

УДК 681.52

## ДВУХСТЕПЕННОЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КВАДРОКОПТЕРА В УСЛОВИЯХ ПОРЫВИСТОГО ВЕТРА

## TWO DEGREES OF FREEDOM TESTBED FOR STUDYING QUADROTOR MOTION CONTROL ALGORITHMS IN GUSTY WIND CONDITIONS

*По представлению чл.-корр. РАН С.Н. Шарова*

**С.И. Томашевич<sup>1</sup>, А.О. Белявский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ИПМаш РАН, <sup>2</sup>Университет ИТМО

**S.I. Tomashevich, A.O. Belyavsky**

В работе представлен двухстепенной лабораторный стенд для исследования алгоритмов управления движением квадрокоптера, продемонстрированы особенности, достоинства и недостатки. Стенд позволяет безопасно в помещении тестировать и применять на практике алгоритмы, разработанные для условий порывистого ветра. В данной работе показана модель движения квадрокоптера, примеры использования алгоритмов управления, различные способы обработки данных телеметрии. Обозначены возможные области использования стенда, в том числе и в обучении операторов мониторинга ледовой обстановки.

**Ключевые слова:** тестовый стенд, квадрокоптер, порывистый ветер, алгоритм управления, мониторинг ледовой обстановки, беспилотный летательный аппарат.

The paper presents a two-degrees-of-freedom laboratory testbed for the study of quadrotor motion control algorithms, taking into account its characteristics, advantages and disadvantages. The testbed allows safe indoor testing and implementation of developed algorithms, including algorithms for control in wind gusts conditions. In the paper the examples of such algorithms usage are shown, quadrotors dynamics model, examples of the processes time histories for different approaches and various algorithms are presented. The possible areas of using the proposed testbed are outlined. An ability of testbed application for unmanned aerial vehicles operators of ice surface monitoring education is described.

**Keywords:** testbed, quadrotor, gusty wind, control algorithm, ice situation monitoring, unmanned aerial vehicle.

### Введение

По данным ряда исследователей дно Северного Ледовитого океана содержит около 25% мировых запасов углеводородов, а также богатые залежи алмазов, золота, платины, олова, марганца, никеля и свинца. Крайний Север Российской Федерации богат залежами цветных и редких металлов, здесь находятся важнейшие месторождения золота. Разрабатываются оловянные, вольфрамовые, свинцово-цинковые руды. Имеются запасы ртути, алмазов, железной руды, сосредоточены запасы нефти, газа, угля [1–3]. Использование Арктической зоны Российской Федерации в качестве стратегической ресурсной базы нашей

страны вызывает необходимость создания особых условий для обеспечения безопасности населения на ее территории. Мониторинг арктических морей имеет первостепенное значение для организации добычи полезных ископаемых, морского судоходства, и инфраструктуры в Российской Арктике. Концепция создания распределенного комплекса мониторинга и управления движением судов по Северному морскому пути изложена в [4]. В работе предлагается архитектурное решение распределенного комплекса мониторинга и управления, характерным отличием которого является необходимость выработки решений и выполнения процедур управления в реальном времени, когда промедление с реакцией может приводить к нео-

братимому развитию событий и неприятным последствиям.

В последнее время популярность таких беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), как квадрокоптер, растет в узконаправленных областях, где человеку требуется быстро осмотреть окружающее пространство с высоты птичьего полета. Примером такого использования может быть оперативный мониторинг ледовой обстановки при движении судов по Северному морскому пути. Это свидетельствует об актуальности использования квадрокоптеров для выполнения конкретных задач в узконаправленных областях. Таким образом, разработка быстрых и надежных алгоритмов управления становится важной частью в развитии всего направления БПЛА. Алгоритмы могут быть как простыми, на основе ПИД-регуляторов [5, 6], так и более сложными — на основе бэкстеппинга [7, 8] или из множества адаптивных и других алгоритмов [9, 10]. Посадка БПЛА на судно в условиях качки рассматривается в [11–13]. Для безопасного тестирования новых алгоритмов в условиях лаборатории для минимизации возможного вреда от возникновений неполадок на различных уровнях, таких как погрешности в работе датчиков, ошибки в программном коде и других. Сконструированный двухступенной стенд позволяет тестировать полученные алгоритмы в удобных условиях, позволяет быстро изменить конфигурацию квадрокоптера, алгоритм управления или его коэффициенты. Также при использовании данного стенда можно имитировать условия ветра путем изменения положения квадрокоптера в пространстве.

### Конструкция стенда

Стенд представляет собой конструкцию, сделанную по принципу карданова подвеса (рис. 1, 2). Квадратная рамка закреплена на ножках, стоящих на большом квадратном основании. Рамка закреплена таким образом, что она может свободно вращаться. В рамке закреплена планка, она также может вращаться относительно рамки. К рамке и центральной планке прикреплены тросы, натягивания которых имитируют порывы ветра. Квадрокоптер, закрепленный на планке, может вращаться по углам тангажа и крена [14]. Центр тяжести квадрокоптера сохраняет свое положение, что обеспечивает стабильность всей систе-

мы. Тестовый стенд выполнен из деревянных частей и металлических уголков, что обеспечивает практичность в эксплуатации, простоту в сборке и легкость конструкции. В качестве летательного аппарата используется квадрокоптер на базе радиально-лучистой рамы *DJI 450* и автопилота *Ardupilot Mega 2.6* с инерциальной системой (гироскоп, акселерометр, магнитометр, барометр) и приемником сигнала от спутниковой системы навигации *GPS*. Используются бесколлекторные моторы с внешним ротором *DJI 2213* (250 ватт каждый), контроллеры оборотов *DJI 30A Opto* с токоотдачей до 30 А и рабочим напряжением до 14,8 В, несущие винты левого и правого вращения с размерами 10×4,5 или 8×4,5 дюйма в зависимости от условий полета. Также есть возможность получения данных в режиме реального времени с помощью персонального компьютера через *XBee* модемы.

### Динамика квадрокоптера

Динамика движения квадрокоптера в пространстве описывается системой уравнений

$$\begin{cases} m\dot{V}_x = \tau_y(C_\psi S_\theta C_\gamma + S_\psi S_\gamma) - V_x A_x; \\ m\dot{V}_y = -mq + \tau_y(C_\theta C_\gamma) - V_y A_y; \\ m\dot{V}_z = \tau_y(S_\psi S_\theta C_\gamma - C_\psi S_\gamma) - V_z A_z; \\ \dot{\gamma} = \omega_x + S_\gamma T_\theta \omega_z + C_\gamma T_\theta \omega_y; \\ \dot{\theta} = C_\gamma \omega_z - S_\gamma \omega_y; \\ \dot{\psi} = \frac{S_\gamma}{C_\theta} \omega_z + \frac{C_\gamma}{C_\theta} \omega_y; \\ I_x \dot{\omega}_x = (I_y - I_z) \omega_y \omega_z - I_r \omega_z \omega_r + \tau_\gamma; \\ I_y \dot{\omega}_y = (I_z - I_x) \omega_x \omega_z + \tau_\psi; \\ I_z \dot{\omega}_z = (I_x - I_y) \omega_y \omega_x - I_r \omega_x \omega_r + \tau_\theta, \end{cases} \quad (1)$$

тогда для двух степеней свободы (углы тангажа и крена) система (1) редуцируется до системы (2)

$$\begin{cases} I_x \dot{\omega}_x = (I_y - I_z) \omega_y \omega_z - I_r \omega_z \omega_r + \tau_\gamma; \\ I_z \dot{\omega}_z = (I_x - I_y) \omega_y \omega_x - I_r \omega_x \omega_r + \tau_\theta. \end{cases} \quad (2)$$

С учетом линеаризации в нулевой точке и силы трения, возникающей при вращении квадро-



Рис. 1. Внешний вид стенда

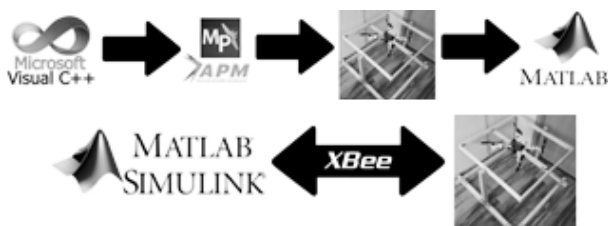


Рис. 2. Способы работы со стендом

коптера в раме и при вращении рамы во внешней раме, уравнения (2) принимают вид

$$\begin{cases} \ddot{\gamma} = \alpha_N f_\gamma(t) + \beta_N \dot{\gamma}; \\ \ddot{\vartheta} = \alpha_N f_\vartheta(t) + \beta_N \dot{\vartheta}. \end{cases} \quad (3)$$

Для большего соответствия полной модели в уравнениях (2) могут быть оставлены перекрестные связи, тогда повороты на углы тангажа и крена являются связанными и систему следует рассматривать как многомерную:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} 0 & -I_r I_x^{-1} \omega_r & 0 & 0 \\ I_r I_x^{-1} \omega_r & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} I_x^{-1} & 0 \\ 0 & I_x^{-1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_\gamma \\ \tau_\vartheta \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (4)$$

$\tilde{y}_{\gamma\vartheta} = \tilde{x}$

где  $\tilde{x} = [\dot{\gamma} \ \dot{\vartheta} \ \gamma \ \vartheta]^T$ .

## Программное обеспечение

Реализация прошивки автопилота квадрокоптера *Arduino Mega 2.5* осуществляется на языке программирования *C++*, который может быть использован для написания простейших алгоритмов управления. Для загрузки прошивки и для выгрузки логов телеметрии используется программа *Mission Planner*, позволяющая, например, преобразовывать логи в формат системы *Matlab* для последующей обработки. Загрузка логов в этой программе осуществляется после прекращения работы квадрокоптера и при подключении автопилота квадрокоптера через *USB* интерфейс. Работа с кодом прошивки может вестись как в оригинальной оболочке *Arduino* или с использованием более мощных и удобных пакетов, например, таких как *Microsoft Visual Studio*.

Стоит отметить, что мощности микрокомпьютера может не хватить для работы с алгоритмами более сложного вида. Поэтому возможно осуществление связи квадрокоптера посредством модемов *Xbee* с персональным компьютером и с установленной на нем связкой *Matlab/Simulink*. Особенность использования такого подхода заключается в том, что все расчеты управления осуществляются на больших вычислительных мощностях, однако появляются задержки как в передаче телеметрических данных к компьютеру, так и в передаче рассчитанного управления от компьютера к автопилоту квадрокоптера. Использование пакета *Simulink* для синтеза алгоритмов управления также имеет своей целью упрощение работы с квадрокоптером. Так как современные исследования алгоритмов управления компьютерным моделированием осуществляется именно в этой среде, то перенос алгоритмов на реальную систему квадрокоптера практически не требует усилий.

## Примеры полученных экспериментальных данных

На рис. 3–5 представлены графики процессов, полученных при работе с квадрокоптером на стенде. Как было отмечено выше, эти данные могут быть получены с помощью программы *Mission Planner* после функционирования квадрокоптера или в режиме реального времени в среде *Matlab/Simulink* с использованием *Xbee* модемов.

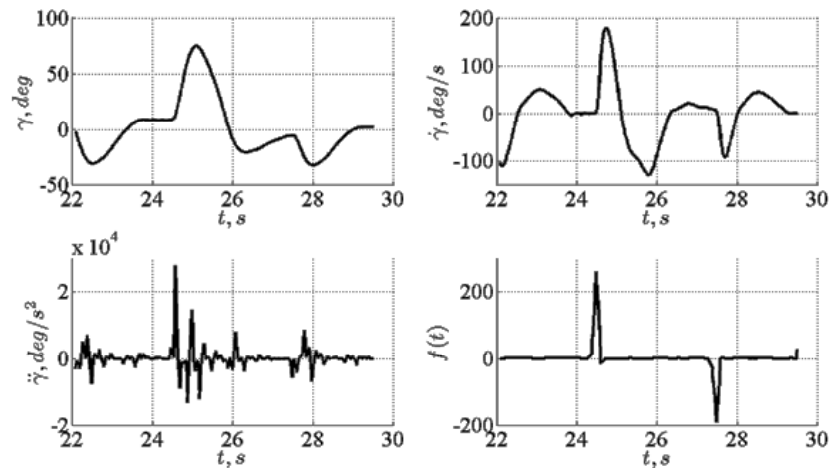


Рис. 3. Примеры процессов, полученных замыканием квадрокоптера обратной связью

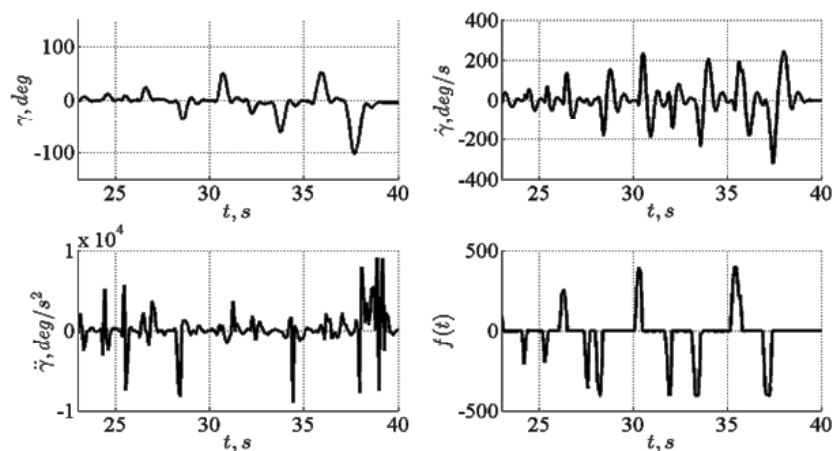


Рис. 4. Примеры процессов при использовании разработанного ПД-регулятора

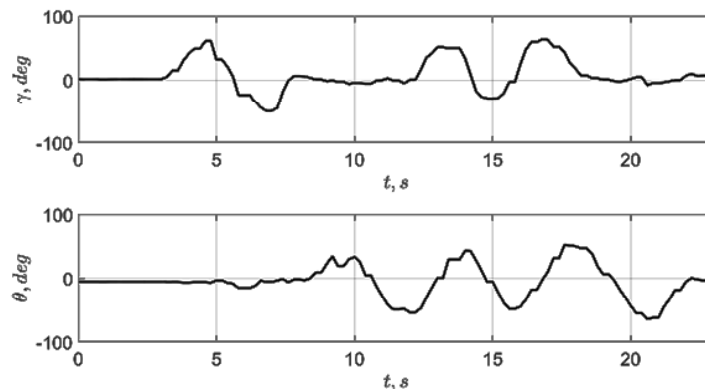


Рис. 5. Примеры процессов изменения углов поворота, полученных в режиме реального времени в среде Simulink

## Заключение

В настоящей работе представлен двухступенной лабораторный стенд, позволяющий просто и наглядно реализовывать алгоритмы различной сложности, а также проверять их работоспособность в условиях ветра. Показаны примеры по-

лученной разными способами телеметрии. Таким образом, стенд может использоваться для тестирования большого числа алгоритмов, связанных с управлением, идентификацией систем, а также со всеми смежными направлениями. Использование предложенного стенда с имитацией условий порывистого ветра позволяет не только упро-

стить проверку на практике новых алгоритмов управления, но и наглядно проводить обучение операторов. Таким образом, перед использованием квадрокоптера для мониторинга ледовой обстановки, надежность его алгоритмов может быть проверена в безопасных условиях. Это также поможет избежать потери летательного аппарата в реальных условиях по причине незамеченных ошибок в алгоритмах или ошибки оператора.

Работа выполнена в ИПМаш РАН и поддержана Российским научным фондом (грант 14-29-00142).

### Литература

1. Фалеев М.И. Основные подходы к формированию системы мониторинга чрезвычайных ситуаций в Арктике // Сб. трудов Международной научно-практической конференции «Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и создание комплексных аварийно-спасательных центров в Арктике». МЧС России. — Норильск, 2012, 24 августа. — С. 21–25.
2. Зеленина Л.И., Антипин А.Л. Льды Арктики: мониторинг и меры адаптации. // Арктика и Север. 2015. № 18. — С. 122–130.
3. Качанов С.А., Козлов К.А. Проблемы мониторинга и прогноза чрезвычайных ситуаций в районах Арктики и Крайнего Севера Российской Федерации. // Материалы научно-практической конференции «Обеспечение комплексной безопасности северных регионов Российской Федерации». — М.: НЦУКС МЧС России. 2008. 22–23 апреля. — С. 141–153.
4. Ипатов О.С., Кобяков А.А., Федоров А.М., Лапшин К.В. Архитектура распределенного комплекса мониторинга и управления движением судов по Северному морскому пути. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015 № 10 (171), октябрь. — С. 106–117.
5. Bolandi, H., Rezaei, M., Mohsenipour, R., Nemati, H., Smailzadeh, S.M. Attitude Control of a Quadrotor with Optimized PID Controller // Intelligent Control and Automation. 2013. Vol. 4, Issue 3. — P. 335–342.
6. Szafranski, G., Czyba, R. Different Approaches of PID Control UAV Type Quadrotor // Proceedings of the International Micro Air Vehicles Conference. 2011. — P. 70–75.
7. Madani, T., Benallegue A. Control of a quadrotor mini-helicopter via full state backstepping technique / IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA, USA. 2006. — P. 1515–1520.
8. Bouabdallah, S., Siegwart, R. Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor microquadrotor / IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain. 2005. — P. 2259–2264.
9. Peaucelle D., Fradkov A.L., Andrievsky B., Mahout V. Robust Simple Adaptive Control with Relaxed Passivity and PID control of a Helicopter Benchmark / Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy). 2011. P. 2315–2320.
10. Amelin K., Tomashevich S., Andrievsky B. Recursive Identification of Motion Model Parameters for ultralight UAV // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2015. Vol. 48, № 11. — P. 233–237.
11. Андриевский Б.Р., Шаров С.Н. Определение положения посадочного устройства беспилотного летательного аппарата в условиях качки судна. // Морской вестник. 2012. № 2. — С. 75–77.
12. Петухова Е.С., Шаров С.Н. Особенности траектории возвращения беспилотного летательного аппарата на движущийся носитель. // Известия РАН. № 66. 2010. — С. 40–48.
13. Шаров С.Н., Андриевский Б.Р., Дворяшин М.С., Петухова Е.С. Технические пути обеспечения посадки беспилотных летательных аппаратов на судно. // Известия РАН. № 4 (74). 2012. — С. 58–77.
14. Соловьева В.В., Петухова Е.С., Шаров С.Н. Экспериментальные исследования точности определения угловых координат и размеров объектов, наблюдаемых телевизионным каналом. // Известия РАН. № 72. 2012. — С. 45–57.