

УДК 629.7.05:629.735.7

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МУЛЬТИКОПТЕРА

© 2012 Д. В. Ситников, Ю. А. Бурьян, Г. С. Русских

Омский государственный технический университет

Рассмотрен принцип построения системы управления мультикоптера, состоящего из двух подсистем: системы управления движением центра масс и системы угловой стабилизации. Система управления реализуется на базе микроконтроллера, задача которого состоит в том, чтобы обеспечивать движение аппарата по заданному маршруту и управлять стабилизацией аппарата в воздухе в горизонтальном или в заданном угловом положении путем подачи управляющих сигналов двигателям.

Мультикоптер, квадрокоптер, БПЛА, автопилот, система управления движением, угловая стабилизация.

Мультикоптер представляет собой летающую платформу с 4 (квадрокоптер), 6, 8, 12 бесколлекторными двигателями с винтами. В полете платформа занимает горизонтальное положение относительно поверхности земли, может зависать над определенным местом, свободно перемещаться во всех направлениях. Построение системы управления в данной работе рассмотрено на примере квадрокоптера.

Для устойчивого полета используется микроконтроллер, задача которого состоит в том, чтобы управлять стабилизацией летающей платформы в воздухе в горизонтальном или в заданном угловом положении путем подачи управляющих сигналов двигателям. Он использует данные от трех гироскопов, акселерометра, магнетометра, барометрического датчика и вычисляет скорость для каждого отдельного двигателя. Система стабилизации также компенсирует внешние возмущения, такие как ветер, например.

Мультикоптер может быть использован как средство для многих целей, таких как: видео и фотографии для топографической съемки; снимки с воздуха актуальных новостей и событий; инспекция крыш, высотных зданий, сельскохозяйственных угодий; наблюдение в местах, опасных для человека (химические и радиоактивные загрязнения, лесные пожары и т.д.); координация спасательных действий; доставка небольших грузов, например, медикаментов.

Система управления состоит из двух подсистем: системы управления движением центра масс, формирующей программное значение углового положения корпуса квадрокоптера, и системы угловой ориентации, обеспечивающей разворот в заданное угловое положение.

Математическая модель движения квадрокоптера

При составлении математической модели рассматривались две системы координат: неподвижная система координат $Oxyz$ и связанная система координат $Cx_1y_1z_1$ (рис.1).

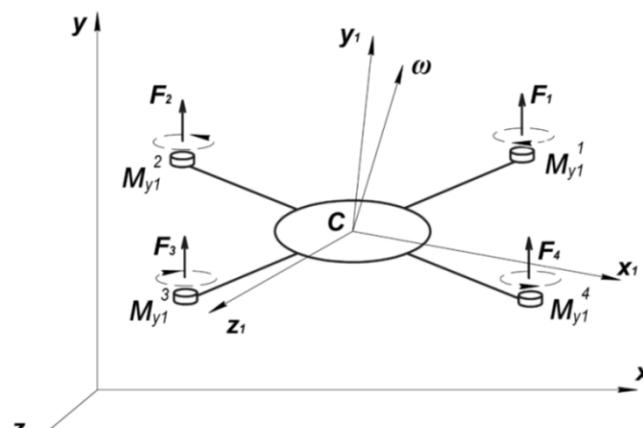


Рис.1. Неподвижная и связанная системы координат

Пространственное движение летательного аппарата описывается системой 12 обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка [2] для координат центра масс x, y, z , проекций скоростей V_x, V_y, V_z :

$$\begin{cases} \dot{x} = V_x, \\ \dot{y} = V_y, \\ \dot{z} = V_z; \end{cases} \begin{cases} \dot{V}_x = R_x/m, \\ \dot{V}_y = R_y/m - g, \\ \dot{V}_z = R_z/m; \end{cases}$$

а также для углов тангажа ϑ , крена γ , курса ψ и составляющих угловой скорости $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}$ относительно осей связанной системы координат:

$$\begin{cases} \dot{\vartheta} = \omega_{y1} \sin \gamma + \omega_{z1} \cos \gamma, \\ \dot{\psi} = \frac{1}{\cos \vartheta} (\omega_{y1} \cos \gamma - \omega_{z1} \sin \gamma), \\ \dot{\gamma} = \omega_{x1} - \operatorname{tg} \vartheta (\omega_{y1} \cos \gamma - \omega_{z1} \sin \gamma); \end{cases}$$

$$\begin{cases} J_{x1} \dot{\omega}_{x1} = (J_{y1} - J_{z1}) \omega_{y1} \omega_{z1} + M_{x1}, \\ J_{y1} \dot{\omega}_{y1} = (J_{z1} - J_{x1}) \omega_{x1} \omega_{z1} + M_{y1}, \\ J_{z1} \dot{\omega}_{z1} = (J_{x1} - J_{y1}) \omega_{x1} \omega_{y1} + M_{z1}; \end{cases}$$

где R_x, R_y, R_z – проекции равнодействующей силы тяги четырех двигателей $\bar{R} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_3 + \bar{F}_4$ (рис. 1).

Можно считать, что силы тяги $F_i (i = 1...4)$ двигателей подвергаются прямому регулированию.

M_{x1}, M_{y1}, M_{z1} – проекции главного момента сил

$$\begin{cases} M_{x1} = (F_1 + F_2 - F_3 - F_4) a \cdot \cos 45^\circ, \\ M_{y1} = M_{y1}^1 - M_{y1}^2 + M_{y1}^3 - M_{y1}^4, \\ M_{z1} = (F_1 - F_2 - F_3 + F_4) a \cdot \sin 45^\circ; \end{cases}$$

где a – расстояние от оси двигателя до центра масс квадрокоптера,

$M_{y1}^i = k_M \cdot F_i$ – реактивные моменты двигателей ($i = 1...4$), пропорциональные тяге двигателей.

В приведенной математической модели сделан ряд допущений: не учтена кривизна земной поверхности, не учтены силы аэродинамического сопротивления (скорость полета не более 20 м/с), ускорение свободного падения принято постоянным (высота полета не более 200 м).

Система управления движением центра масс

Согласно техническому заданию, траектория полета квадрокоптера будет задана рядом точек $A_0 = O, A_1, A_2...A_n$, где

точка O – точка старта, A_n – точка посадки. Точки $A_i (i=1..n)$ заданы координатами (x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}) .

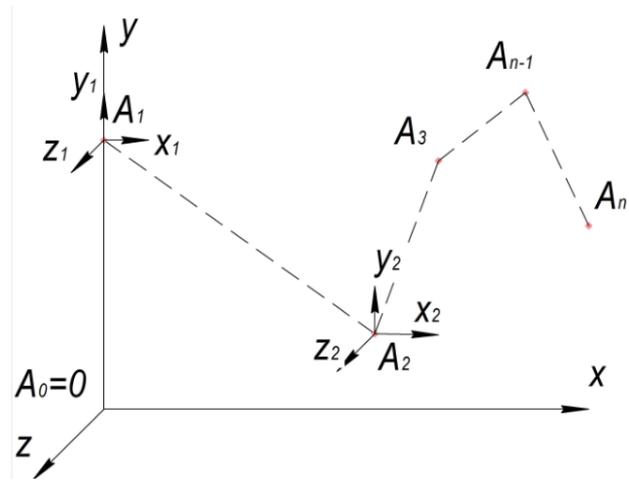


Рис. 2. Заданный маршрут движения

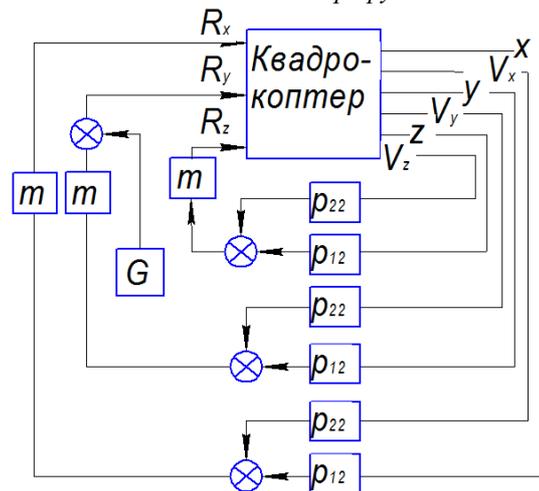


Рис. 3. Структурная схема системы управления движением центра масс

При синтезе алгоритма управления каждый отрезок траектории $A_{i-1}A_i$ рассматривается отдельно. Целью управления на отрезке $A_{i-1}A_i$ является достижение точки A_i с координатами (x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}) (рис. 2).

Выберем неподвижную систему координат таким образом, чтобы начало координат совпадало с целью A_i . Таким образом, цель управления – достижение начала координат. После того, как аппарат достиг цели, выбирается следующая цель и новая неподвижная система координат.

Структурная схема системы управления показана на рис. 3. Она представляет собой трехканальную систему с жесткими обратными связями по координате и скорости. Коэффициенты передачи обратных связей по p_{12} и p_{22} определяются методом аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) [1].

Программные значения величины равнодействующей и углов крена и тангажа определяются по формулам пересчета:

$$R^{\Pi} = \sqrt{(R_x^{\Pi})^2 + (R_y^{\Pi})^2 + (R_z^{\Pi})^2},$$

$$\gamma_{\Pi} = \arcsin \frac{R_z^{\Pi}}{R^{\Pi}}, \quad \vartheta_{\Pi} = -\arcsin \frac{R_x^{\Pi}}{R^{\Pi} \cos \gamma_{\Pi}}.$$

Программное значение угла курса ψ_{Π} определяется, например, требуемым направлением фотокамеры. Полученные программные значения углов γ_{Π} , ϑ_{Π} , ψ_{Π} являются входными величинами для системы угловой стабилизации.

Система угловой стабилизации

Система угловой стабилизации обеспечивает разворот корпуса квадрокоптера в заданное угловое положение (γ_{Π} , ϑ_{Π} , ψ_{Π}) и представляет собой трехканальную систему с жесткими обратными связями по углам и угловым скоростям (на рис. 4 показана схема для канала крена, для каналов тангажа и курса схемы аналогичны), позволяющую определить проекции главного момента M_x , M_y , M_z , обеспечивающие поворот в заданное угловое положение. Значения

коэффициентов обратных связей k_{γ} , k_{ψ} , k_{ϑ} , k_{ω} определяются методом АКОР [1].

Требуемые значения проекций главного момента M_x , M_y , M_z обеспечиваются тягами двигателей, определяемыми по формулам:

$$F_1 = \frac{R_{\Pi}}{4} + \frac{M_x}{4a \cdot \cos 45^{\circ}} + \frac{M_z}{4a \cdot \sin 45^{\circ}} + \frac{M_y}{4k_M},$$

$$F_2 = \frac{R_{\Pi}}{4} + \frac{M_x}{4a \cdot \cos 45^{\circ}} - \frac{M_z}{4a \cdot \sin 45^{\circ}} - \frac{M_y}{4k_M},$$

$$F_3 = \frac{R_{\Pi}}{4} - \frac{M_x}{4a \cdot \cos 45^{\circ}} - \frac{M_z}{4a \cdot \sin 45^{\circ}} + \frac{M_y}{4k_M},$$

$$F_4 = \frac{R_{\Pi}}{4} - \frac{M_x}{4a \cdot \cos 45^{\circ}} + \frac{M_z}{4a \cdot \sin 45^{\circ}} - \frac{M_y}{4k_M}.$$

Моделирование работы системы управления

Работа системы управления движением квадрокоптера исследована с помощью модели (рис. 5), построенной в программе Matlab/Simulink, включающей подсистему управления движением центра масс (УДЦМ), блок формул пересчета (ФП) подсистему угловой стабилизации (УС) и математическую модель квадрокоптера. Подсистемы реализуют алгоритмы и формулы, приведенные выше.

На рис. 6 приведено изменение координат центра масс квадрокоптера, двигающегося под управлением предложенной системы. Моделирование проведено для квадрокоптера массой 2 кг при начальных координатах:

$$x_0 = -100 \text{ м}, \quad y_0 = -30 \text{ м}, \quad z_0 = -20 \text{ м}.$$

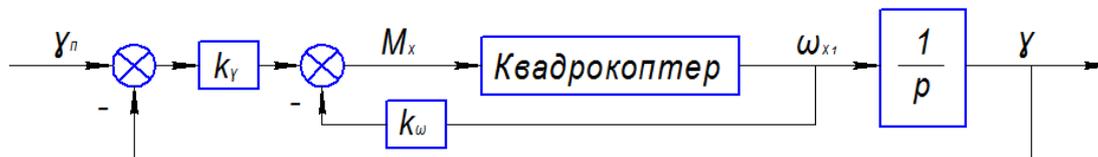


Рис. 4. Структурная схема системы угловой стабилизации (канал крена)

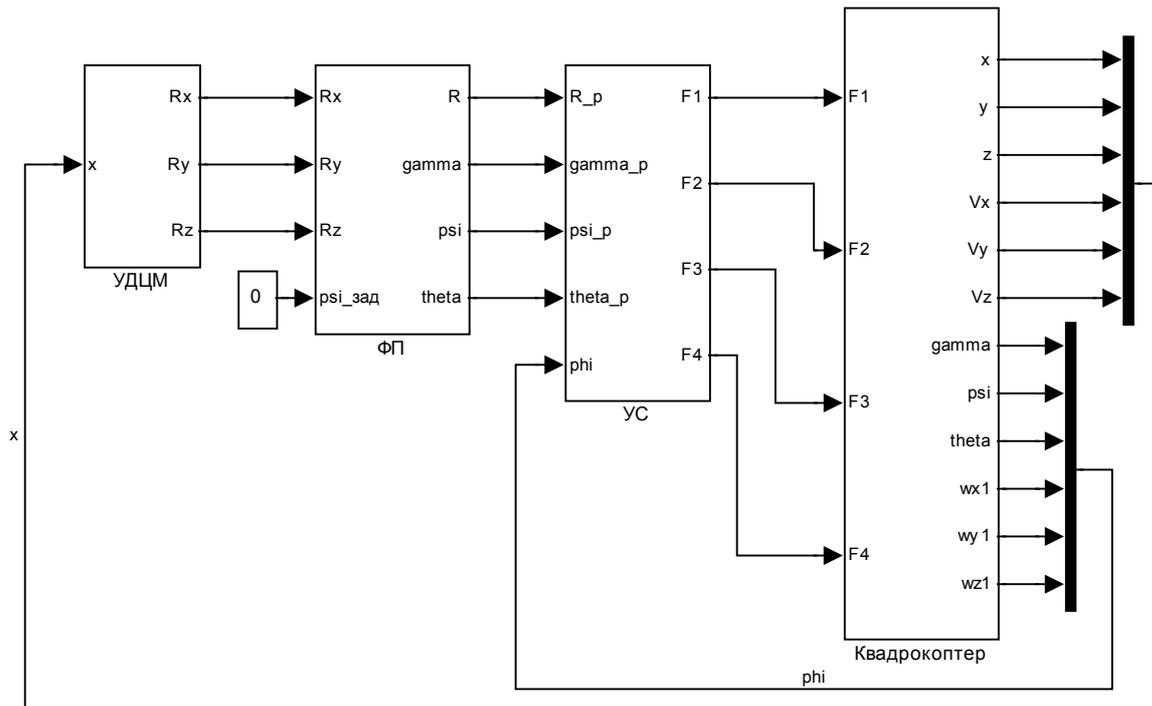


Рис.5. Модель системы управления движением квадрокоптера

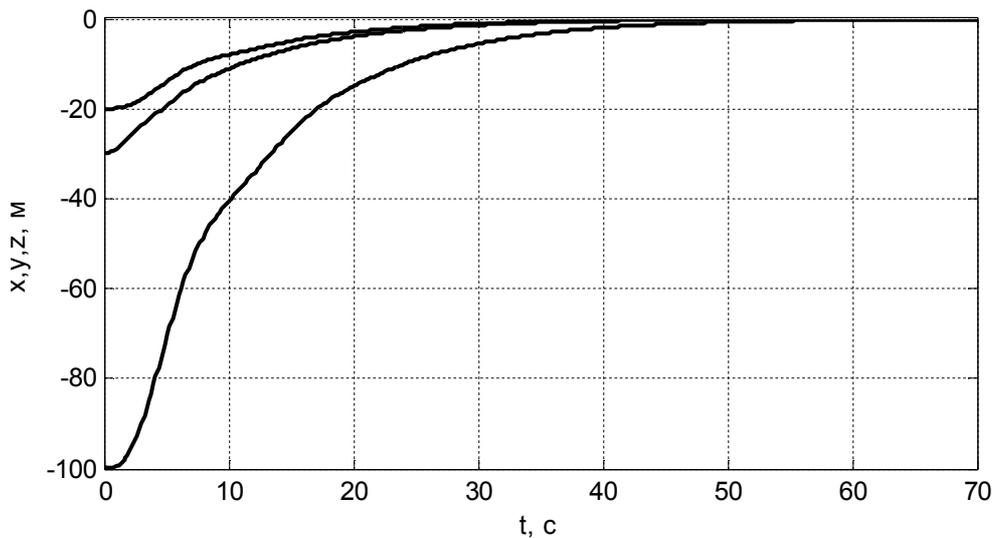


Рис. 6.Изменение координат центра масс

Библиографический список

1. Александров, А. Г. Оптимальные и адаптивные системы [Текст] / А. Г. Александров – М.: Высшая школа, 2003. – 264 с.
 2. Разоренов, Г. Н. Системы управления летательными аппаратами [Текст] / Г. Н. Разоренов, Э. А. Бахрамов, Ю. Ф. Титов – М.: Машиностроение, 2003. – 583 с.

MOTION CONTROL SYSTEM OF MULTICOPTER

© 2012 D. V.Sitnikov, Y. A. Burian, G. S. Russkih

Omsk State Technical University

The principle of synthesis of multicopter control systems consisting of two subsystems: motion control system of center of mass and angular stabilization system. The control system is implemented on the basis of the microcontroller, whose mission is to provide a multicopter movement for a given route and control the stabilization of the apparatus in the air in a horizontal or in a specified angular position by applying control signals to engines.

Multicopter, quadcopter, UAV, the autopilot, motion control system, angular stabilization.

Информация об авторах

Ситников Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы теории механики и автоматического управления», Омский государственный технический университет. E-mail: sitnikov@nm.ru. Область научных интересов: системы оптимального управления.

Бурьян Юрий Андреевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Основы теории механики и автоматического управления», Омский государственный технический университет. E-mail: burian@omgtu.ru. Область научных интересов: системы автоматического управления, навигация подвижных объектов.

Русских Григорий Серафимович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Основы теории механики и автоматического управления», Омский государственный технический университет. E-mail: russgrishok@mail.ru. Область научных интересов: системы автоматического управления.

Sitnikov Dmitriy Vladimirovich, candidate of technician science, associate professor, Omsk State Technical University. E-mail: sitnikov@nm.ru. Area of research: optimal control system.

Burian Yury Andreevich, doctor of technical sciences, professor, Omsk State Technical University. E-mail: burian@omgtu.ru. Area of research: automatic control system, vehicle navigation.

Russkih Gregory Serafimovich, candidate of technician science, teacher, Omsk State Technical University. E-mail: russgrishok@mail.ru. Area of research: automatic control system.