требуемого значения глубины в требуемые значения по трем осям локальной системы координат, которые обрабатываются ПИД-регуляторами отслеживания положения для каждой из осей.

2. Система управления подводного аппарата

Высокоманевренный подводный аппарат с шестью степенями свободы показан на рис. 1. Динамика поступательного и вращательного движения подводного аппарата описана в [3]. Движущие силы и вращающие моменты относительно ортогональных осей локальной системы координат формируются тягой ВМА [4]:

$$(1) \quad \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \\ \tau_p \\ \tau_q \\ \tau_r \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix},$$

где τ_x, τ_y, τ_z – силы, создающие поступательное движение по осям x, y, z локальной системы координат, τ_p, τ_q, τ_r – вращающие моменты относительно этих осей, $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6$ – значения тяги соответствующих ВМА, $A \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ – матрица распределения тяги, определяемая конструкцией аппарата.

ВМА расположены таким образом, что возможно независимое управление каждой из шести степеней свободы, и можно формировать сигналы управления

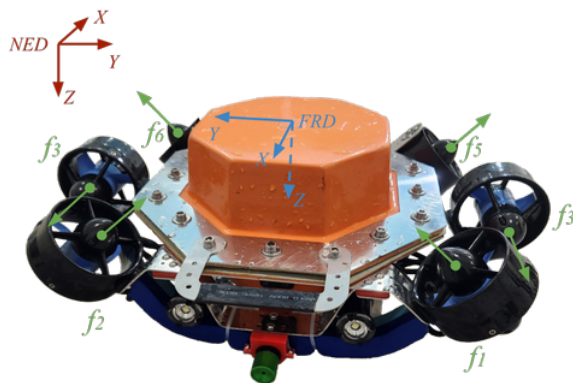


Рис. 1. Экспериментальный высокоманевренный подводный аппарат. NED (north, east, down) – глобальная система координат, FRD (front, right, down) – локальная система координат.

$u_x, u_y, u_z, u_p, u_q, u_r$, из которых вычисляются управления для каждого ВМА:

$$(2) \quad \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ u_p \\ u_q \\ u_r \end{bmatrix},$$

где $B \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ – матрица, где каждый столбец сформирован так, чтобы с учетом матрицы A в (1) создавать соответствующие силы и моменты по каждой из осей независимо друг от друга. Динамика тяги ВМА f_i от управления u_i здесь не рассматривается.

По показаниям имеющихся на борту трехосевых гироскопа и акселерометра вычисляются оценки углов ориентации ϕ, θ, ψ – крена, дифферента и курса. Используя значения этих углов, вычисляется матрица поворота:

$$(3) \quad R_{NF}(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta \\ s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi & c_\phi c_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & s_\phi c_\theta \\ s_\phi s_\psi + c_\phi s_\theta c_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi c_\theta \end{bmatrix},$$

где $s_\phi = \sin \phi, c_\phi = \cos \phi, \dots$. Эта матрица связывает глобальные X, Y, Z и локальные x, y, z координаты:

$$(4) \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R_{NF}(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}.$$

На аппарате установлен датчик давления, по которому рассчитывается положение по глобальной координате Z . Для оценок положения по координатам X, Y используется бортовая видекамера [1] и система позиционирования по графическим меткам [5].

3. Реализация регулятора глубины

ПИД-регулятор для оси z , построенный по идентифицированной модели [2], может быть использован как регулятор глубины (вариант 1). При этом на его вход

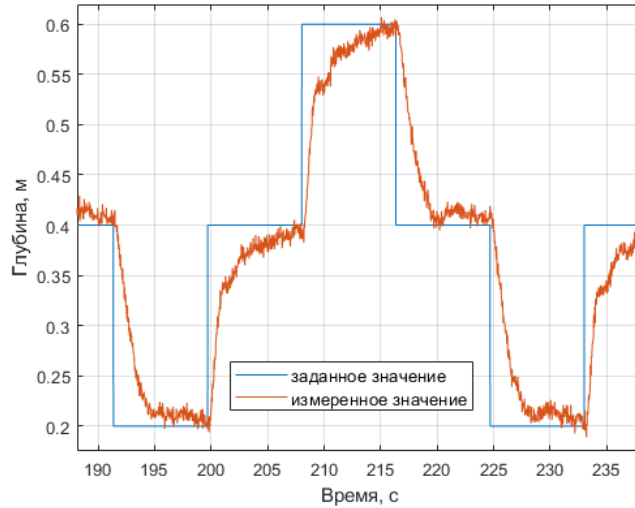


Рис. 2. Вариант 1 управления глубиной погружения

подаются заданное и измеренное значения глубины, а его выход u_z пересчитывается в управление по локальным осям через матрицу поворота (3):

$$(5) \quad \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = R_{NF}(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_z \end{bmatrix},$$

и из полученных таким образом значений u_x, u_y, u_z вычисляются значения управления для ВМА по формуле (2). График экспериментальных данных отслеживания заданного значения глубины при такой реализации управления показан на рис. 2.

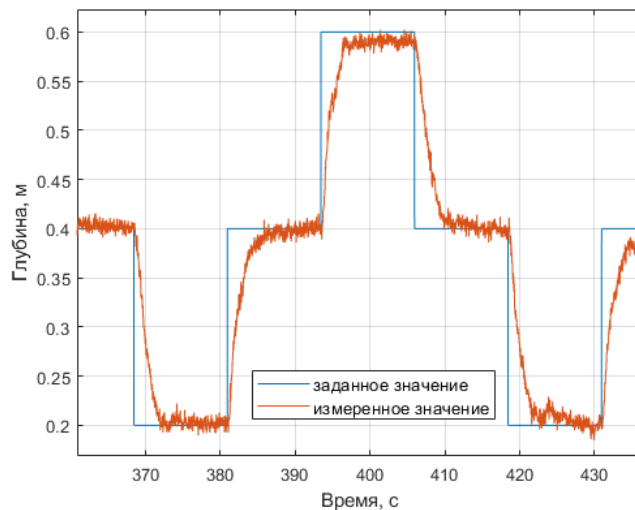


Рис. 3. Вариант 2 управления глубиной погружения

Вариант 2 построения системы управления глубиной погружения возможен, если реализовано измерение положения по глобальным координатам X и Y . В этом

случае, используя матрицу поворота, по формуле (4) получаем текущие заданные значения в локальной системе координат x^*, y^*, z^* из заданного в глобальной системе координат положения аппарата X^*, Y^*, Z^* . Тогда значения управлений u_x, u_y, u_z формируются тремя соответствующими ПИД-регуляторами [2], построенными для локальных координат. На рис. 3 приведен график экспериментальных данных отслеживания заданного значения глубины для такого варианта управления. Видно, что точность и быстродействие управления в этом случае лучше. Но по сравнению с вариантом 1 требуется измерение положения по координатам X, Y для реализации регуляторов по трем осям.

4. Заключение

Управление глубиной погружения высокоманевренного подводного аппарата при помощи трех регуляторов, синтезированных для каждой из осей локальной системы координат, для которых уставки вычисляются через матрицу поворота из требуемых значений координат в глобальной системе, обеспечивает высокую точность и быстродействие. Если управление осуществляется только регулятором, построенным для вертикальной оси в локальной системе координат, а затем через матрицу поворота, соответствующей текущей ориентации аппарата, пересчитывается в управления для каждого ВМА, то при отклонении угла наклона от нуля переходные процессы получаются заметно хуже, но при этом требуется только измерение глубины и углов ориентации. Это важное отличие, так как измерение положения по горизонтальным координатам не всегда возможно.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-00588, <https://rscf.ru/project/23-29-00588/>

Список литературы

1. Abdulov A., Abramnikov A. Extra steering for ROV control system by tracking the gamepad orientation // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russian Federation, 2021. P. 1041–1045.
2. Alexandrov V., Shatov D., Abramnikov A., Abdulov A. Position Control of Maneuverable Underwater Vehicle Based on Model Identification // 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, Lipetsk, Russian Federation, 2023. P. 76–81.
3. Fossen T. I. Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics, 2002. 570 p.
4. Fossen T.I., Johansen T.A., Perez T. A survey of control allocation methods for underwater vehicles // Underwater vehicles. 2009. P. 109–128.
5. Абраменков А.Н. Картографирование визуальных меток: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681967 РФ. Зарег. 19.10.2023.