

УДК 007.52

Д.Я. Иванов

**РЕШЕНИЕ СТРОЕВОЙ ЗАДАЧИ В ГРУППЕ БЕСПИЛОТНЫХ  
КВАДРОКОПТЕРОВ\***

*Рассматривается решение строевой задачи в группе беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Прогресс в области микроэлектроники и вычислительной техники сделал возможным производство малоразмерных БЛА, которые могут быть дешевы в производстве и просты в эксплуатации в случае массового производства. Практические возможности одиночных БЛА ограничены. Надежность и гибкость являются основными преимуществами мультиробототехнических систем по сравнению с одиночными роботами. Также и использование групп БЛА открывает широкие перспективы для беспилотной авиации. Существует большое количество различных типов малоразмерных беспилотных летательных аппаратов, таких как: самолетного типа, вертолетного типа, насекомоподобные, автожиры и аппараты легче воздуха. Квадрокоптеры являются наиболее универсальными из них. Статья содержит краткий анализ существующих методов решения строевой задачи. Рассмотрена строевая задача в группе беспилотных квадрокоптеров, предложен метод ее решения, позволяющий обеспечить точное соблюдение дистанций между квадрокоптерами в строю, а также отличающийся низкой вычислительной сложностью.*

*Строевая задача; групповая робототехника; квадрокоптер; беспилотный летательный аппарат.*

D.Ya. Ivanov

**SOLVING OF A FORMATION TASK IN A GROUP OF UNMANNED  
QUADROTORS**

*The paper is dedicated to a formation task in a group of unmanned aerial vehicles. The progress in a microelectronics and a computing make it possible to produce small-sized UAV, which can be cheap and easily accessible in case of mass production. However, practical possibilities of a single UAV are limited. Robustness and flexibility constitute the main advantages of multiple-robot systems vs. single-robot ones. Also the use of group of UAVs opens wide perspectives for unmanned aircraft. There are a lot of types of small-sized unmanned aerial vehicles, which can be classified on: airplane, helicopter, bird-like, insect-like, autogiro and blimp. Quadrotors are the most universal type of them. The article contains a brief analysis of existing methods for solving formation task. The author also proposes a new method for solving formation task, which make it possible to ensure accurate compliance with distances between quadrotors in the formation, as well as featuring low computational complexity. The article is aimed at the problem of formation task on the plane for those cases where the mutual position of quadrotors is more important rather than absolute coordinates of their positions in space. The algorithm based on a proposed method has a low computational complexity, it allows to create formations with various shapes, and opens up opportunities for practical application of groups of quadrotor UAVs for video monitoring, forming phased antenna arrays and mobile telecommunication systems.*

*Formation task; group robotics; quadrotor; quadrocopter; unmanned aerial vehicle.*

**Введение.** Существует большое количество беспилотных летательных аппаратов (БЛА) различного типа. Прогресс в области микроэлектроники и вычислительной техники позволяет создавать малоразмерные БЛА. Массовое производство малоразмерных БЛА делает их дешевыми и легкодоступными. Однако практические возможности одиночных БЛА ограничены. Как показано в литературе [1], надежность и гибкость у мультиробототехнических систем выше, чем у одиночных роботов. Также групповое применение БЛА открывает широкие перспективы для беспилотной авиации [2, 3].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты: №14-08-01176, №13-08-00794).

По типу малоразмерные летательные аппараты можно классифицировать на самолетные, вертолетные, с машущим крылом, автожиры и аппараты легче воздуха. В работе [4] приведено сравнение малоразмерных летательных аппаратов различных типов и показано, что наиболее универсальным типом являются квадрокоптеры.

Группы беспилотных квадрокоптеров могут применяться для видеомониторинга, формирования фазированных антенных решеток [5] и в ряде других задач. Для этого необходимо обеспечить взаимное расположение квадрокоптеров друг относительно друга. Требуемое (целевое) расположение квадрокоптеров в пространстве называют строем (англ. "formation"), а задачу формирования группой квадрокоптеров заданного строя называют строевой задачей (англ. "formation task").

**Обзор известных методов решения строевой задачи.** Известны различные методы решения строевой задачи в группах мобильных роботов, основанные на поведенческом подходе [6, 7], подходе ведущий-ведомый [8–12], подход по принципу «виртуальная структура/виртуальный лидер» [13], подход на основе теории игр [14] и другие. Однако некоторые из этих методов позволяют формировать строй только определенной формы. Другие же для своей реализации требуют значительных вычислительных ресурсов, которыми не обладают бортовые вычислительные системы малоразмерных БЛА. К тому же на практике при мониторинге и формировании ФАР соблюдение требуемых дистанций между квадрокоптерами имеет большее значение, чем точность позиционирования квадрокоптеров в абсолютных координатах.

Возникает необходимость в вычислительно простом методе решения строевой задачи, позволяющем в режиме реального времени формировать строй любой формы с использованием слабых вычислительных устройств и обеспечивающий точное соблюдение дистанций между квадрокоптерами.

**Строевая задача в группе БЛА.** Для дальнейшего рассмотрения строевой задачи в группе квадрокоптеров необходимо формально определить эту задачу.

Пусть существует группа  $\mathbf{R}$  из  $N$  квадрокоптеров  $r_i \in \mathbf{R} (i = \overline{1, N})$ . Состояние каждого квадрокоптера  $r_i \in \mathbf{R}$  описывается вектор-функцией

$$\mathbf{s}_i(t) = [s_{i,1}(t), s_{i,2}(t), \dots, s_{i,h}(t)]^T.$$

Под переменными состояния  $s_{i,h}(t)$  следует понимать координаты  $x_i(t), y_i(t), z_i(t)$  квадрокоптера  $r_i \in \mathbf{R}$  в пространстве, его текущую скорость, ускорение, углы крена  $\phi_i(t)$ , тангажа  $\theta_i(t)$  и рыскания  $\psi_i(t)$ , оставшийся бортовой запас энергоресурса и т.п.

Взаимное расположение квадрокоптеров в группе описывается матрицей

$$\mathbf{D}(t) = \begin{bmatrix} 0 & d_{1,2}(t) & d_{1,3}(t) & \dots & d_{1,N}(t) \\ - & 0 & d_{2,3}(t) & \dots & d_{2,N}(t) \\ - & - & 0 & \ddots & \vdots \\ - & - & - & 0 & d_{N-1,N}(t) \\ - & - & - & - & 0 \end{bmatrix},$$

где каждый элемент  $d_{i,j}(t)$  матрицы  $\mathbf{D}(t)$  представляет собой дистанцию между квадрокоптерами  $r_i$  и  $r_j$  в текущий момент времени.

Каждому квадрокоптеру  $r_i \in \mathbf{R}$  доступна информация о собственном состоянии  $\mathbf{s}_i(t)$ , а также информация о дистанциях  $d_{i,j}(t)$  ( $i, j = \overline{1, N}, i \neq j$ ) между квадрокоптером  $r_i \in \mathbf{R}$  и другими квадрокоптерами  $r_j \in \mathbf{R}$  ( $j = \overline{1, N}, j \neq i$ ).

Каждый квадрокоптер  $r_i \in \mathbf{R}$  обладает системой управления и может изменять координаты  $\mathbf{x}_i(t) = x_i(t), y_i(t), z_i(t)$  своего положения в пространстве в зависимости от входных управлений  $u_i(t)$  в соответствии с математической моделью, рассмотренной в [4].

С целью предотвращения столкновений и взаимных помех квадрокоптеров вводятся ограничения на положение квадрокоптеров:

$$|\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)| \geq \Delta_r, (i \neq j; i, j = \overline{1, N}), \quad (1)$$

где  $\Delta_r$  – минимально допустимая дистанция между квадрокоптерами.

Целевое строевое положение (строй) группы квадрокоптеров представляет собой множество  $\mathbf{V}$  целевых положений  $v_\mu \in \mathbf{V}$  ( $\mu = \overline{1, N}$ ) отдельных квадрокоптеров. Каждое целевое положение квадрокоптера  $v_\mu \in \mathbf{V}$  характеризуется  $p_\mu(x_\mu, y_\mu, z_\mu)$  ( $\mu = \overline{1, N}$ ).

Целевое положение группы задается матрицей:

$$\mathbf{D}_f = \begin{bmatrix} 0 & d_{1,2} & d_{1,3} & \cdots & d_{1,N} \\ - & 0 & d_{2,3} & \cdots & d_{2,N} \\ - & - & 0 & \ddots & \vdots \\ - & - & - & 0 & d_{N-1,N} \\ - & - & - & - & 0 \end{bmatrix},$$

где каждый элемент  $d_{i,j}$  матрицы  $\mathbf{D}_f$  представляет собой дистанцию между координатами  $p_i$  и  $p_j$  целевых положений  $v_i$  и  $v_j$  в искомом строю.

Строевая задача в группе квадрокоптеров состоит в том, чтобы определить такую последовательность управлений (вектор-функцию управлений)  $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)]^T$ , выполнение которых при ограничениях на положение квадрокоптеров в пространстве (1) приводило группу квадрокоптеров из исходного положения, заданного матрицей дистанций  $\mathbf{D}(t_0)$ , в целевое строевое построение, заданное матрицей  $\mathbf{D}_f$ , за минимальное время.

**Предлагаемый метод.** Рассмотрим предлагаемый метод окружностей для решения строевой задачи на плоскости.

На первом шаге необходимо выбрать целевое положение  $v_\mu$  и квадрокоптер  $r_i$ , с которого начнется формирование строя. Квадрокоптер, оказавшийся ближе других к точке с радиус-вектором  $\vec{l}_c$ , получает назначение  $v_1$ .

$$\vec{l}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{l}_i,$$

где  $l_i$  – радиус-вектор квадрокоптера  $r_i$ .

На втором шаге определяются координаты  $p_2$  целевого положения  $v_2$  и выбирается квадрокоптер, который займет это целевое положение. Для этого строится окружность  $C_{1,2}$  с центром в точке  $p_1$  и радиусом  $d_{1,2}$ . Проводятся прямые линии, каждая из которых проходит через точку  $p_1$  и текущее положение квадрокоптера  $r_i (i = \overline{2, N})$ . Для определения координат точек пересечения этих прямых и окружности  $C_{1,2}$  для каждого квадрокоптера  $r_i (i = \overline{2, N})$  решается система уравнений:

$$\begin{cases} (y_1 - y_i)x_2 - (x_1 - x_i)y_2 + (x_1y_i - x_iy_1) = 0; \\ (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = d_{1,2}^2. \end{cases} \quad i \in [2, N]. \quad (2)$$

Корни  $(x_2, y_2)$  системы уравнения (2) – это возможные координаты точки  $p_2$ .

Затем осуществляется поиск ближайшего к точке  $p_2$  квадрокоптера. Рассчитываются длины отрезков  $l_{1,i}$  между текущими положениями квадрокоптеров группы и соответствующих им точек пересечения прямых и окружности. Для этого рассчитываем дистанции между квадрокоптерами и соответствующими им расчетными координатами  $p_2$ :

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_2)^2 + (y_i - y_2)^2} \quad i \in [2, N].$$

После сравнения длин дистанций между квадрокоптерами и соответствующими им расчетными координатами  $p_2$  находим кратчайший отрезок  $\min(l_i), i \in [2, N]$ . Соответствующему этому отрезку квадрокоптеру назначается целевое положение  $v_2$ , а точка пересечения прямой и окружности определяет координаты  $p_2$  целевого положения  $v_2$  (см. рис. 1).

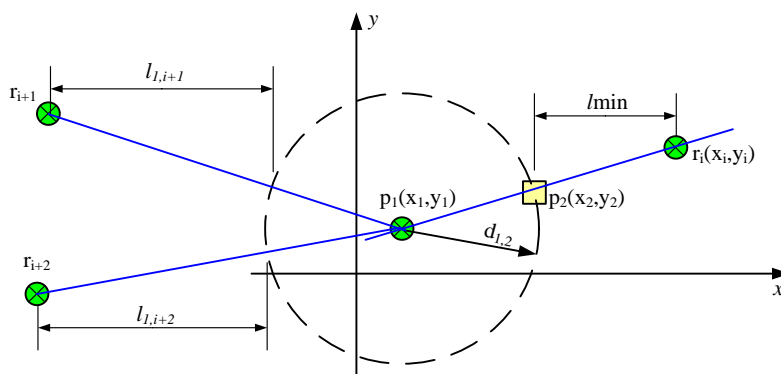


Рис. 1. Определение целевого положения  $p_2$

На третьем шаге определяются координаты  $p_3$  целевого положения  $v_3$  и выбирается квадрокоптер, который займет это целевое положение. Строятся две окружности: первая окружность  $C_{1,3}$  с центром в точке  $p_1$  и радиусом  $d_{1,3}$ , вто-

рая окружность  $c_{2,3}$  с центром в точке  $p_2$  и радиусом  $d_{2,3}$ . Обе точки пересечения окружностей  $c_{1,3}$  и  $c_{2,3}$  (в некоторых случаях окружности будут пересекаться только в одной точке) удовлетворяют условиям.

Для каждого квадрокоптера  $r_i (i = \overline{3, N})$  решаем систему уравнений:

$$\begin{cases} (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 = d_{1,3}^2; \\ (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 = d_{2,3}^2. \end{cases} \quad (3)$$

В общем случае система уравнений (3) имеет два набора корней  $(x_3, y_3)$ .

Рассчитываются расстояния между текущими положениями квадрокоптеров  $r_i (i = \overline{3, N})$  и каждой из точек пересечения окружностей  $c_{1,3}$  и  $c_{2,3}$ . Производится поиск ближайшего к  $p_3$  квадрокоптера. Для этого рассчитываются дистанции между квадрокоптерами и соответствующими им расчетными координатами  $p_3$ :

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_3)^2 + (y_i - y_3)^2} \quad i \in [\overline{3, N}].$$

После сравнения длин дистанций между квадрокоптерами и соответствующими им расчетными координатами  $p_3$  находим минимальную дистанцию  $\min(l_i), i \in [\overline{3, N}]$ . Соответствующему этой дистанции квадрокоптеру назначается целевое положение  $v_3$ , а ближайшая к нему точка пересечения окружностей в дальнейшем используется в качестве точки  $p_3$ .

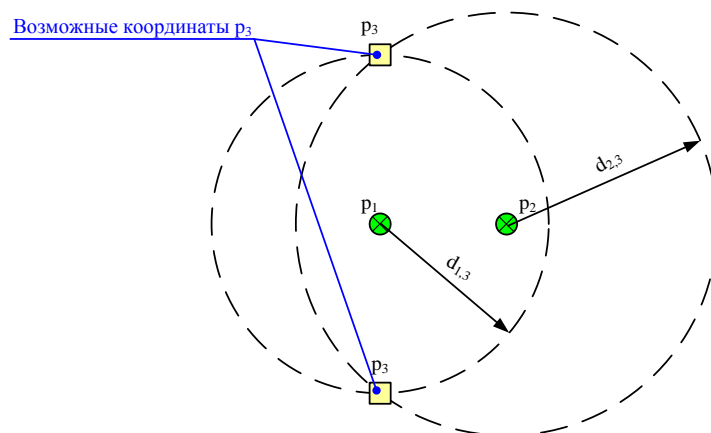


Рис. 2. Определение целевого положения  $p_3$

На каждом последующем шаге определяются координаты  $p_\mu (\mu = \overline{4, N})$  целевого положения  $v_\mu$  и выбирается квадрокоптер, который займет это целевое положение. Для этого строятся три окружности: первая окружность  $c_{\mu-3,\mu}$  с центром в точке  $p_{\mu-3}$  и радиусом  $d_{\mu-3,\mu}$ , вторая окружность  $c_{\mu-2,\mu}$  с центром в точке  $p_{\mu-2}$  и радиусом  $d_{\mu-2,\mu}$ , и третья окружность  $c_{\mu-1,\mu}$  с цен-

тром в точке  $p_{\mu-1}$  и радиусом  $d_{\mu-1,\mu}$ . Обе точки пересечения окружностей  $C_{\mu-3,\mu}, C_{\mu-2,\mu}$  и  $C_{\mu-1,\mu}$  (в некоторых случаях окружности будут пересекаться только в одной точке) удовлетворяют условиям.

Для каждого квадрокоптера  $r_i (i = \bar{k}, N)$  решается система уравнений:

$$\begin{cases} (x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2 = d_{k-1,k}^2; \\ (x_k - x_{k-2})^2 + (y_k - y_{k-2})^2 = d_{k-2,k}^2; \\ (x_k - x_{k-3})^2 + (y_k - y_{k-3})^2 = d_{k-3,k}^2. \end{cases} \quad (4)$$

В общем случае система уравнений (4) имеет два набора корней  $(x_k, y_k)$ .

Определяется ближайший к  $p_k$  квадрокоптер. Для этого рассчитываются дистанции между квадрокоптерами и соответствующими им расчетными координатами  $p_2$ :

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \quad i \in [\bar{k}, N].$$

Определяется минимальная дистанция  $\min(l_i), i \in [\bar{k}, N]$ . Соответствующему этой дистанции квадрокоптеру назначается целевое положение  $v_k$ .

Рис. 3 иллюстрирует построения, необходимые для определения координат точки  $p_4$ . Дальнейшие построения для назначений  $(v_5, v_6, \dots, v_N)$  и точек  $(p_5, p_6, \dots, p_N)$  происходят аналогичным образом.

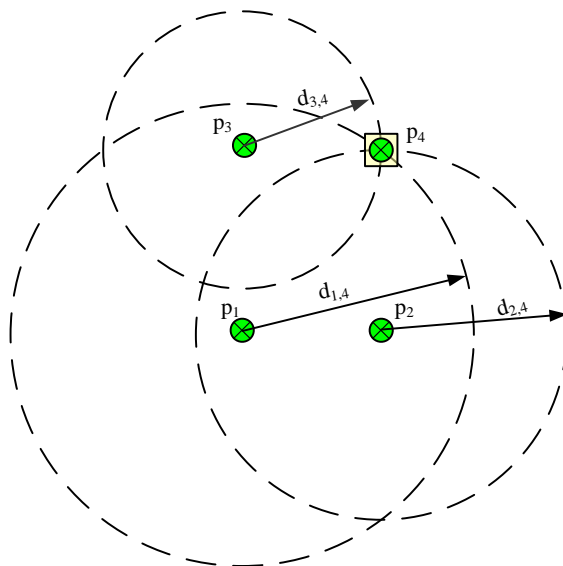


Рис. 3. Определение целевого положения  $p_4$

На рис. 4 приведен пример построений, необходимых для формирования целевого строя группой из пяти квадрокоптеров.

После того, как получены назначения целевых точек для всех квадрокоптеров группы, а также рассчитаны координаты целевых положений, каждый квадрокоптер начинает движение к своему целевому положению. Каждый квадрокоптер движется к своему целевому положению по прямой, за исключением тех случаев, когда есть угроза столкновения квадрокоптеров, в этом случае квадрокоптеры облетают друг друга по дуге.

**Моделирование и эксперименты.** Предложенный подход к формированию строевых построений апробирован с помощью программной модели (рис. 5) и экспериментального стенда, с использованием квадрокоптеров Ag.Drone (рис. 6).

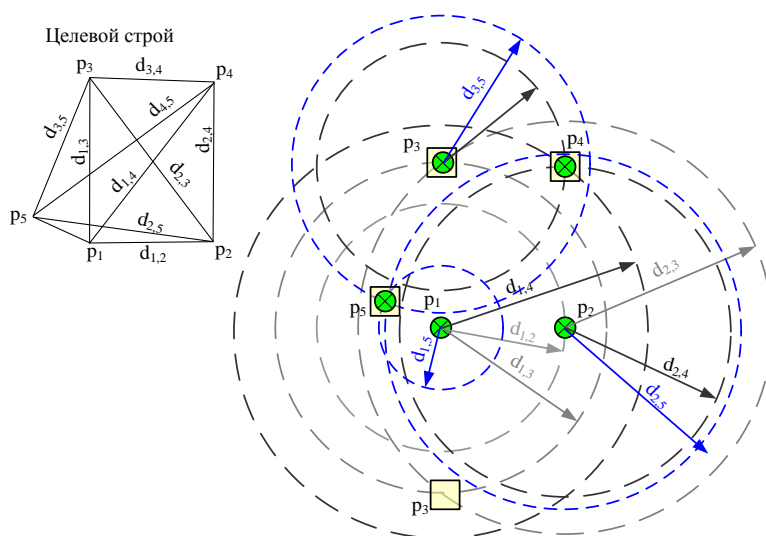


Рис. 4. Геометрические построения при формировании целевого строя группой из пяти квадрокоптеров

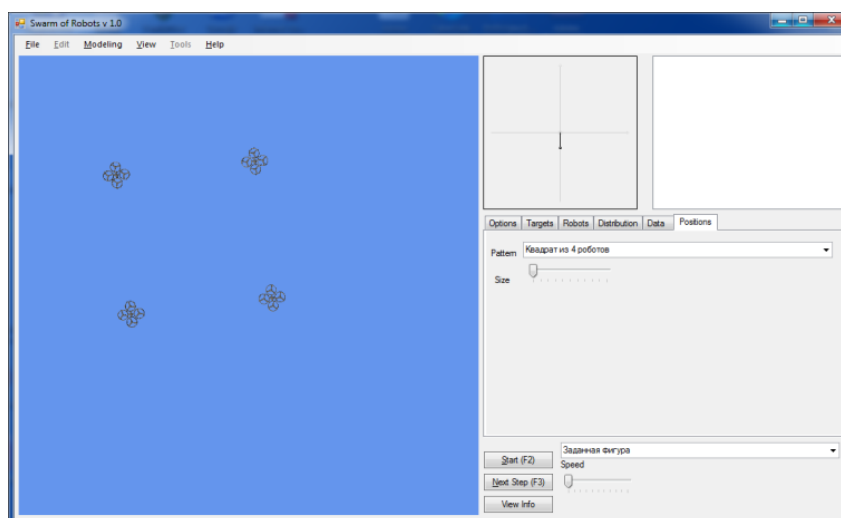


Рис. 5. Интерфейс программы компьютерного моделирования



Рис. 6. Формирование строя группой квадрокоптеров Ar.Drone

Информационный обмен между квадрокоптерами группы и пультом оператора осуществлялся по Wi-Fi. Для навигации квадрокоптеров использовалась инерциальная система. Строевая задача решалась на плоскости, т.е. все квадрокоптеры группы летали на одной высоте.

В отличие от известных проектов по формированию строев квадрокоптеров [15] при проведении экспериментов, квадрокоптеры не использовали внешние камеры и датчики, и определяли свое положение в пространстве с помощью инерциальной навигационной системы и бортовых сенсорных устройств, при этом обеспечивалась достаточная точность позиционирования.

**Заключение.** В данной работе рассмотрена задача формирования строевых построений на плоскости для тех случаев, когда первоочередную роль играет взаимное положение участников группы друг относительно друга, а не абсолютные координаты их положения в пространстве.

Предложенный метод окружностей может применяться для решения строевой задачи группой квадрокоптеров и других мобильных роботов, при наличии у роботов группы каналов связи для обмена информацией между собой.

При необходимости формирования трехмерного строя следует учитывать все три координаты квадрокоптеров и искать пересечения сфер, а не пересечения окружностей.

Построенный на основе предложенного подхода алгоритм обладает невысокой вычислительной сложностью, позволяет формировать строй квадрокоптеров любой требуемой формы и открывает широкие возможности по практическому применению групп квадрокоптеров при видеомониторинге, формировании фазированных антенных решеток и мобильных телекоммуникационных сетей.

В дальнейшем планируется повысить точность позиционирования квадрокоптеров за счет комплексирования информации от бортовых сенсорных устройств и анализа изображений от бортовых видеокамер, а также использования GPS-навигации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Franchi A., Secchi C., Ryll M., Bulthoff H.H., & Giordano, P.R. Shared control: Balancing autonomy and human assistance with a group of quadrotor UAVs // Robotics & Automation Magazine, IEEE. – 2012. – № 19 (3). – P. 57-68.



2. Schwager M., Julian B., Angermann M. and Rus D. Eyes in the sky: Decentralized control for the deployment of robotic camera networks // *Proceedings of the IEEE*. – 2011. – Vol. 99, no. 9. – P. 1541-1561.
3. Fink J., Michael N., Kim S. and Kumar V. Planning and control for cooperative manipulation and transportation with aerial robots // *International Journal of Robotics Research*. – 2010. – Vol. 30, no. 3. – P. 324-334.
4. Bouabdallah S. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. Lausanne Polytechnic University. 2007.
5. Tonetti S., Hehn M., Lupashin S., & D'Andrea R. Distributed control of antenna array with formation of uavs // *In World Congress*. – 2011, August. – Vol. 18, No. 1. – P. 7848-7853.
6. Balch T., Arkin R.C. Behavior-based formation control for multirobot teams // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – 1998. – Issue 6. – P. 926-939.
7. Jonathan R.T. Lawton, Randal W. Beard, Brett J. Young. A Decentralized Approach to Formation Maneuvers // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – December 2003. – Vol. 19, No. 6. – P. 933-941.
8. Wang P.K.C. Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation // *J. Robot. Syst.* – 1991. – Vol. 8, no. 2. – P. 177-195.
9. Desai J.P., Ostrowski J. and Kumar V. Controlling formations of multiple mobile robots // in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, May 1998. – P. 2864-2869.
10. Mesbahi M. and Hadaegh F.Y. Formation flying control of multiple spacecraft via graphs, matrix inequalities, and switching // *AIAA J. Guidance, Control, Dynam.* – Mar.-Apr. 2000. – Vol. 24, no. 2. – P. 369-377.
11. Wang P.K.C. and Hadaegh, F.Y. Coordination and control of multiple microspacecraft moving in formation // *J. Astronaut. Sci.* – 1996. – № 44, (3). – P. 315-355.
12. Desai J., Ostrowski J., and Kumar V. Control of Formations for Multiple Robots // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium. 1998.
13. Lewis M.A. and Tan K.-H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures // *Auton. Robot.* – 1997. – № 4. – P. 387-403.
14. Erdoğan M.E., Innocenti M., Pollini L. Obstacle Avoidance for a Game Theoretically Controlled Formation of Unmanned Vehicles // *18th IFAC*. 2011.
15. Flying Machine Arena [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.flyingmachinearena.org](http://www.flyingmachinearena.org) (дата обращения 30 июля 2014).

## REFERENCES

1. Franchi A., Secchi C., Ryll M., Bulthoff H.H., & Giordano, P.R. Shared control: Balancing autonomy and human assistance with a group of quadrotor UAVs, *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 2012, No. 19 (3), pp. 57-68.
2. Schwager M., Julian B., Angermann M. and Rus D. Eyes in the sky: Decentralized control for the deployment of robotic camera networks, *Proceedings of the IEEE*, 2011, Vol. 99, No. 9, pp. 1541-1561.
3. Fink J., Michael N., Kim S. and Kumar V. Planning and control for cooperative manipulation and transportation with aerial robots, *International Journal of Robotics Research*, 2010, Vol. 30, No. 3, pp. 324-334.
4. Bouabdallah S. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. Lausanne Polytechnic University. 2007.
5. Tonetti S., Hehn M., Lupashin S., & D'Andrea R. Distributed control of antenna array with formation of uavs, *In World Congress*, 2011, August, Vol. 18, No. 1, pp. 7848-7853.
6. Balch T., Arkin R.C. Behavior-based formation control for multirobot teams, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, Issue 6, pp. 926-939.
7. Jonathan R.T. Lawton, Randal W. Beard, Brett J. Young. A Decentralized Approach to Formation Maneuvers, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, December 2003, Vol. 19, No. 6, pp. 933-941.
8. Wang P.K.C. Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation, *J. Robot. Syst.*, 1991, Vol. 8, No. 2, pp. 177-195.
9. Desai J.P., Ostrowski J. and Kumar V. Controlling formations of multiple mobile robots, in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, May 1998, pp. 2864-2869.

10. Mesbahi M. and Hadaegh F.Y. Formation flying control of multiple spacecraft via graphs, matrix inequalities, and switching, *AIAA J. Guidance, Control, Dynam.*, Mar.–Apr. 2000, Vol. 24, No. 2, pp. 369-377.
11. Wang P.K.C. and Hadaegh, F.Y. Coordination and control of multiple microspacecraft moving in formation, *J. Astronaut. Sci.*, 1996, No. 44, (3), pp. 315-355.
12. Desai J., Ostrowski J., and Kumar V. Control of Formations for Multiple Robots, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 1998.
13. Lewis M.A. and Tan K.-H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures, *Auton. Robot.*, 1997, No. 4, pp. 387-403.
14. Erdoğan M.E., Innocenti M., Pollini L. Obstacle Avoidance for a Game Theoretically Controlled Formation of Unmanned Vehicles, *18th IFAC*. 2011.
15. Flying Machine Arena. Available at: [www.flyingmachinearena.org](http://www.flyingmachinearena.org) (accessed 30 July 2014).

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Илюхин.

**Иванов Донат Яковлевич** – НИИ Многопроцессорных вычислительных систем им. академика А.В. Каляева Южного федерального университета; e-mail: [donat.ivanov@gmail.com](mailto:donat.ivanov@gmail.com); г. Таганрог, ГСП-284, ул. Чехова 2; тел.: +79185191869; м.н.с.

**Ivanov Donat Yakovlevich** – Scientific research institute of multiprocessor computer systems of Southern Federal University; e-mail: [donat.ivanov@gmail.com](mailto:donat.ivanov@gmail.com); 2, Chehova street, Taganrog, GSP-284, Russia; phone: +79185191869; junior researcher.

УДК 681.51

**С.А. Скляр**

### **СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ\***

*Рассматривается проблема синтеза законов группового управления движением мобильных роботов. Для решения данной задачи предлагается новый подход к синтезу систем группового управления, базирующийся на принципах и методах синергетической теории управления. Задача синергетического синтеза системы группового управления квадрокоптерами рассматривается с учетом анализа математической модели и специфики поставленной конечной цели. 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 качестве условий, предъявляемых к синтезируемому закону группового управления, выступают асимптотически устойчивое движение ведущего мобильного и ведомых мобильных роботов к заданной точке пространства с заданным типом строя.*

*Групповое управление; квадрокоптер; математическая модель; синергетическая теория управления.*

**S.A. Sklyarov**

### **SYNERGISTIC CONTROL OF A GROUP OF MOBILE ROBOTS**

*This paper explores the problem of synthesis of synergetic control of a group of mobile robots. To solve this problem in article presents new approach to control of a group of mobile robot based on principals and methods of synergetic control theory. The task of the synergetic synthesis of control of a group of quadcopters is considered with the analysis of mathematic model and*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-00794А).