

УДК 681.5

## ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КВАДРОКОПТЕРАМИ В СОСТАВЕ ГРУППЫ ЛИДЕР—ВЕДОМЫЕ\*

К. Ю. Котов, А. С. Мальцев, А. А. Нестеров, М. А. Соболев, А. П. Ян

*Институт автоматизи и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: kotov@idisys.iae.nsk.su*

Рассматривается задача управления квадрокоптерами в составе группы лидер—ведомые. Предложен метод, позволяющий сформировать управляющие воздействия для робота-ведомого группы только на основе информации о параметрах движения ведомого и относительного расположения ведомого и лидера.

*Ключевые слова:* квадрокоптер, управление движением группировки, вынужденное движение.

DOI: 10.15372/AUT20170104

**Введение.** В последнее десятилетие значительно возрос интерес к управлению группировками компактных беспилотных летательных аппаратов мультироторных конфигураций, что объясняется простотой, гибкостью и надёжностью их конструкции [1–3]. Для таких задач, как поиск, наблюдение, транспортировка, аварийно-спасательные и военные операции, исследование местности, использование группы роботов более эффективно, чем применение одного робота.

Известной стратегией группового управления в живом мире (колонии муравьёв, пчелиные рои, стаи птиц и рыб) является стратегия лидер—ведомые, предполагающая разделение членов группы на объекты-лидеры и объекты-ведомые. Для оценки своего относительного местоположения в таких группах объекты используют визуальную и тактильную информацию. Применение этой аналогии в робототехнике означает, что мобильный робот в группе может обладать сенсорной информацией о характере собственного движения и расположении по отношению к другим роботам группы.

В отличие от [4, 5], где для вычисления требуемого положения ведомого необходимо знать абсолютное положение и/или курс лидера, в данной работе используется подход, в котором положение ведомого задаётся только в его системе координат с привлечением информации об относительном взаимном расположении лидера и ведомого. Рассмотрена задача управления движением однородной группы мобильных роботов квадросоторного типа. Формирование управляющих воздействий для ведомого осуществляется методом структурного синтеза замкнутых законов управления на основе организации движения системы вдоль предписанной траектории в пространстве состояний [6–8].

Численные эксперименты подтверждают работоспособность предложенной системы управления.

**Постановка задачи и алгоритм управления.** Положение квадрокоптера в пространстве характеризуется координатами  $x, y, z$  центра масс аппарата в неподвижной декартовой системе координат и углами Эйлера  $\psi, \phi, \theta$ , определяющими ориентацию связанной с осями летательного аппарата системы координат  $x_b y_b z_b$  по отношению к неподвижной

\*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-08-03233).

системе координат  $xyz$  [9]. Начало системы координат  $x_b y_b z_b$  совпадает с центром масс аппарата. Общепринятыми являются следующие обозначения:  $\psi$  — угол рыскания, т. е. угол поворота вокруг оси  $z_b$  ( $-\infty < \psi < \infty$ );  $\phi$  — угол крена, или угол поворота вокруг оси  $x_b$  ( $-\pi/2 < \phi < \pi/2$ );  $\theta$  — угол тангажа, т. е. угол поворота вокруг оси  $y_b$  ( $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ ).

Считаем, что квадрокоптер обладает собственной системой управления, обеспечивающей движение аппарата с заданной «пилотом» ориентацией  $\psi_{\text{ref}}, \phi_{\text{ref}}, \theta_{\text{ref}}$ . Стабилизация по высоте выполняется подачей команды на изменение вертикальной скорости. Полагаем, что управление  $\dot{z}_{\text{ref}}$  по высоте аппарата всегда направлено вдоль оси  $z$ , тогда движение аппарата может быть рассмотрено в виде проекции траектории движения на плоскость  $(x, y)$  [10]. Упрощённые уравнения динамики, описывающие движение  $i$ -го квадрокоптера в координатах  $x_i, y_i, z_i$ , имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{x}_i = c_{1i}(\cos \psi_i \cdot \sin \phi_i \cdot \cos \theta_i - \sin \psi_i \cdot \sin \theta_i) - c_{2i}\dot{x}_i, \\ \ddot{y}_i = c_{2i}(\sin \psi_i \cdot \sin \phi_i \cdot \cos \theta_i - \cos \psi_i \cdot \sin \theta_i) - c_{2i}\dot{y}_i, \\ \dot{\phi}_i = c_{3i}\phi_{i\text{ref}} - c_{4i}\phi_i, \\ \dot{\theta}_i = c_{3i}\theta_{i\text{ref}} - c_{4i}\theta_i, \\ \dot{\psi}_i = c_{5i}\psi_{i\text{ref}} - c_{6i}\psi_i, \\ \ddot{z}_i = c_{7i}\dot{z}_{i\text{ref}} - c_{8i}\dot{z}_i. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $c_{1i}-c_{8i}$  — постоянные коэффициенты, полученные экспериментально.

Выделим в группе объект-лидер, относительно которого остальные члены группы определяют своё положение и за которым следуют. Будем полагать, что движение лидера по предписанной траектории осуществляется согласно некоторому закону управления, например изложенному в [8]. Для описания движения остальных членов необходимо указать их место в группе относительно лидера. Считаем, что навигационная система робота-ведомого может находить следующие параметры расположения ведомого:  $d_i$  — расстояние до лидера,  $\alpha_i$  — направление на лидера относительно направления движения ведомого [7]. Такие данные являются дальнометрической информацией и могут быть получены с помощью видекамер, ультразвуковых или лазерных сенсоров.

Поставим перед роботом-ведомым задачу выхода в целевое положение  $d_{i\text{ref}}, \alpha_{i\text{ref}}$ .

Зададим ошибку в положении ведомого относительно целевого положения двумя величинами:

$$\begin{cases} E_{\tau i} = d_i \sin(\psi_{vi} + \alpha_i) - d_{i\text{ref}} \sin(\psi_{vi} + \alpha_{i\text{ref}}), \\ E_{ni} = d_i \cos(\psi_{vi} + \alpha_i) - d_{i\text{ref}} \cos(\psi_{vi} + \alpha_{i\text{ref}}). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $\psi_{vi}$  — угол, характеризующий направление движения объекта или ориентацию вектора линейной скорости  $v_i$  в плоскости  $(x, y)$  (рис. 1). Следует отметить, что ориентация вектора  $v_i$  в общем случае не связана с ориентацией продольной оси квадрокоптера или углом рыскания  $\psi_i$ .

Аналогично [7] введём функции

$$\begin{cases} S_{1i} = \dot{E}_{\tau i} + k_e E_{\tau i}, \\ S_{2i} = \dot{E}_{ni} + k_e E_{ni}, \\ S_i = 0,5(S_{1i}^2 + S_{2i}^2). \end{cases} \quad (3)$$

Потребуем выполнения условий

$$S_{1i} = 0; \quad S_{2i} = 0, \quad (4)$$

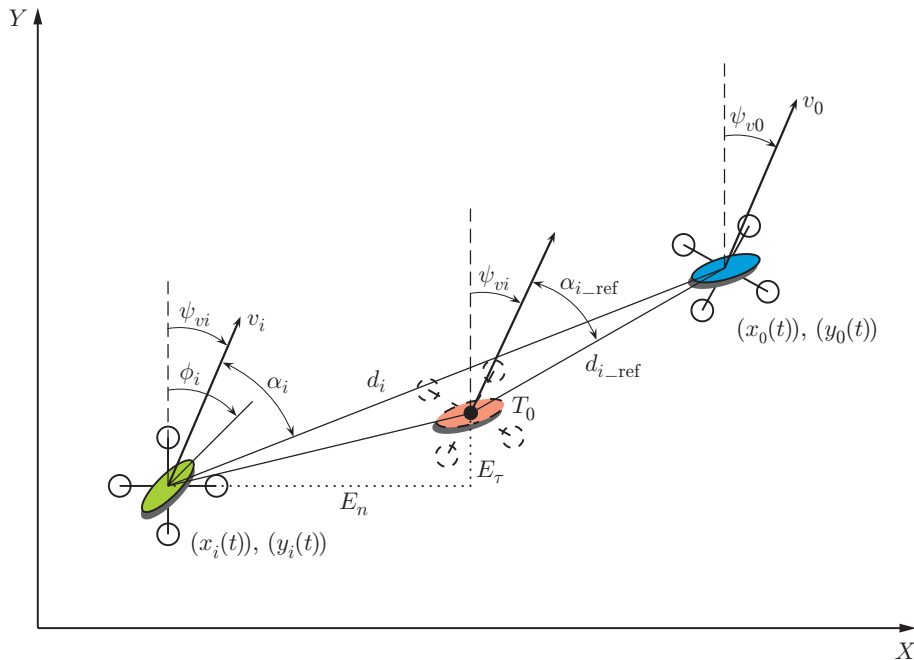


Рис. 1

что обеспечивает экспоненциальный выход квадрокоптера в целевое положение с постоянной времени  $1/k_e$ . Выбирая управляющие параметры из условия

$$\dot{S}_i \leq 0, \quad (5)$$

обеспечим вынужденное движение системы в окрестности траектории (4).

Знак равенства в (5) допустим только при  $S_i = 0$ , что гарантирует выполнение условий (4). В случае  $S_i \neq 0$  выполнение условия  $\dot{S}_i < 0$  вынуждает систему двигаться в окрестности траектории, заданной уравнениями (4).

Вычислим

$$\dot{S}_i = S_{1i}\dot{S}_{1i} + S_{2i}\dot{S}_{2i}. \quad (6)$$

С учётом (2), (3) и уравнений движения (1) запишем выражение

$$\begin{aligned} \dot{S}_i = & -S_{1i}\ddot{y}_i \left[ 1 - \frac{\dot{x}_i}{v_i^2} d_{i\_ref} \sin(\psi_{vi} + \alpha_{i\_ref}) \right] + S_{2i}\ddot{y}_i \frac{\dot{x}_i}{v_i^2} d_{i\_ref} \cos(\psi_{vi} + \alpha_{i\_ref}) - \\ & - S_{2i}\ddot{x}_i \left[ 1 + \frac{\dot{y}_i}{v_i^2} d_{i\_ref} \cos(\psi_{vi} + \alpha_{i\_ref}) \right] - S_{1i}\ddot{x}_i \frac{\dot{y}_i}{v_i^2} d_{i\_ref} \sin(\psi_{vi} + \alpha_{i\_ref}) + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь многоточием обозначены члены, не содержащие переменных  $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i$ .

Принимая во внимание выражение (5), определим требуемые значения вторых производных  $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i$  в следующем виде:

$$\begin{cases} \ddot{x}_i = c_{xi}S_{2i} \left[ 1 + \frac{\dot{y}_i}{v_i^2} d_{i\_ref} \cos(\psi_{vi} + \alpha_{i\_ref}) \right] + c_{xi}S_{1i} \frac{\dot{y}_i}{v_i^2} d_{i\_ref} \sin(\psi_{vi} + \alpha_{i\_ref}), \\ \ddot{y}_i = c_{yi}S_{1i} \left[ 1 - \frac{\dot{x}_i}{v_i^2} d_{i\_ref} \sin(\psi_{vi} + \alpha_{i\_ref}) \right] - c_{yi}S_{2i} \frac{\dot{x}_i}{v_i^2} d_{i\_ref} \cos(\psi_{vi} + \alpha_{i\_ref}), \end{cases} \quad (8)$$

где  $c_{xi} > 0$ ,  $c_{yi} > 0$  — постоянные коэффициенты. Очевидно, что при достаточно больших значениях коэффициентов  $c_{xi}$  и  $c_{yi}$  и отсутствии ограничений на переменные  $\ddot{x}_i$ ,  $\ddot{y}_i$  можно выполнить условие (5), если  $\ddot{x}_i$  и  $\ddot{y}_i$  не равны нулю тождественно. Легко показать, что равенства  $\ddot{x}_i \equiv 0$ ,  $\ddot{y}_i \equiv 0$  эквивалентны тождественно выполнению условия (4), т. е. точному движению системы по заданной траектории.

Дальнейшие расчёты идентичны приведённым в [8] и позволяют вычислить необходимые значения углов ориентации аппарата  $\psi_{i,\text{ref}}$ ,  $\phi_{i,\text{ref}}$ ,  $\theta_{i,\text{ref}}$ , приравнивая значения вторых производных в уравнениях (1) и (7). Получаемая система уравнений не является независимой. Это объективно отражает тот факт, что для управления направлением движения квадрокоптера достаточно управления любыми двумя углами из  $\psi, \phi, \theta$ . При управлении, например, углами тангажа и крена, угол рыскания можно выбирать из других соображений [8], не связанных с изменением направления движения.

Задание отклонений от целевого положения в виде проекций на соответствующие оси системы координат обеспечивает возможность непосредственного вычисления желаемых ускорений центра масс и не требует дополнительного управления при приближении ведомого к целевому положению [11].

Отметим, что для реализации предложенного алгоритма управления на основе соотношений (8) необходимы оценки координат центра масс квадрокоптера и углов его ориентации в пространстве, а также оценки первых производных по времени этих переменных.

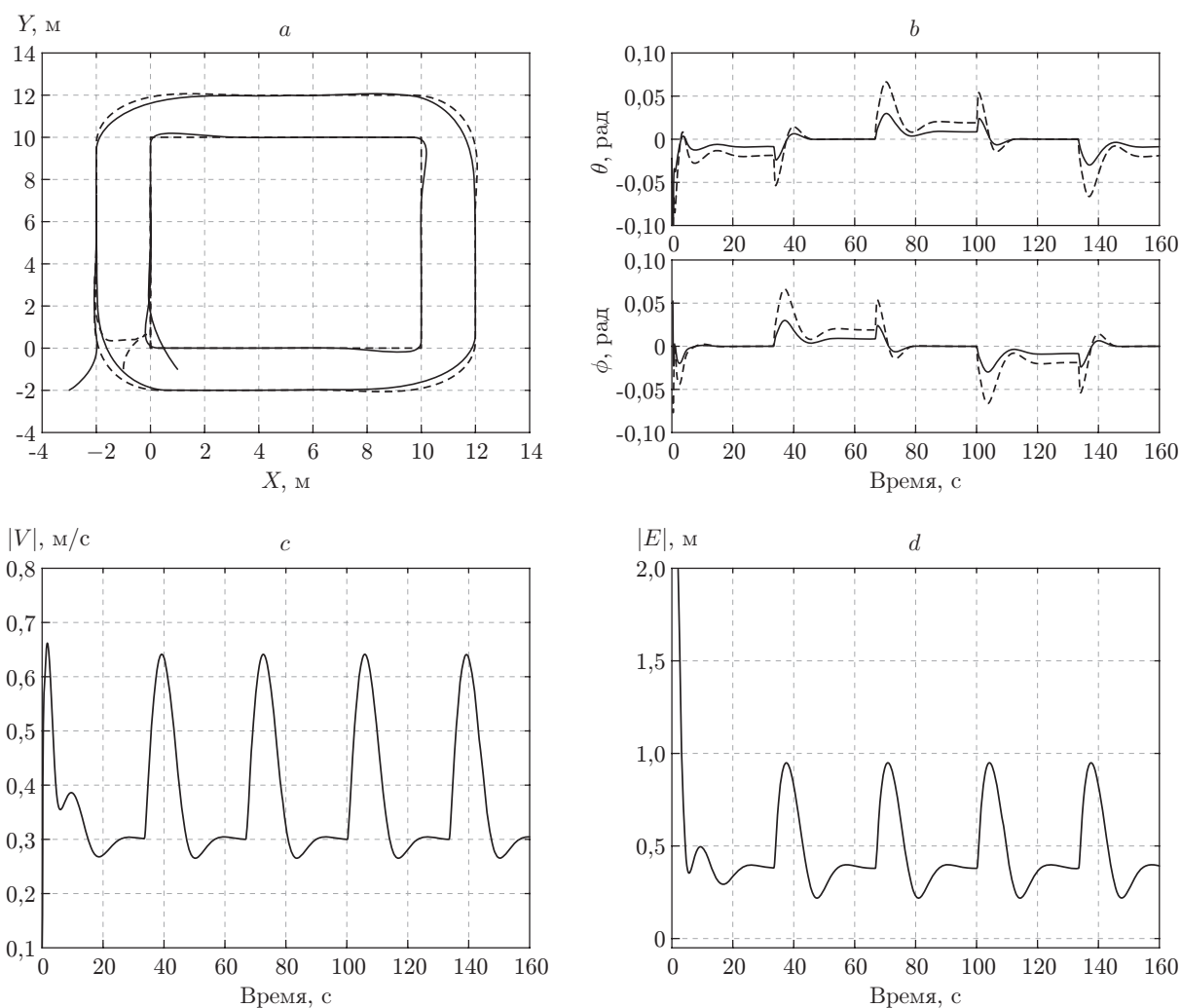


Рис. 2

При управлении реальным объектом для оценки переменных состояния следует применять соотношения на основе расширенного фильтра Калмана [12].

**Результаты моделирования.** Проверка эффективности предложенного алгоритма управления проводилась путём численного моделирования. В качестве объекта управления была выбрана модель квадрокоптера AR.Drone [10] с коэффициентами  $c_{1i} = 7,0$ ,  $c_{2i} = 0,2$ ,  $c_{3i} = 4,5$ ,  $c_{4i} = 10,0$ ,  $c_{5i} = 10,0$ ,  $c_{6i} = 15,0$ ,  $c_{7i} = 1,40$ ,  $c_{8i} = 1,0$  из уравнений (1).

На рис. 2 представлены результаты моделирования движения группы лидер—ведомый с использованием алгоритма управления на основе соотношений (8). Моделировался режим движения группы на постоянных высоте и скорости по траектории в виде квадрата. Траектории полёта лидера и ведомого показаны на рис. 2, *a*, заданное целевое положение (пунктирная кривая) для ведомого относительно координат  $x_0, y_0$  лидера вычислялось как

$$\begin{cases} x_{1\text{.ref}} = x_0 - d_{1\text{.ref}} \sin(\psi_{v1} + \alpha_{1\text{.ref}}), \\ y_{1\text{.ref}} = y_0 - d_{1\text{.ref}} \cos(\psi_{v1} + \alpha_{1\text{.ref}}). \end{cases} \quad (9)$$

Приведём параметры целевого положения ведомого и управляющие параметры:  $d_{1\text{.ref}} = 2$  м,  $\alpha_{1\text{.ref}} = 1,57$  рад,  $k_e = 0,5$ ,  $\psi_{1\text{.ref}} = 0$ ,  $z_{1\text{.ref}} = 0$ . Соответствующие изменения управляющих параметров  $\phi_{i\text{.ref}}$ ,  $\theta_{i\text{.ref}}$  и значения углов ориентации  $\phi_1, \theta_1$  ведомого показаны на рис. 2, *b*, изменение модуля линейной скорости ведомого и его отклонение от заданного целевого положения — на рис. 2, *c* и *d*. Следует отметить, что объект-ведомый устойчиво выходит на заданную траекторию и выдерживает желаемые параметры движения.

**Заключение.** В данной работе предложен алгоритм управления квадрокоптерами в составе однородной группы лидер—ведомые. Такой метод обеспечивает поддержание требуемого положения ведомого в группе относительно лидера без привлечения абсолютных пространственных координат квадрокоптеров. Эффективность метода подтверждена результатами численных экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rezaei M., Bolandi H., Jamaldoost F., Smailzadeh S. M.** A new obstacle avoidance algorithm for quad rotors group in the presence of dynamic and static obstacles // *Sci. Journ.* 2015. **36**, N 3. P. 105–120.
2. **Wenzel K. E., Masselli A., Zell A.** Visual tracking and following of a quadcopter by another quadcopter // *Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems.* Vilamoura, Portugal, 2012. P. 4993–4998.
3. **Mercado D. A., Castro R., Lozano R.** Quadrotors flight formation control using a leader-follower approach // *Proc. of the 2013 European Control Conference.* Zürich, Switzerland, 2013. P. 3858–3863.
4. **Consolini L., Morbidi F., Prattichizzo D., Tosques M.** Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints // *Automatica.* 2008. **44**, Is. 5. P. 1343–1349.
5. **Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю., Нестеров А. А.** Децентрализованное управление подвижными объектами в составе маневрирующей группы // *Автометрия.* 2007. **43**, № 3. С. 31–39.
6. **Бойчук Л. М.** Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. М.: Энергия, 1971. 112 с.
7. **Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю., Мальцев А. С. и др.** Робастное управление подвижными объектами в группе лидер—ведомые с использованием метода структурного синтеза // *Автометрия.* 2015. **51**, № 5. С. 82–91.

8. **Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Мальцев А. С. и др.** Управление параметрами полёта квадрокоптера при движении по заданной траектории // *Автометрия*. 2012. **48**, № 5. С. 32–41.
9. **Kim J., Kang M.-S., Park S.** Accurate modeling and robust hovering control for a quad-rotor VTOL aircraft // *Journ. Intell. and Robotic Syst.* 2010. **57**, N 1–4. P. 9–26.
10. **Engel J., Sturm J., Cremers D.** Accurate figure flying with a quadcopter using onboard visual and inertial sensing // *Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. Vilamoura, Portugal, 2012. P. 43–48.
11. **Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю. и др.** Управление полётом квадрокоптера при параметрическом задании траектории движения // *Тр. XII Всеросс. совещания по проблемам управления*. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2014. С. 3384–3390.
12. **Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю. и др.** Использование фильтра Калмана в системе управления траекторным движением квадрокоптера // *Автометрия*. 2013. **49**, № 6. С. 14–24.

*Поступила в редакцию 23 июня 2016 г.*

---