

**Р. А. Мунасыпов**, д-р техн. наук, проф., rust40@mail.ru,  
**Т. З. Муслимов**, аспирант, tagir.muslimov@gmail.com,  
 Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ)

## Групповое управление беспилотными летательными аппаратами на основе метода пространства относительных состояний

*Решена задача группового управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) самолетного типа с помощью метода пространства относительных состояний. При использовании данного многоагентного подхода строй БПЛА становится децентрализованной градиентной динамической системой, и функциональный порядок системы генерируется в результате взаимодействия ее агентов. Решение было проверено в среде MATLAB/Simulink с использованием реалистичных нелинейных динамических моделей летательных аппаратов.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, полет строем, групповое управление БПЛА, многоагентная система, градиентная динамическая система

### Введение

Одним из перспективных направлений применения автономных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является групповое управление. Полет строем, т.е. точное выдерживание некоторых заданных относительных положений в процессе полета группы, не только улучшает эффективность выполнения некоторых видов миссий, но и для целого ряда задач становится необходимым условием их решения. В качестве примеров можно привести локализацию радара [1], преодоление ПВО противника с помощью ложных целей, построение антенных решеток из БПЛА [2, 3], измерение профилей ветра для метеорологических исследований [4], автоматическую дозаправку в воздухе [5], увеличение полезной нагрузки или дальности за счет снижения индуктивного сопротивления в случае полета плотным строем [6] и др.

Существуют несколько подходов к решению проблемы формирования строя БПЛА. В некоторых работах алгоритмы управления были разработаны для квадрокоптеров [7, 8]. Для БПЛА самолетного типа наиболее распространены являются подход "ведущий—ведомые" [9, 10] и подход на основе виртуальных структур [11]. В качестве недостатков метода "ведущий—ведомые" можно назвать отсутствие обратной связи от ведомых аппаратов, а также централизованность системы, заключающуюся в том, что выход из строя ведущего БПЛА ведет к потере формы строя. Подход на основе виртуальных структур в первоначальном варианте также не предполагает обратной связи от объектов управления и, кроме того, в значительной

степени чувствителен к внешним возмущениям (например, ветровым), вследствие чего теряется точность выдерживания строя. В работе [12] предлагается подход на основе применения методов теории оптимального управления, однако он обладает относительно высокой вычислительной сложностью и поэтому может не подойти для использования на малых БПЛА.

В данной статье для формирования трехмерного строя БПЛА используется метод пространства относительных состояний — децентрализованное управление многоагентной системой, отказоустойчивое в том смысле, что выход из строя отдельных агентов не ведет ни к выходу из строя всей системы, ни к неосуществимости дальнейшего построения и выдерживания формации. При этом каждый агент обладает автономностью, т.е. способностью контролировать часть глобального состояния системы. Данный метод является биоинспирированным алгоритмом, основанным на модели работы сети двигательных нейронов живых организмов, и не обладает большой вычислительной сложностью.

### Математическая модель динамики полета БПЛА

Для динамической модели БПЛА используются две системы координат: инерциальная "на север — на восток — вниз" (NED) с индексом  $\cdot^n$  и связанная система координат с индексом  $\cdot^b$ .

Координаты БПЛА задаются следующим образом:

$$\mathbf{p}^n = (p_n \ p_e \ p_d)^T,$$

где  $p_n$  — северная координата (широта) положения БПЛА в инерциальной системе координат;  $p_e$  — восточная координата (долгота) положения БПЛА в инерциальной системе координат;  $p_d$  — координата БПЛА по оси, направленной к центру Земли в инерциальной системе координат.

Ориентация БПЛА задается с помощью углов Эйлера:

$$\Theta = (\phi \quad \theta \quad \psi)^T,$$

где  $\phi$  — угол крена;  $\theta$  — угол тангажа;  $\psi$  — угол рыскания.

Компоненты скорости БПЛА в связанной системе координат:

$$\mathbf{v}^b = (u \quad v \quad w)^T,$$

где  $u$  — компонента скорости вдоль оси, направленной к носу аппарата;  $v$  — компонента скорости вдоль оси, направленной вдоль правого крыла аппарата;  $w$  — компонента скорости вдоль оси, направленной от верха к низу аппарата.

Угловые скорости

$$\boldsymbol{\omega}^b = (p \quad q \quad r)^T$$

рассматриваются в связанной системе координат.

Вектор входных воздействий имеет вид

$$\mathbf{u} = (\delta_e \quad \delta_a \quad \delta_r \quad \delta_t)^T,$$

где  $\delta_e$  — отклонение руля высоты;  $\delta_a$  — отклонение элеронов;  $\delta_r$  — отклонение руля направления;  $\delta_t$  — отклонение дроссельной заслонки.

Линеаризованные уравнения бокового движения БПЛА в пространстве состояний [13]:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \\ \psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_v & Y_p & Y_r & g \cos \theta \cos \phi & 0 \\ L_v & L_p & L_r & 0 & 0 \\ N_v & N_p & N_r & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cos \phi \operatorname{tg} \theta & q \cos \phi \operatorname{tg} \theta - r \sin \phi \operatorname{tg} \theta & 0 \\ 0 & 0 & \cos \phi \operatorname{sec} \theta & p \cos \phi \operatorname{sec} \theta - r \sin \phi \operatorname{sec} \theta & 0 \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{pmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \\ \psi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y_{\delta_a} & Y_{\delta_r} \\ L_{\delta_a} & L_{\delta_r} \\ N_{\delta_a} & N_{\delta_r} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_a \\ \delta_r \end{pmatrix}.$$

Линеаризованные уравнения продольного движения БПЛА в пространстве состояний:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} u \\ w \\ q \\ \theta \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_u & X_w & X_q & -g \cos \theta & 0 \\ Z_u & Z_w & Z_q & -g \sin \theta & 0 \\ M_u & M_w & M_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & -\cos \theta & 0 & u \cos \theta + w \sin \theta & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w \\ q \\ \theta \\ h \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{\delta_e} & X_{\delta_t} \\ Z_{\delta_e} & 0 \\ M_{\delta_e} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_e \\ \delta_t \end{pmatrix}.$$

### Метод пространства относительных состояний в задачах децентрализованного управления многоагентными системами

В статьях [14, 15] в соответствии с представлениями об осцилляторной нейронной сети живых организмов, формирующей двигательные сигналы локомоции, была предложена модель децентрализованной автономной динамической системы взаимодействующих агентов. На основе этого подхода определим группу автономных БПЛА как систему данного типа.

Будем рассматривать многоагентную автономную систему как граф, в котором каждый агент является вершиной графа, а взаимодействие — ребром (рис. 1).

Пусть  $n$  — число БПЛА;  $N$  — число взаимодействий между ними;  $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n)^T$  — вектор текущих состояний;  $\zeta = (\zeta_1, \dots, \zeta_N)^T$  — вектор

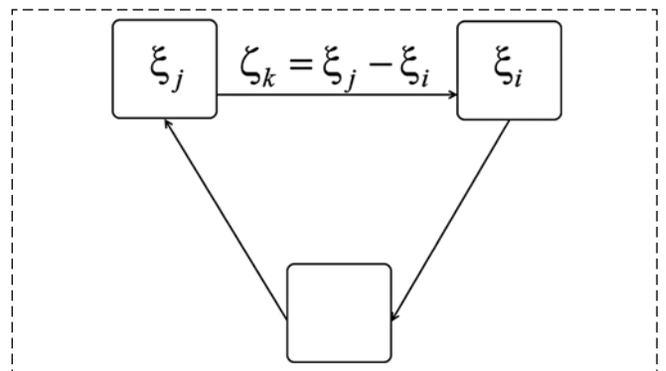


Рис. 1. Представление децентрализованной автономной динамической системы в виде графа

относительных состояний (рис. 1);  $\mathbf{A}$  — матрица инцидентности графа. В этом случае их взаимосвязь определяется следующим образом:

$$\zeta = \mathbf{A}^T \xi. \quad (1)$$

Если данный граф является связным, то в соответствии с теорией графов вектор относительных состояний  $\zeta = (\zeta_1, \dots, \zeta_N)^T$  становится порождающим вектором пространства размерностью  $n - 1$  независимо от  $N$ , которое в дальнейшем будем называть пространством относительных состояний.

Пусть уравнение динамики  $i$ -го БПЛА имеет вид

$$\frac{d\xi_i}{dt} = f_i(\xi_i, \xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_{m_i}}), \quad (2)$$

где  $\xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_{m_i}}$  — текущие состояния  $i_1$ -го, ...,  $i_{m_i}$ -го агентов, которые непосредственно взаимодействуют с  $i$ -м, а  $f_i$  — дифференцируемая функция. Следовательно, согласно соотношениям (1) и (2) уравнение динамики относительных состояний можно представить в следующем виде:

$$\frac{d\zeta}{dt} = \mathbf{A}^T \mathbf{f}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_n)^T$ . Тогда в соответствии с работой [14] выполняется следующая теорема.

**Теорема.** В пространстве относительных состояний существует потенциальная функция в том и только в том случае, если компоненты вектор-функции  $\mathbf{f}$  определяются следующим образом:

$$f_i = \tilde{f}_i(\vartheta_i) + \bar{f},$$

где  $\vartheta_i = \sum_{k=1}^{m_i} (\xi_{i_k} - \xi_i)$ ;  $\vartheta_i$  — разница между суммой относительных состояний, для которых ребро графа входит в  $i$ -ю вершину графа (в этом случае  $\xi_{i_k} - \xi_i = \vartheta_{i_k}$ ), и суммой относительных состояний, для которых ребро выходит из  $i$ -й вершины (в этом случае  $\xi_{i_k} - \xi_i = -\vartheta_{i_k}$ ) (рис. 2);  $\bar{f}$  — те

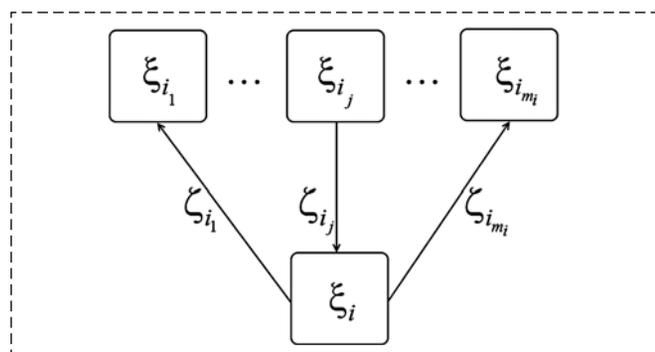


Рис. 2. Иллюстрация взаимодействий с  $i$ -м БПЛА

слагаемые в уравнениях динамики агентов (2), для которых выполняется следующее условие:

$$\frac{\partial f_1}{\partial \phi} = \frac{\partial f_2}{\partial \phi} = \dots = \frac{\partial f_n}{\partial \phi} \equiv \frac{\partial \bar{f}}{\partial \phi}, \quad \text{где } \phi = \sum_{i=1}^n \xi_i$$

— величина, характеризующая движение центра масс группы агентов. Тогда потенциальная функция в пространстве относительных состояний имеет вид

$$V(\zeta) = \sum_{i=1}^n \int \tilde{f}_i(\vartheta_i) d\vartheta_i.$$

Следует отметить, что поскольку  $\mathbf{A}^T(\bar{f}, \dots, \bar{f})^T = 0$ , то ни  $\frac{d\zeta}{dt}$ , ни  $V(\zeta)$  не зависят от  $\bar{f}$ .

Таким образом, взаимодействие между подсистемами (агентами) генерирует упорядоченность самой системы и уравнение (3) является градиентной динамической системой, т.е. выполняется соотношение:

$$\frac{d\zeta}{dt} = - \left( \frac{dV(\zeta)}{d\zeta} \right)^T.$$

При этом финальное равновесие находится в глобальном минимуме потенциальной функции  $V(\zeta)$  в пространстве относительных состояний. В случае изменения цели или окружающей обстановки данная потенциальная функция будет меняться, и взаимодействия между агентами изменятся соответствующим образом, что отражает построение нового функционального порядка. Кроме того, следует отметить, что система является децентрализованной — для формирования строя не требуется супервизор, так как каждый агент определяет собственное поведение для достижения конечной цели в зависимости от поведения взаимодействующих с ним агентов. Если один из агентов испытывает внешние возмущения, то остальные подстраиваются под него, сохраняя форму.

### Алгоритм группового управления БПЛА методом пространства относительных состояний

Стратегию управления для  $i$ -го БПЛА относительно восточной оси инерциальной системы координат (ИСК) представим следующим образом:

$$\frac{dp_{e_i}}{dt} = \sum_{j \in J_i} \tau_{ij} (p_{e_j} - p_{e_i}) + u_{e_i}, \quad (4)$$

где  $p_{e_i}$  — восточная координата  $i$ -го БПЛА в ИСК;  $\tau_{ij}$  — коэффициент взаимодействия между  $i$ -м и  $j$ -м агентом;  $J_i$  — множество БПЛА, взаимодействующих с  $i$ -м агентом;  $u_{e_i}$  — управляющее воздействие, испытываемое  $i$ -м БПЛА в проекции на восточную ось ИСК.

Аналогично задаются стратегии управления относительно северной оси координат и высоты над уровнем моря:

$$\frac{dp_{n_i}}{dt} = \sum_{j \in J_i} \tau_{ij} (p_{n_j} - p_{n_i}) + u_{n_i}, \quad (5)$$

$$\frac{dh_i}{dt} = \sum_{j \in J_i} \tau_{ij} (h_j - h_i) + u_{h_i}, \quad (6)$$

где  $p_{n_i}$  — северная координата  $i$ -го БПЛА в ИСК;  $h_i = -p_d$  — высота  $i$ -го БПЛА над уровнем моря;  $u_{n_i}$  — управляющее воздействие, испытываемое  $i$ -м БПЛА в проекции на северную ось ИСК;  $u_{h_i}$  — управляющее воздействие, испытываемое  $i$ -м БПЛА в проекции на направление, противоположное оси, указывающей на центр Земли в ИСК.

Кинематические уравнения БПЛА представим следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} p_n \\ p_e \\ h \end{pmatrix} = v_g \begin{pmatrix} \cos \chi \cos \gamma \\ \sin \chi \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где  $v_g$  — скорость аппарата в ИСК;  $\chi$  — угол курса между вектором скорости в ИСК и северной осью этой же системы координат;  $\gamma$  — угол наклона траектории между горизонтальной плоскостью и вектором скорости в ИСК.

Таким образом, в соответствии с уравнениями (4)–(7) угол курса  $\chi_i$ , модуль воздушной скорости  $v_{a_i}$  и угол наклона траектории  $\gamma_i$  каждого БПЛА задаются следующим образом:

$$\chi_i = \arctg \left( \frac{u_{n_i}}{u_{e_i}} \right);$$

$$v_{a_i} = \sqrt{u_{n_i}^2 + u_{e_i}^2 + u_{h_i}^2};$$

$$\gamma_i = \arctg \frac{u_{h_i}}{\sqrt{u_{n_i}^2 + u_{e_i}^2}}.$$

Вектор управляющих воздействий  $\mathbf{U}_e = (u_{e_1}, \dots, u_{e_n})$  вдоль восточной оси ИСК находится из следующего соотношения:

$$\mathbf{U}_e = \mathbf{B}_e \mathbf{P}_e + \mathbf{D},$$

где  $\mathbf{D} = -\mathbf{B}_e \mathbf{H}_e^{-1} (\mathbf{P}_{ed}^T, \hat{\mathbf{P}}_e)^T$  — вектор управления системой в пространстве относительных состояний;  $\mathbf{H}_e$  — матрица, имеющая вид

$$\mathbf{H}_e = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix}, \mathbf{q}_i = (\dots, 1, \dots, -1, \dots), i < n, \mathbf{q}_n = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}^T,$$

при этом  $\mathbf{H}_e \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ ,  $\mathbf{P}_{ed}$  — вектор желаемых относительных положений вдоль восточной оси ИСК;  $\hat{\mathbf{P}}_e = \sum_{k=1}^n p_{e_k}$  — сумма текущих восточных координат БПЛА в ИСК;  $\mathbf{B}_e = (m_{ij} \tau_{ij}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  — матрица, получаемая из элементов  $m_{ij}$  матрицы взаимодействия  $\mathbf{M}$ , которая, в свою очередь, может быть представлена различными способами в зависимости от типа взаимодействия между агентами.

Например, для четырех БПЛА:

- в случае взаимодействия "каждый с каждым"

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} -3 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -3 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -3 \end{pmatrix};$$

- в случае взаимодействия "сосед с соседом"

$$\mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix};$$

- в случае взаимодействия "ведущий с ведомыми"

$$\mathbf{M}_3 = \begin{pmatrix} -3 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Аналогичным образом находятся векторы управляющих воздействий  $\mathbf{U}_n = (u_{n_1}, \dots, u_{n_n})$  вдоль северной оси ИСК и  $\mathbf{U}_h = (u_{h_1}, \dots, u_{h_n})$  вдоль оси, указывающей на центр Земли.

Для проверки разработанных алгоритмов группового управления были проведены эксперименты с помощью программно-математического моделирования в среде MATLAB/Simulink. При этом были использованы модели динамики полета аппаратов "Zagi UAV", линеаризованные параметры продольного и бокового движений которых были рассчитаны в соответствии с методикой, представленной в работе [13].

На рис. 3 показаны построение и поддержание заданной геометрической формы четырьмя БПЛА, а также пронумерованные траектории каждого из них. Изначально геометрическая форма строя аппаратов представляет собой прямую линию. После отработки алгоритма строй принимает форму квадрата со строго заданной длиной стороны и поддерживается в ходе всего дальнейшего полета в таком виде.

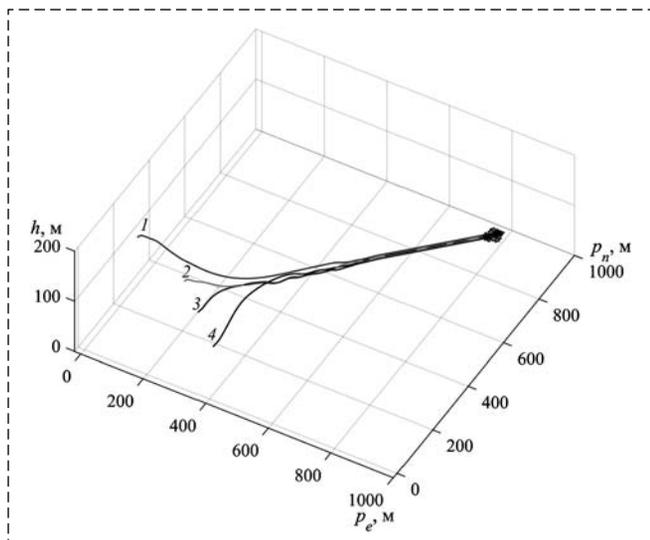


Рис. 3. Построение и поддержание заданной геометрической формы в полете

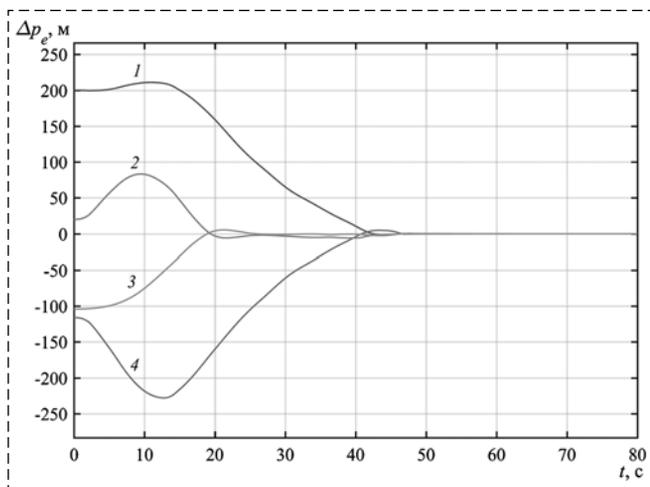


Рис. 4. Графики ошибки относительных положений БПЛА

На рис. 4 показаны графики зависимости ошибки относительных положений БПЛА вдоль восточной оси инерциальной системы координат ( $\Delta p_e$ ) от времени для каждого из четырех аппаратов. Номера графиков соответствуют номерам траекторий на рис. 3.

Из рис. 4 видно, что графики переходных процессов достаточно гладкие, и выход строя БПЛА в заданную геометрическую форму происходит за приемлемое время.

### Заключение

В статье представлено успешное применение метода пространства относительных состояний для решения задачи построения и выдерживания строя БПЛА самолетного типа. Дальнейшие

исследования будут сосредоточены на оптимизации времени формирования строя, учете предупреждения столкновений аппаратов в воздухе и создании основанных на вышеописанном методе алгоритмов планирования пути.

### Список литературы

1. Sundaram B., Palaniswami M., Reddy S., Sinickas M. Radar localization with multiple unmanned aerial vehicles using support vector regression // Intelligent sensing and information processing. 2005. P. 232–237.
2. Chandra R. S., Breheny S. H., D'Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles // Automatica. 2008. Vol. 44. P. 1976–1984.
3. Garza J., Panduro M. A., Reyna A., Romero G., del Rio C. Design of UAVs-based 3D antenna arrays for a maximum performance in terms of directivity and SLL // International Journal of Antennas and Propagation. 2016.
4. Coopmans C., Stark B., Jensen A., Chen Y. Q., McKee M. Cyber-physical systems enabled by small unmanned aerial vehicles. In: K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos (Eds.), Handbook of unmanned aerial vehicles. Dordrecht; Heidelberg; New York; London: Springer, 2015, P. 2835–2860.
5. Wilson D. B., Göktoğan A. H., Sukkarieh S. A vision based relative navigation framework for formation flight // IEEE International conference on robotics and automation (ICRA). 2015. P. 4988–4995.
6. Binetti P., Ariyur K. B., Krstic M., Bernelli F. Formation flight optimization using extremum seeking feedback // Journal of guidance, control, and dynamics. 2003. Vol. 26 (1). P. 132–142.
7. Зенкевич С. Л., Галустян Н. К. Децентрализованное управление группой квадрокоптеров // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 11. С. 774–782.
8. Ivanov D., Kaliev I., Kapustjan S. Formation task in a group of quadrotors // Robot Intelligence Technology and Applications 3. Springer International Publishing, 2015. P. 183–191.
9. Paul T., Krogstad T. R., Gravdahl J. T. Modelling of UAV formation flight using 3D potential field // Simulation Modelling Practice and Theory. 2008. Vol. 16 (9). P. 1453–1462.
10. Park C., Cho N., Lee K., Kim Y. Formation flight of multiple UAVs using onboard information sharing // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 17397–17419.
11. Beard R. W., Lawton J., Hadaegh F. Y. A coordination architecture for formation control // IEEE transactions on control systems technology. 2001. Vol. 9 (6). P. 777–790.
12. Гайдук А. Р. Управление группой БЛА с ограничением на управление и переменные состояния // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 7. С. 52–57.
13. Beard R. W., McLain T. W. Small unmanned aircraft: theory and practice. Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2012.
14. Yuasa H., Ito M. Coordination of many oscillators and generation of locomotory patterns // Biological Cybernetics. 1990. Vol. 63 (3). P. 177–184.
15. Yamaguchi H., Arai T. Distributed and autonomous control method for generating shape of multiple mobile robot group // IEEE/RSJ/GI International conference on intelligent robots and systems IROS'94. 1994. Vol. 2. P. 800–807.

# UAVs Group Control Based on the Relative State Space Method

R. A. Munasypov, rust40@mail.ru, T. Z. Muslimov, tagir.muslimov@gmail.com✉

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450000, Russian Federation

Corresponding author: **Muslimov T. Z.**, Graduate Student,  
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450000, Russian Federation,  
e-mail: tagir.muslimov@gmail.com

Accepted on October 20, 2017

In this paper, the problem of fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAVs) group control was solved using the relative state space method. To achieve this goal the authors created a flight dynamic model of a fixed-wing UAV. Then it was linearized using MATLAB built-in routine and the standard PID autopilot was synthesized. The control inputs for the UAV's inverse kinematic model were calculated based on relative state space method, which is decentralized control of the multi-agent system, fault-tolerant in the sense that the failure of individual agents does not lead either to the failure of the entire system or to the inability to further build and maintain the formation. Each agent has autonomy, i.e. the ability to control part of the system's global state. This method is a bio-inspired algorithm based on the model of living organisms' motor neurons network. In comparison with the "leader-follower" method, the relative state space approach involves the construction of a control hypersurface in the relative state space instead of just following "leader" commands. In addition, this method is resistant to atmospheric disturbances in comparison with virtual structure approach and it has a low computational complexity. Initially the relative state space method was developed only for linear control objects without taking into account their dynamics. Therefore, it was modified by the authors to be applicable to nonlinear control objects (for example, fixed-wing UAVs). The math modeling in MATLAB/Simulink shows successful solution of the problem. Further research will focus on optimization of the formation building time, considering the vehicles collision avoidance and creating path-following algorithms based on the above method.

**Keywords:** UAV control, UAV group control, UAV formation, multi-agent system, decentralized control, gradient system.

For citation:

Munasypov R. A., Muslimov T. Z. UAVs Group Control Based on the Relative State Space Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 120–125.

DOI: 10.17587/mau.19.120-125

## References

1. Sundaram B., Palaniswami M., Reddy S., Sinickas M. Radar localization with multiple unmanned aerial vehicles using support vector regression, *Intelligent sensing and information processing*, 2005, pp. 232–237.
2. Chandra R. S., Breheny S. H., D'Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles, *Automatica*, 2008, vol. 44, pp. 1976–1984.
3. Garza J., Panduro M. A., Reyna A., Romero G., del Rio C. Design of UAVs-based 3D antenna arrays for a maximum performance in terms of directivity and SLL, *International Journal of Antennas and Propagation*, 2016.
4. Coopmans C., Stark B., Jensen A., Chen Y. Q., McKee M. Cyber-physical systems enabled by small unmanned aerial vehicles, In K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos (Eds.), *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Dordrecht; Heidelberg; New York; London, Springer, 2015, pp. 2835–2860.
5. Wilson D. B., Göktoğan A. H., Sukkarieh S. A vision based relative navigation framework for formation flight, *IEEE International conference on robotics and automation (ICRA)*, 2015, pp. 4988–4995.
6. Binetti P., Ariyur K. B., Krstic M., Bernelli F. Formation flight optimization using extremum seeking feedback, *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2003, vol. 26 (1), pp. 132–142.
7. Zenkevich S. L., Galustyan N. K. Decentralizovannoe upravlenie gruppov kvadropteroev (Decentralized Control of a Quadcopter Swarm), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 774–782 (in Russian).
8. Ivanov D., Kaliev I., Kapustjan S. Formation task in a group of quadrotors, *Robot Intelligence Technology and Applications 3*, Springer International Publishing, 2015, pp. 183–191.
9. Paul T., Krogstad T. R., Gravdahl J. T. Modelling of UAV formation flight using 3D potential field, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2008, vol. 16 (9), pp. 1453–1462.
10. Park C., Cho N., Lee K., Kim Y. Formation flight of multiple UAVs using onboard information sharing, *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 17397–17419.
11. Beard R. W., Lawton J., Hadaegh F. Y. A coordination architecture for formation control, *IEEE transactions on control systems technology*, 2001, vol. 9 (6), pp. 777–790.
12. Gaiduk A. R. Upravlenie gruppov BLA s ogranicheniem na upravlenie i peremennye sostojanija (Control by Group of Unmanned Aerial Vehicles with Restriction on Control Actions and State Variables), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 7, pp. 52–57 (in Russian).
13. Beard R. W., McLain T. W. Small unmanned aircraft: theory and practice, Princeton and Oxford, Princeton University Press, 2012.
14. Yuasa H., Ito M. Coordination of many oscillators and generation of locomotory patterns, *Biological Cybernetics*, 1990, vol. 63 (3), pp. 177–184.
15. Yamaguchi H., Arai T. Distributed and autonomous control method for generating shape of multiple mobile robot group, *IEEE/RSJ/GI International conference on intelligent robots and systems IROS'94*, 1994, vol. 2, pp. 800–807.