

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2025-47-64-70>

АЛГОРИТМЫ СОГЛАСОВАННОГО СЛЕДОВАНИЯ ПО ПУТЯМ ДЛЯ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Фам К.Ф.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

Ключевые слова: координированное управление, управление строем, ведущий-ведомый, распределенный алгоритм управления, согласованное следование по путям, беспилотный летательный аппарат самолетного типа.

Аннотация. В данной работе рассматривается задача управления строем группы беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. Разработаны алгоритмы согласованного следования по прямолинейному и круговому путям на основе стратегии управления «ведущий-ведомый». Эффективность разработанных алгоритмов подтверждаются численным моделированием в среде MATLAB.

COORDINATED PATH FOLLOWING ALGORITHMS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE SWARM

Pham Q.P.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: coordinated control, formation control, leader-follower, distributed control algorithm, coordinated path following, fixed-wing unmanned aerial vehicle.

Abstract. This paper addresses the problem of formation control for a swarm of fixed-wing unmanned aerial vehicles. Algorithms for coordinated following of straight-line and circular paths are proposed based on leader-follower control strategy. Efficiency of proposed algorithms are verified by numerical simulations in MATLAB.

Введение

В последние годы высокий интерес исследователей привлекает задача координированного управления динамическими мультиагентными системами [1-2]. Такие системы обладают гибкостью, масштабируемостью и устойчивостью к отказам одиночных агентов. Одной из главных направлений исследования является управление строем – управление согласованным движением агентов с поддержанием заданной геометрической конфигурации [3]. Особенно актуальна задача управления строем беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), применяемых в поисково-спасательных операциях [4], патрулировании границ [5], мониторинге труднодоступных территорий [6] и в других задачах.

В настоящее время в литературе отсутствует единая классификация методов управления строем. По архитектуре управления методы классифицируются на централизованные, децентрализованные и иерархические [7]. В зависимости от управляемых параметров различают подходы, основанные на управлении абсолютными и относительными положениями, а также расстояниями между агентами [8]. По стратегиям

управления выделяют: «ведущий-ведомый», поведенческий подход, роевой интеллект, виртуальные структуры, методы искусственного потенциального поля и алгоритмы консенсуса [9].

В данной работе разработаны распределенные алгоритмы управления строем группы БПЛА самолетного типа на основе стратегии «ведущий-ведомый». Перед группой БПЛА поставлена задача следовать по прямолинейному и круговому путям, одновременно поддерживая заданную геометрическую формацию. Предложенные алгоритмы обеспечивают группе БПЛА согласованное следование по прямолинейному и круговому путям. Теоретические результаты подтверждаются численным моделированием в среде MATLAB.

Кинематическая модель наведения БПЛА

Поскольку полная модель БПЛА с автопилотом, датчиками и оценкой состояния чрезвычайно сложна, упрощенные модели используются для разработки высокоуровневых законов управления [10]. При допущении отсутствия ветра кинематическая модель наведения БПЛА в горизонтальной плоскости в инерциальной системе координат (ИСК) $Oxyz$, связанной с Землей, принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V_g \cos \chi, \\ \dot{y} &= V_g \sin \chi, \\ \dot{V}_g &= b_{V_g} (V_g^c - V_g), \\ \dot{\chi} &= b_{\chi} (\chi^c - \chi),\end{aligned}\tag{1}$$

где x – значение координаты на оси Ox , указывающей на восток; y – значение координаты на оси Oy , указывающей на север; χ – курсовой угол; χ^c – желаемый курсовой угол; V_g – путевая скорость; V_g^c – желаемая путевая скорость; b_{V_g} и b_{χ} – положительные константы, зависящие от реализации автопилота и аппаратных характеристик БПЛА.

Геометрическая конфигурация строя БПЛА

Метод «ведущий-ведомый» является одной из наиболее распространенных стратегий координации движения группы автономных роботов, включая группы БПЛА [11]. Один из БПЛА назначается в качестве ведущего, который определяет параметры движения группы, включая траекторию и скорость. Остальные БПЛА, называемые ведомыми, получают информацию от ведущего (напрямую или через соседей) и следуют за ним, сохраняя заданную конфигурацию строя. Такой подход обеспечивает высокую управляемость и простоту реализации согласованных движений, особенно в условиях ограниченной связи и при отсутствии централизованного управления. В данной работе стратегия «ведущий-ведомый» используется для разработки алгоритмов согласованного следования по путям.

Предположим, что строй симметричен и каждый БПЛА знает свое абсолютное положение x_i в ИСК. Конфигурация строя задается положениями центров масс всех БПЛА в системе координат $O_0x_0y_0z_0$, связанной с центром масс ведущего аппарата. При этом ось O_0x_0 направлена вдоль оси симметрии строя, а ось O_0z_0 – к центру Земли. Относительное положение i -го ведомого в $O_0x_0y_0z_0$ задаётся координатами Δx_i^c , Δy_i^c , Δz_i^c , определяющих его позицию в строю относительно ведущего. Ориентация строя в ИСК определяется углом χ_0 между осями O_0x_0 и Ox .

Согласованное следование по прямолинейному пути

В данном разделе алгоритм следования по прямолинейному пути для одиночного БПЛА из [10] расширяется на случай согласованного следования по прямолинейному пути. Ведущий БПЛА обладает информацией о параметрах пути: начальная точка $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3$ и направление пути $\mathbf{q} = (q_n, q_e, q_d)$. Предположим, что ведомые получают информацию о параметрах пути и переменные состояния ведущего, включая его положение $\mathbf{x}_L$ и продольную скорость $V_{прод.L}$. На основе полученной информации ведомые формируют собственные согласованные пути.

Начальная точка прямолинейного пути определяется по формуле:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r} + \Delta y_i^c \mathbf{k}, \quad (2)$$

где $\mathbf{k}$ – единичный вектор вдоль оси O_0y_0 .

Боковое отклонение от пути определяется по формуле:

$$\Delta y_i = (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_L)^T \mathbf{q}. \quad (3)$$

Прямолинейный путь описывается следующим образом:

$$P_{лин}^i(\mathbf{r}_i, \mathbf{q}) = \{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^3 : \mathbf{x} = \mathbf{r}_i + \lambda \mathbf{q}, \lambda \in \mathbb{R} \}. \quad (4)$$

Желаемый курсовой угол определяется по формуле:

$$\chi_i^c = \chi_q - \chi^\infty \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(k_{лин} \Delta y_i), \quad (5)$$

где χ_q , χ^∞ и $k_{лин}$ определяются в [10].

Желаемая продольная путевая скорость определяется по формуле:

$$V_{прод.i}^c = V_{прод.L} + k_p^{лин} (\Delta x_i^c - \Delta x_i) + k_i^{лин} \int_0^t (\Delta x_i^c - \Delta x_i) dt, \quad (6)$$

где $k_p^{лин}$ и $k_i^{лин}$ – постоянные константы.

Желаемая путевая скорость определяется по формуле:

$$V_i^c = sat \left(\frac{V_{прод.i}^c}{\cos(\chi_i - \chi_i^c)}, V_{\min}, V_{\max} \right), \quad (7)$$

где sat – функция насыщения; $V_{\min}$ и $V_{\max}$ – соответственно минимальная и максимальная располагаемые скорости БПЛА.

Согласованное следование по круговому пути

Аналогичным образом, алгоритм следования по круговому пути для одиночного БПЛА из [10] расширяется на случай согласованного следования по круговому пути. Ведущий БПЛА обладает информацией о параметрах пути – центр круга $\mathbf{c} = (c_n, c_e)$, радиус $\rho \in \mathbb{R}^3$ и направление движения $\lambda \in \{-1, 1\}$. Предположим, что ведомые получают информацию о параметрах пути и переменные состояния ведущего, включая его положение $\mathbf{x}_L$ и касательную скорость $V_{кас. L}$. На основе полученной информации ведомые беспилотники формируют собственные согласованные пути.

Радиус окружности определяется по формуле:

$$\rho_i = \sqrt{(\Delta y_i^c)^2 + (\rho + \Delta x_i^c)^2}. \quad (8)$$

Расстояние от центра масс ведомого БПЛА до центра окружности определяется по формуле:

$$d_i = \sqrt{(x_i - c_n)^2 + (y_i - c_e)^2}. \quad (9)$$

Орбитальный путь описывается следующим образом:

$$P_{круг}^i(\mathbf{c}, \rho_i, \lambda) = \{\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3 : \mathbf{r} = \mathbf{c} + \lambda \rho_i (\cos \varphi, \sin \varphi)^T, \varphi \in [0, 2\pi]\}, \quad (10)$$

где $\lambda = 1$ и $\lambda = -1$ при движении по или против часовой стрелки.

Желаемый курсовой угол определяется по формуле:

$$\chi_i^c = \varphi_i + \lambda \frac{\pi}{2} + \lambda \tan^{-1} \left(k_{круг} \left(\frac{d_i - \rho_i}{\rho_i} \right) \right), \quad (11)$$

где $k_{круг}$ и φ_i определяются в [10].

Желаемая касательная путевая скорость определяется по формуле:

$$V_{кас. i}^c = d_i \left(\frac{V_{кас. L}}{d_L} + k_p^{круг} (\varphi_i^c - \varphi_i) + k_i^{круг} \int_0^t (\varphi_i^c - \varphi_i) dt \right), \quad (12)$$

где $k_p^{круг}$ и $k_i^{круг}$ – постоянные константы, а φ_i^c определяется по формуле:

$$\varphi_i^c = \varphi_L + \tan^{-1} \left(\frac{\Delta y_i^c}{\rho + \Delta x_i^c} \right), \quad (13)$$

Желаемая путевая скорость определяется по формуле:

$$V_i^c = \text{sat} \left(\frac{V_{кас. i}^c}{\cos \left(k_{круг} \left(\frac{d_i - \rho_i}{\rho_i} \right) \right)}, V_{\min}, V_{\max} \right). \quad (14)$$

Результаты компьютерного моделирования

В этом разделе проводится численное моделирование в среде MATLAB для подтверждения теоретических результатов, представленных выше. Рассматривается группа из пяти БПЛА, координирующих действия по стратегии «ведущий-ведомый» и поддерживающих формацию в виде равнобедренного треугольника в горизонтальной плоскости.

Результаты численного моделирования представлены ниже. На рисунке 1 и 2 представлены траектории БПЛА. Из графиков видно, что разработанные алгоритмы эффективно обеспечивают согласованное движение группы БПЛА даже при различных начальных положениях БПЛА.

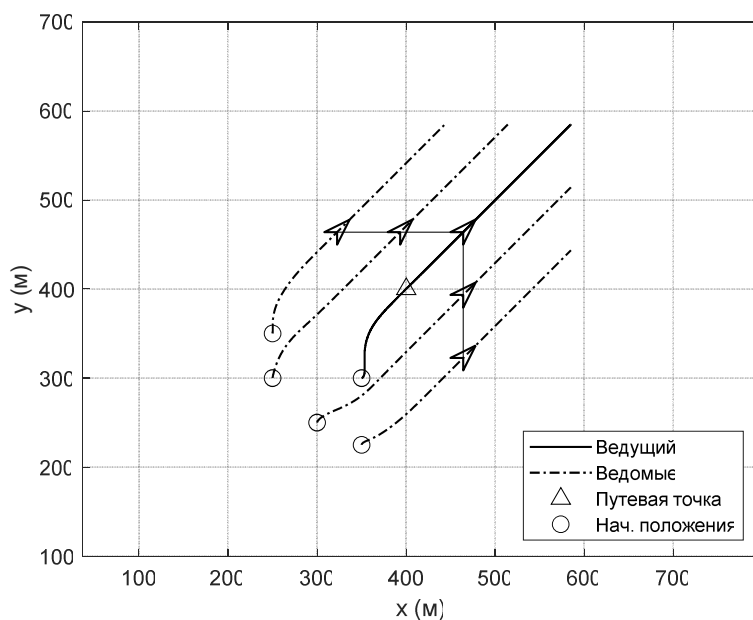


Рис. 1. Согласованное следование по прямолинейному пути

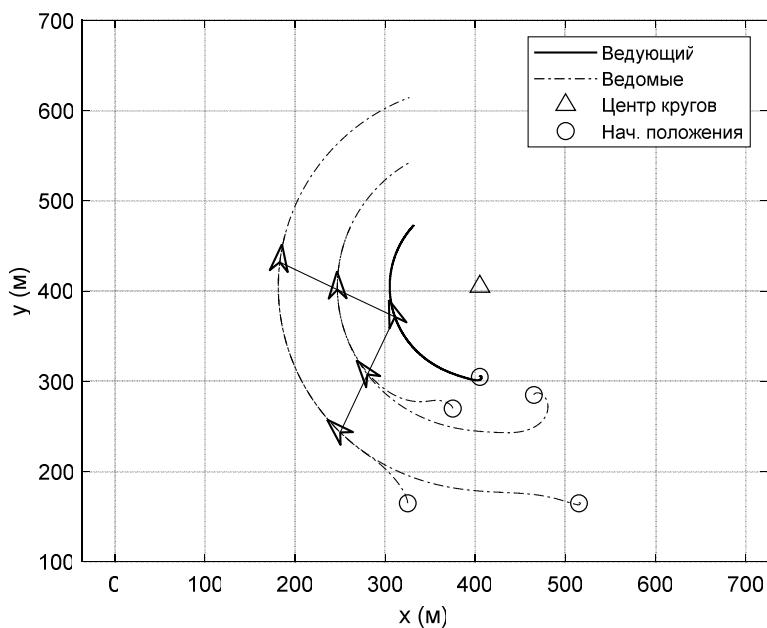


Рис. 2. Согласованное следование по круговому пути

Заключение

Моделирование показывает, что разработанные алгоритмы обеспечивают согласованное следование по путям и поддержание строя на основе только локальных взаимодействий, без глобальной связи и централизованного управления. В качестве перспективного направления дальнейших исследований предлагается разработка топологии информационного взаимодействия между БПЛА, обеспечивающая консенсус по необходимой информации для выполнения задачи.

Список литературы

1. Белоглазов Д.А., Гайдук А.Р., Косенко Е.Ю., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Соловьев В.В., Титов А.Е., Финаев В.И., Шаповалов И.О. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2015. – 305 с.
2. Bullo F., Cortes J., Martinez S. Distributed Control of Robotic Networks. – Princeton University Press, Princeton, 2006. – 323 p.
3. Hugh H.T. Liu, Bo Zhu. Formation control of multiple autonomous vehicle systems. – Hoboken, NJ: Wiley, 2018. – 253 p.
4. Scherer J., Yahyanejad S., Hayat S., Yanmaz E., Andre T., Khan A., Vukadinovic V., Bettstetter C., Hellwagner H., Rinner B. An autonomous multi-UAV system for search and rescue // Proceedings of the First Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use. – Florence, Italy, 18 May 2015. – P. 33-38.
5. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б., Нгуен Т.К., Фам К.Ф. Планирование маршрутов полета БПЛА в задачах группового патрулирования протяженных территорий // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, № 7. – С. 374-381. – DOI: 10.17587/mau.24.374-381.
6. Merino L., Martínez-de Dios J.R., Ollero A. Cooperative Unmanned Aerial Systems for Fire Detection, Monitoring, and Extinguishing. In: Valavanis K., Vachtsevanos G. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. – Springer Netherlands, 2015. – P. 2693-2722.
7. Курочкин С.Ю., Тачков А.А. Методы управления групповым движением мобильных роботов (обзор) // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22, № 6. – С. 304-312. – DOI: 10.17587/mau.22.304-312.
8. Kwang-Kyo Oh, Myoung-Chul Park, and Hyo-Sung Ahn. A survey of multi-agent formation control // Automatica. 2015, vol. 53, pp. 424-440.
9. Do Y.T., Hua H.T., Nguen M.T., Nguyen C.V., Nguyen H.T.T., Nguyen H.T., Nguyen N.T.T. Formation Control Algorithms for Multiple-UAVs: A Comprehensive Survey // EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems. 2021, vol. 8, iss. 27: e3. DOI: 10.4108/eai.10-6-2021.170230.
10. Рэндал Ую Биард, Тимоти У. МакЛэйн. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 312 с.
11. Desai J.P., Ostrowski J., Kurmar V. Controlling formations of multiple mobile robots // Proceedings of the 1998 IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation. 1998, pp. 2864-2869.

References

1. Beloglazov D.A., Gaiduk A.R., Kosenko E.Yu., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Soloviev V.V., Titov A.E., Finaev V.I., Shapovalov I.O. Group control of mobile objects in uncertain environments / Ed. by V.H. Pshikhopov. – M.: Fizmatlit, 2015. – 305 p.
2. Bullo F., Cortes J., Martinez S. Distributed Control of Robotic Networks. – Princeton University Press, Princeton, 2006. – 323 p.
3. Hugh H.T. Liu, Bo Zhu. Formation control of multiple autonomous vehicle systems. – Hoboken, NJ: Wiley, 2018. – 253 p.
4. Scherer J., Yahyanejad S., Hayat S., Yanmaz E., Andre T., Khan A., Vukadinovic V., Bettstetter C., Hellwagner H., Rinner B. An autonomous multi-UAV system for search and rescue // Proceedings of the First Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use. – Florence, Italy, 18 May 2015. – P. 33-38.
5. Filimonov A.B., Filimonov N.B., Nguyen T.K., Pham Q.P. Planning of UAV flight routes in the tasks of group patrolling of extended territories // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2022, vol. 23, no. 5, pp. 227-235. DOI: 10.17587/mau.24.374-381.
6. Merino L., Martínez-de Dios J.R., Ollero A. Cooperative Unmanned Aerial Systems for Fire Detection, Monitoring, and Extinguishing. In: Valavanis K., Vachtsevanos G. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. – Springer Netherlands, 2015. – P. 2693-2722.
7. Kurochkin S.Yu., Tachkov A.A. Methods of Formation Control for a Group of Mobile Robots (a Review) // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2021, vol. 22, no. 6, pp. 304-312. DOI: 10.17587/mau.22.304-312.
8. Kwang-Kyo Oh, Myoung-Chul Park, and Hyo-Sung Ahn. A survey of multi-agent formation control // Automatica. 2015, vol. 53, pp. 424-440.
9. Do Y.T., Hua H.T., Nguen M.T., Nguyen C.V., Nguyen H.T.T., Nguyen H.T., Nguyen N.T.T. Formation Control Algorithms for Multiple-UAVs: A Comprehensive Survey // EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems. 2021, vol. 8, iss. 27: e3. DOI: 10.4108/eai.10-6-2021.170230.
10. Randall Uyu Biard, Timothy W. McLane. Small unmanned aerial vehicles: theory and practice. – M.: TECHNOSPHERE, 2015. – 312 p.
11. Desai J.P., Ostrowski J., Kurmar V. Controlling formations of multiple mobile robots // Proceedings of the 1998 IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation. 1998, pp. 2864-2869.

Фам Куок Фонг – аспирант	Pham Quoc Phong – postgraduate student
hvkts1421996@gmail.com	

Received 30.04.2025