

# Дистанционное зондирование Земли с борта квадрокоптера в режиме свободного парения

М.А. Ковалев  
 Самарский национальный  
 исследовательский университет им.  
 академика С.П. Королева  
 Самара, Россия  
 kovalev@ssau.ru

В.А. Зеленский  
 Самарский национальный  
 исследовательский университет им.  
 академика С.П. Королева  
 Самара, Россия  
 vaz-3@yandex.ru

Д.Н. Овакимян  
 Самарский национальный  
 исследовательский университет им.  
 академика С.П. Королева  
 Самара, Россия  
 dd55@bk.ru

Т.В. Старостина  
 Самарский национальный  
 исследовательский университет им.  
 академика С.П. Королева  
 Самара, Россия  
 samara-tanya2000@mail.ru

Разработана схема управления квадрокоптером для дистанционного зондирования Земли в режиме свободного парения. Проведена формализация схемы управления, определены основные математические соотношения с учетом углов рыскания, крена и тангажа. Показан процесс преобразования схемы управления квадрокоптером на основе ее линеаризации и устранения связности каналов.

*Квадрокоптер, система управления, свободное парение, дистанционное зондирование Земли, углы рыскания, крена и тангажа, матрицы перехода, полетный контроллер*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Малые беспилотные летательные аппараты вертолетного типа с четырьмя винтами (квадрокоптеры) находят всё большее применение в научно-исследовательских и коммерческих проектах, в том числе для дистанционного зондирования Земли. Поэтому создание надёжной, многофункциональной, универсальной платформы автопилотирования является актуальной задачей, находящейся на стыке таких областей науки и техники, как электроника, приборостроение, информатика, техническое зрение и навигация.

Целью работы является разработка схемы управления квадрокоптером в режиме свободного парения, который наилучшим образом подходит для дистанционного зондирования Земли. Предложено использовать комплекс, включающий датчики различных физических величин, исполнительные устройства и вычислительные средства. В статье приведена структурная схема системы управления, а также разработан алгоритм ее работы.

## 2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРОМ

Рассмотрим обобщенную схему управления квадрокоптером, количество винтов в котором  $N = 4$  (рисунок 1).

Пусть  $\{I\}$  обозначает правостороннюю инерциальную систему координат (СК) с осями  $x_I, y_I, z_I$ , а  $\{B\}$  - жестко связанную СК с осями  $x_B, y_B, z_B$ , направленными вдоль главных осей инерции.

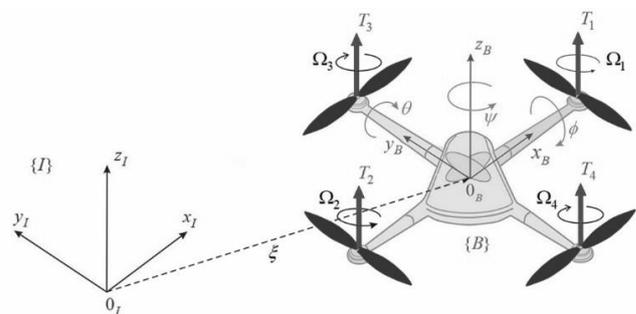


Рис. 1. Обобщенная схема управления квадрокоптером

Положение центра масс БПЛА в инерциальной СК  $\{I\}$  задается вектором  $\xi = (x, y, z)^T \in \{I\}$ , а переход от СК  $\{I\}$  к СК  $\{B\}$  осуществляется последовательными вращениями на углы Эйлера обозначенными, соответственно,  $\psi$  (рыскание),  $\phi$  (крен), и  $\theta$  (тангаж), которым соответствуют следующие матрицы перехода:

$$R_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix},$$

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Тогда Нелинейные уравнения движения квадрокоптера имеют вид:

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} = -mgz_I + RF$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + \omega \times (J\omega + J_R \Omega) = \tau$$

$$\frac{d\eta}{dt} = P(\eta)\omega$$

где:  $m$  - масса квадрокоптера;  $g$  - гравитационная постоянная;  $J$  - постоянный тензор инерции;  $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \in \{B\}$ , вектор угловой скорости СК  $\{B\}$  по отношению к инерциальной СК  $\{I\}$ ;  $J_R$  -

идентичные моменты инерции роторов;  $\Upsilon_R = [0 \ 0 \ J_R]^T$ ,  $\Omega_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) - угловые скорости вращения роторов.

Полученные выражение позволяют разработать структурную схему управления квадрокоптером, рассматривая сам аппарат, как автоматизированную систему управления.

### 3. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРОМ

На рис. 2 представлена автоматизированная система управления квадрокоптером.

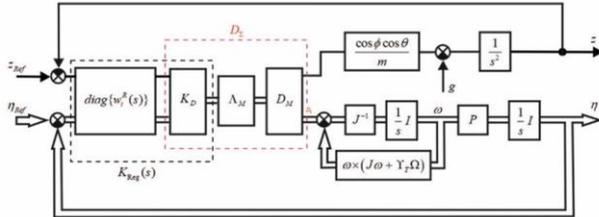


Рис. 2. Автоматизированная система управления квадрокоптером

Скалярные сигналы на блок-схеме на рисунке 2 соответствуют вертикальному движению  $z$  квадрокоптера вдоль инерциальной оси  $z_I$ , двойные линии обозначают векторы соответствующих размерностей. При этом пренебрегаем динамикой безщеточных моторов постоянного тока.

Система на рисунке 2 принадлежит к классу многосвязных систем автоматического регулирования (МСАУ), которые в англоязычной технической литературе называются “multi-input multi-output (MIMO) feedback control systems” [1].

Полагая, что квадрокоптер находится в режиме свободного парения (hover mode), нелинейными членами в динамических уравнениях вращательных движений можно пренебречь и приблизительно считать косинусы всех углов равными единице, а синусы равными нулю. При этих условиях структурная схема на рисунке 2 принимает линеаризованную форму, представленную на рисунке 3.

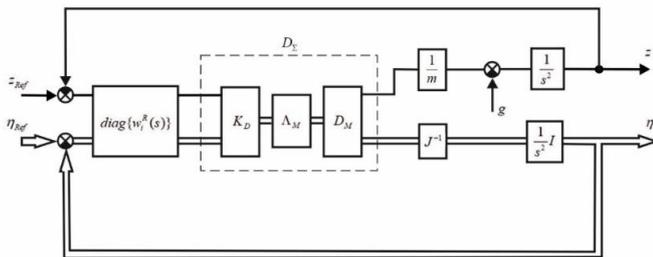


Рис. 3. Матричная структурная схема линеаризованной системы управления БПЛА.

При определенных условиях все кинематические связи между отдельными каналами на рисунке 3 взаимно компенсируются и многосвязная система распадается на четыре независимых системы управления с одним входом и одним выходом (single-input single-output, or SISO control system) [2]. Пример канала управления представлен на рисунке 4.

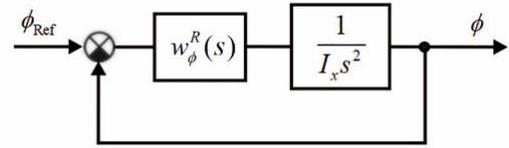


Рис. 4. Канал независимой системы управления

Структурную схему на рисунке 3 в нашем случае удобно преобразовать к виду, представленному на рисунке 5.

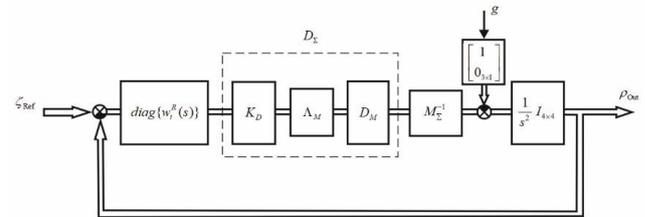


Рис. 5. Преобразованная структурная схема управления квадрокоптером

Четырехмерные векторы  $\zeta_{Ref}$ ,  $\rho_{Out}$  и диагональная 4x4 матрица  $M$  задаются следующими выражениями:

$$\zeta_{Ref} = \begin{bmatrix} z_{Ref} \\ \eta_{Ref} \end{bmatrix}, \quad \rho_{Out} = \begin{bmatrix} z \\ \eta \end{bmatrix},$$

$$M_{\Sigma} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}.$$

Использование разработанной схемы управления позволяет в случае свободного парения квадрокоптера разгрузить его полетный контроллер для задач, связанных с функционированием полезной нагрузки. При этом в режиме реального времени могут решаться задачи, связанные с дистанционным зондированием поверхности Земли.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена имеющая признаки новизны структурная схема управления квадрокоптером в режиме свободного парения для дистанционного зондирования Земли. В результате линеаризации схемы управления и исключения связности каналов исключается перегрузка полетного контроллера, что позволяет использовать его вычислительные мощности для обслуживания задач полезной нагрузки, в том числе, связанных с дистанционным зондированием Земли.

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Castillo, P. Modelling and Control of Mini-Flying Machines / P. Castillo, R. Lozano, A. Dzul – London: Springer, 2005, - 259 p.  
 [2] Kanaan, M. A New Algorithm for Indoor Geolocation / M. Kanaan, K. Pahlavan – Barcelona, 2004, - 1906 p.