

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авиационные системы улучшенного и синтезированного видения // Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников / Под ред. академика РАН Е.А. Федосова. Научно-информационный центр ФГУП «ГосНИИАС», 2011.
2. Руководство Р-315 «По минимальным стандартам характеристик авиационных систем (MASPS) для систем улучшенного видения, систем искусственного видения, комбинированных систем искусственного видения и бортовых систем увеличения дальности видения» Авиационного Регистра Межгосударственного Авиационного Комитета (АР МАК).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.А. Башков.

Костяшкин Леонид Николаевич – Научно-конструкторский центр видеокомпьютерных технологий ОАО «Рязанский государственный приборный завод»; e-mail: hunter-rzn@yandex.ru; 390000, г. Рязань, ул. Семинарская, 32; тел.: 84912218381; к.т.н.; доцент; директор – главный конструктор.

Логинов Александр Анатольевич – e-mail: loginal@mail.ru; тел.: 84912298564; к.т.н.; доцент; главный конструктор.

Никифоров Михаил Борисович – Рязанский государственный радиотехнический университет; e-mail: nikiforov.m.b@evm.rsreu.ru; 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1; тел.: 84912460350; к.т.н.; доцент; директор Научно-технического центра СпецЭВМ.

Kostyashkin Leonid Nikolayevich – Research and Development Center of Video Information Technologies, Ryazan State Instrument-Making Enterprise; e-mail: hunter-rzn@yandex.ru; 32, Seminarskaya St., Ryazan, 390000; phone: +74912218381; cand. of eng. sc.; associate professor; director – chief designer.

Loginov Alexander Anatolievich – e-mail: loginal@mail.ru; phone: +74912298564; cand. of eng. sc.; associate professor; chief designer.

Nikiforov Mikhail Borisovich – Ryazan State Radio Engineering University; e-mail: nikiforov.m.b@evm.rsreu.ru; 59/1, Gagarina street, Ryazan, 390005, Russia; phone: +74912460350; cand. of eng. sc.; associate professor; director of laboratory «Special computers».

УДК 681.51

Г.Е. Веселов, А.А. Скляр, С.А. Скляр

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Освещается проблема синтеза закона управления движением четырехвинтового БПЛА. Для решения данной задачи в статье предлагается новый подход к синтезу систем управления мобильными роботами, базирующийся на принципах и методах синергетической теории управления. Задача синергетического синтеза системы пространственного управления мобильным роботом рассматривается с учетом анализа математической модели и специфики механизма движения четырехвинтового шасси. В синергетической теории управления совокупность критериев управления системы принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов. Инварианты выступают в роли цели управления, на них обеспечивается выполнение заданной технологической задачи, а процедура синергетического синтеза сводится к поиску законов управления, при которых эти заданные инварианты выполняются. В статье в качестве условий, предъявляемым к синтезируемому закону управления, выступают асимптотически устойчивое движение робота к заданной точке и постоянство ориентации платформы.

Мобильный робот; квадрокоптер; БПЛА; инварианты; позиционное управление; синергетическая теория управления.

G.E. Veselov, A.A. Sclyarov, S.A. Sclyarov

SYNERGISTIC APPROACH TO THE CONTROL OF UNMANNED AERIAL VEHICLE

This paper explores the problem of synthesis of synergetic control of UAV movement. To solve this problem in article presents new approach to mobile robots control based on principals and methods of synergetic control theory. The task of the synergetic synthesis of spatial control system of mobile robot is considered with the analysis of mathematic model and specifics of quadrotor chassis movement. In the theory of synergetic control the set of criteria for the control system is usually expressed in the form of an appropriate system of invariants. Invariants play the role of control objectives, they enforced a given technological problem, and the synergetic synthesis procedure reduces to process of finding control laws, which these given invariants are satisfied. At this paper as imposed condition on synthesized control law, serve an asymptotically stable motion of the robot to a given point and constancy of platform orientation.

Mobile robot; quadrocopter; UAV; invariants; positioning control; synergetic control theory.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) применяются во многих сферах жизнедеятельности человека, в частности: в геодезии при построении карт высот местности, в полиции для фиксации нарушений и отслеживания преступников, в военном деле для выполнения разведывательных операций. К современным беспилотным летательным аппаратам, действующим в городских условиях, предъявляются жесткие требования маневренности, в связи с этим из всех существующих типов БПЛА можно выделить четырехвинтовой беспилотный летательный аппарат (квадрокоптер) как наиболее маневренный и предназначенный для работы в условиях ограниченного пространства. Однако, в связи с особенностями конструкции квадрокоптера, основным его недостатком является сложность в управлении из-за большого количества степеней свободы.

Для реализации пространственного управления мобильным роботом (МР) с данным видом шасси в статье предлагается использовать принципы и методы синергетической теории управления (СТУ)[1, 2], как наиболее подходящей для решения многомерных нелинейных задач управления.

Квадрокоптер (рис. 1) является разновидностью летательного аппарата с вертикальным вектором тяги [3, 4], приводящимся в движение четырьмя роторами со скоростью вращения $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$, закреплённых в центре масс робота M на двух пересекающихся крест-накрест металлических балках, вращающихся диагонально в противоположных направлениях (рис. 2).



Рис. 1. Внешний вид квадрокоптера

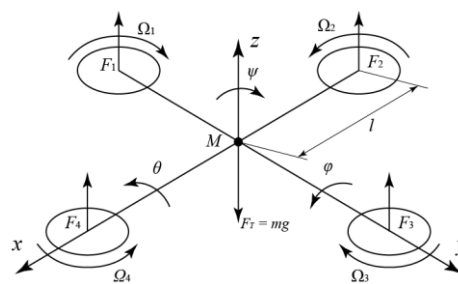


Рис. 2. Схема движения квадрокоптера

Для синтеза стратегий управления необходимо построить математическую модель рассматриваемого объекта. Движение БПЛА можно считать суммой поступательного движения центра масс и сферического движения тела относительно

центра масс [4]. Центр масс квадрокоптера находится на пересечении балок, на которых закреплены винты. Режим движения БПЛА описывается следующей системой дифференциальных уравнений [4]:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= V_x; \quad \frac{dy}{dt} = V_y; \quad \frac{dz}{dt} = V_z; \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_\theta; \quad \frac{d\varphi}{dt} = \omega_\varphi; \quad \frac{d\psi}{dt} = \omega_\psi; \\ m \frac{dV_x}{dt} &= (\sin\psi \sin\varphi + \cos\psi \sin\theta \cos\varphi)U_1; \quad m \frac{dV_y}{dt} = (\sin\psi \sin\theta \cos\varphi - \cos\psi \sin\varphi)U_1; \\ m \frac{dV_z}{dt} &= U_1 \cos\theta \cos\varphi - mg; \quad I_{xx} \frac{d\omega_\varphi}{dt} = (I_{yy} - I_{zz})\omega_\theta\omega_\psi + U_2; \\ I_{yy} \frac{d\omega_\theta}{dt} &= (I_{zz} - I_{xx})\omega_\varphi\omega_\psi + U_3; \quad I_{zz} \frac{d\omega_\psi}{dt} = (I_{xx} - I_{yy})\omega_\varphi\omega_\theta + U_4, \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y, z – координаты центра тяжести робота; V_x, V_y, V_z – проекции вектора линейной скорости робота; θ – угол тангажа; φ – угол крена, ψ – угол рыскания, ω_θ – угловая скорость тангажа; ω_φ – угловая скорость крена; ω_ψ – угловая скорость рыскания; m – масса робота; I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – моменты инерции вокруг оси x, y и z соответственно; U_1, U_2, U_3, U_4 – каналы управления БПЛА.

Уравнения связи каналов управления U_1, U_2, U_3, U_4 , со скоростями вращения винтов $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ имеют вид

$$\begin{aligned} U_1 &= b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2); \quad U_2 = lb(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2); \\ U_3 &= lb(-\Omega_1^2 + \Omega_3^2); \quad U_4 = d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2), \end{aligned} \quad (2)$$

где l – расстояние между центром квадрокоптера и центром пропеллера, b и d – аэродинамические составляющие тяги и коэффициента сопротивления соответственно. Упрощенно силу тяги i -того двигателя можно представить в виде [4]

$$F_i = k_i \Omega_i^2, \quad (3)$$

где k_i – константы, образуемые параметрами b, l и d . В силу уравнения (3) тяги двигателей квадрокоптера можно выразить из системы уравнений (2).

Таким образом, задачей синтеза является проектирование координирующей стратегии управления тяговыми силами четырех моторов F_1, F_2, F_3, F_4 , обеспечивающей асимптотически устойчивое передвижение БПЛА к заданной позиции x_0, y_0, z_0 с удержанием заданного угла рыскания ψ_0 . Синтезированные стратегии управления силами являются задающими воздействиями для подсистем управления исполнительными приводами квадрокоптера [3–5]. Стоит отметить, что построение законов управления для модели (1)–(3) классическими методами теории автоматического управления является не тривиальной задачей [5], поэтому при синтезе законов управления БПЛА предлагается использовать принципы и методы СТУ [1, 2].

В СТУ совокупность критериев управления системы принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов. Инварианты выступают в роли цели управления, на них обеспечивается выполнение заданной технологической задачи, а процедура синергетического синтеза сводится к поиску законов управления, при которых эти заданные инварианты выполняются.

В качестве инвариантов для МР выберем перемещение его центра тяжести в координаты x_0, y_0, z_0 , а также удержание угла ориентации БПЛА ψ в заданном направлении ψ_0 . Таким образом, подмножество целей для подсистемы приводов будет иметь вид

$$\Sigma_1 = \{x = x_0, \quad y = y_0, \quad z = z_0, \quad \psi = \psi_0\}. \quad (4)$$

Для осуществления синергетического управления согласно процедуре синтеза методом АКАР [1, 2, 6–8] необходимо декомпозировать исходную систему (1) с учетом подмножества целей (4), для этого введем первую совокупность макропеременных:

$$\Psi_1 = \omega\theta - \gamma_1; \quad \Psi_2 = \omega\varphi - \gamma_2; \quad \Psi_3 = \omega\psi - n_1(\psi_0 - \psi); \quad \Psi_4 = V_z - n_2(z_0 - z), \quad (5)$$

где γ_1 и γ_2 – «внутренние» законы управления системы [1, 2], n_1 и n_2 – положительные константы. Введенные макропеременные Ψ_3 и Ψ_4 служат для удержания заданных в подмножестве целей (4) угловой ориентации и высоты БПЛА соответственно. Система макропеременных (5) согласно СТУ должна удовлетворять решению $\Psi_1 = 0$, $\Psi_2 = 0$, $\Psi_3 = 0$ и $\Psi_4 = 0$ функциональных уравнений:

$$\dot{\Psi}_i + \lambda_i \Psi_i = 0; \quad i = \overline{1,4}. \quad (6)$$

Решением системы функциональных уравнений (6) являются законы управления U_1, U_2, U_3, U_4 , обеспечивающий перевод изображающей точки (ИТ) замкнутой системы в окрестность пересечения многообразий $\Psi_1 = 0$, $\Psi_2 = 0$, $\Psi_3 = 0$ и $\Psi_4 = 0$, в результате которого происходит динамическая декомпозиция исходной системы (1). В итоге поведение мобильного робота на пересечении многообразий будет описываться как

$$\frac{dx}{dt} = V_x; \quad \frac{dy}{dt} = V_y; \quad \frac{dz}{dt} = n_2(z_0 - z); \quad \frac{d\theta}{dt} = \gamma_1; \quad \frac{d\varphi}{dt} = \gamma_2; \quad \frac{d\psi}{dt} = n_1(\psi_0 - \psi);$$

$$m \frac{dV_x}{dt} = (\sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \sin \theta \cos \varphi) U_1; \quad (7)$$

$$m \frac{dV_y}{dt} = (-\cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \sin \theta \cos \varphi) U_1; \quad m \frac{dV_z}{dt} = U_1 \cos \theta \cos \varphi - mg.$$

Для того чтобы выполнить оставшиеся условия подмножества целей (4), а именно $x = x_0$ и $y = y_0$, необходимо ввести совокупность макропеременных

$$\Psi_5 = V_x - n_3(x_0 - x); \quad \Psi_6 = V_y - n_4(y_0 - y); \quad (8)$$

где n_3 и n_4 – положительные константы. Система макропеременных (8) согласно СТУ должна удовлетворять решению $\Psi_5 = 0$ и $\Psi_6 = 0$ функциональных уравнений:

$$\ddot{\Psi}_5 + \lambda_5 \dot{\Psi}_5 + \lambda_6 \Psi_5 = 0; \quad \ddot{\Psi}_6 + \lambda_7 \dot{\Psi}_6 + \lambda_8 \Psi_6 = 0. \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (8) и (9), с учетом декомпозированной математической модели (7) приводит к получению внутренних законов управления γ_1 и γ_2 . Полученные «внутренние» законы управления необходимо подставить в управления U_1, U_2, U_3, U_4 , которые являются решениям функциональных уравнений (6). В результате, с учетом математической модели мобильного робота (1), уравнений связи (2), (3) и управлений U_1, U_2, U_3, U_4 , можно получить координирующей стратегии управления тяговыми силами четырех моторов квадрокоптера F_1, F_2, F_3 , и F_4 .

Проведем компьютерное исследование синтезированной замкнутой системы управления четырехвинтовым БПЛА. В качестве параметров объекта управления возьмем следующие значения:

$$m = 6 \text{ кг}; \quad l = 0,3 \text{ м}; \quad b = 121,5 \times 10^{-6}; \quad d = 2,7 \times 10^{-6};$$

$$I_{xx} = 0,6 \text{ кг}\times\text{м}^2; \quad I_{yy} = 0,6 \text{ кг}\times\text{м}^2; \quad I_{zz} = 0,6 \text{ кг}\times\text{м}^2.$$

Примем в качестве внутренних параметров регулятора значения:

$$\lambda_1 = 0,5; \quad \lambda_2 = 0,5; \quad \lambda_3 = 1; \quad \lambda_4 = 0,5; \quad \lambda_5 = 0,5; \quad \lambda_6 = 0,2; \quad \lambda_7 = 0,5; \quad \lambda_8 = 0,2;$$

$$n_1 = 0,2; \quad n_2 = 0,2; \quad n_3 = 0,2; \quad n_4 = 0,2.$$

Обозначим целевые координаты $x_0 = 40$ м, $y_0 = 20$ м, $z_0 = 60$ м и угол $\psi_0 = 0,3$ рад.

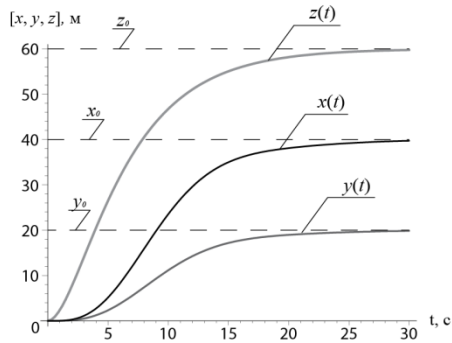


Рис. 3. Переходные процессы относительно линейного перемещения центра тяжести БЛА

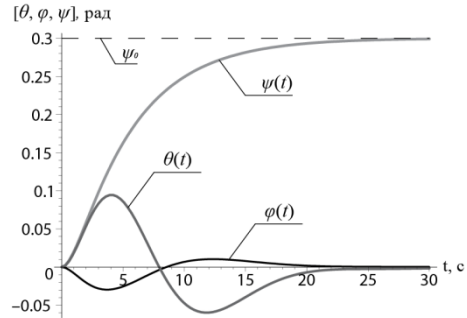


Рис. 4. Переходные процессы относительно углового перемещения центра тяжести БЛА

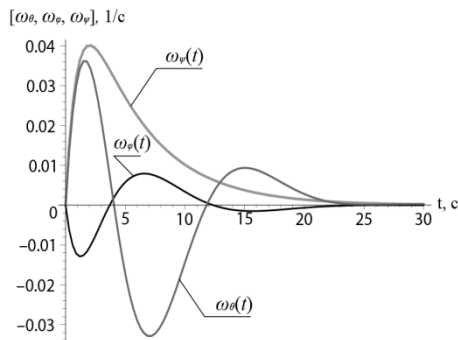


Рис. 5. Переходные процессы относительно угловых скоростей

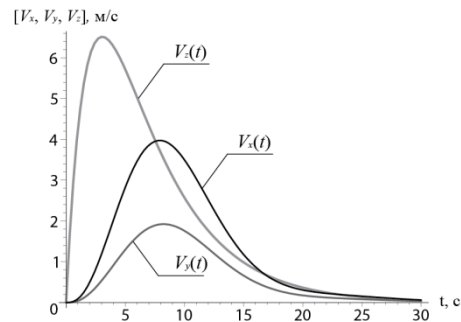


Рис. 6. Переходные процессы относительно линейных скоростей

Представленные результаты моделирования подтверждают, что в синтезированной замкнутой системе управления обеспечивается выполнение введенной системы инвариантов.

Таким образом, в статье представлен важный научный результат – разработана процедура аналитического синтеза координирующей стратегии векторного управления беспилотным летательным аппаратом с использованием полных нелинейных моделей движения. Указанная стратегия управления обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутых систем и четкое исполнение заданных инвариантов. Представленный синергетический закон управления не учитывает случайные внешние возмущения, однако наблюдение возмущений возможно с использованием метода синергетического синтеза адаптивных систем управления [1], но в рамках статьи процедура синтеза не приводится.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
2. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Мушенко А.С. и др. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – М.: КомКнига, 2006. – 304 с.
3. Beji L., Abichou A. Trajectory and Tracking of a Mini-Rotorcraft // Proceedings of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 2005. – P. 2618-2623.

4. *Tommaso Bresciani*. Modeling, identification and control of a quadrotor helicopter // Master thesis, Lund University. 2008.
5. *Luis Rodolfo García Carrillo, Alejandro Enrique Dzul López, Rogelio Lozano, Claude Pégard*. Quad Rotorcraft Control // Springer London Heidelberg New York Dordrecht. 2012.
6. *Колесников А.А.* Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия ТРТУ. – 2006. – № 6 (61). – С. 10-38.
7. *Веселов Г.Е., Скляр А.А., Скляр С.А.* Синергетическое управление траекторным движением гусеничного робота // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 4 (129). – С. 187-193.
8. *Веселов Г.Е.* Синергетический подход к синтезу иерархических систем управления // Известия ТРТУ. – 2006. – № 6 (61). – С. 73-84.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Тарарыкин.

Веселов Геннадий Евгеньевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: gev@sfedu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634360450; факультет информационной безопасности; декан.

Скляр Андрей Анатольевич – e-mail: s.andrey.88@mail.ru; тел.: 89612957403; кафедра СиПУ; аспирант.

Скляр Сергей Анатольевич – mail: predator86@mail.ru; тел.: 89034026114; кафедры СиПУ; аспирант.

Veselov Gennady Evgen'evich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: gev@sfedu.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634360450; college of informational security; dean.

Sclyarov Andrey Anatolevich – e-mail: s.andrey.88@mail.ru; phone: +79612957403; the department of SCP; postgraduate student.

Sclyarov Sergey Anatolevich – e-mail: predator86@mail.ru; phone: +79034026114; the department of SCP; postgraduate student.

УДК 621.52.3

В.И. Лапшин, А.А. Рыбаков, С.П. Котиков, Ю.П. Ларионов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДВИЖНОГО ЗАПРАВОЧНОГО КОМПЛЕКСА

Разрабатывая сложные многопроцессорные распределенные устройства, приходится сталкиваться с таким фактором, как трудоемкость отладки взаимодействия составных частей в режиме реального времени. Кроме того, приступить к отладке программного обеспечения можно только имея изготовленные устройства, и очень часто на этапе отладки выясняется, что из-за просчетов в проектировании необходимо: либо изменить схемотехнику того или иного устройства управления, либо внести изменения в работу периферийных (управляемых) устройств.

Учитывая тот факт, что разрабатываемый комплекс содержит несколько функционально законченных контроллеров было решено разработать систему моделирования комплекса, позволяющую выполнить отладку «штатного» ПО контроллеров, входящих в его состав, без их реального изготовления. Это позволяет выполнить проверку правильности заложенных в основу комплекса схемотехнических решений и алгоритмов работы.

Моделирование; заправочный комплекс; микропроцессорные распределенные устройства.