

УДК 533.6.013.1: 517.938.5: 621.395
DOI 10.22213/2413-1172-2018-4-136-140

РАЗРАБОТКА РОЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕТЕЙ. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

А. И. Нистюк, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
А. В. Абилов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
В. В. Хворенков, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
В. А. Алексеев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Статья посвящена беспилотным летательным аппаратам, а именно организации летательных аппаратов в группы. Актуальность заключается в том, что группа летательных аппаратов, образующих так называемый рой, может выполнять более сложные задачи, чем одиночный аппарат. При этом в рое возникает проблема по обеспечению минимального расстояния между аппаратами. Дистанция между БПЛА зависит от множества факторов – как от управления аппаратами, так и от изменений внешней среды.

Авторами предлагается рассматривать динамическую модель роя БПЛА как колебательную систему, движущуюся со скоростью ведущего аппарата, что используется в большинстве реализаций поведения роя. В этом случае минимальное расстояние между дронами можно рассматривать как сумму номинального расстояния, обеспечиваемого системой управления и амплитудой колебаний дрона при попытках сохранить это расстояние.

Рой БПЛА как колебательная система обладает рядом особенностей. Во-первых, ряд параметров колебательной системы меняется во времени. Например, меняются массы дронов вследствие уменьшения количества топлива, расходования полезного груза, потери частей дрона. Во-вторых, меняется структура роя, связанная с убытием и прибытием дронов в рой, сменой порядка построения дронов и т. п. В-третьих, рой может состоять из разных по конструкции, характеристикам и оснащению дронов.

Для описания структуры и количественных характеристик авторы предлагают использовать теоретико-множественный подход. Используется формализованное описание топологической модели роя беспилотных летательных аппаратов, полностью учитывающее указанные выше особенности.

Полученная модель учитывает не только динамические свойства, но и изменчивость структуры роя, а также медленное изменение динамических параметров БПЛА.

Ключевые слова: БПЛА, дрон, мобильные самоорганизующиеся сети, динамическая модель, топологическая модель, графы.

Введение

Последнее время беспилотные летательные аппараты довольно популярны в использовании: беспилотники находят применение и в военной, и в гражданской сферах, вплоть до кормления диких животных в зоопарке [1]. Беспилотный летательный аппарат (БПЛА, беспилотник, дрон) – летательный аппарат без пилотов на борту. Как указано в Федеральных правилах по использованию воздушного пространства Российской Федерации, беспилотному летательному аппарату дается определение как летательному аппарату без пилота, автоматически управляемому в полете (Об утверждении правил использования воздушного

пространства Российской Федерации : Постановление Правительства РФ от 11.03.2010 № 138 (ред. от 12.07.2016)).

Эксплуатация беспилотных летательных аппаратов привела к тому, что для решения некоторых задач необходимо создавать группы БПЛА, иногда разнородные по составу, но взаимодействующие между собой. Такие группы роботизированных устройств принято называть «несколько БПЛА, выполняющих общую задачу» [2]. Роевые технологии имеют высокий потенциал, поскольку группа БПЛА может выполнять сложные задачи, не доступные одиночным аппаратам [3]. При выполнении задачи беспилотные аппараты образуют между собой ин-

формационную сеть [4]. Информационная сеть перераспределяет задачи в меняющейся обстановке, меняет структуру роя, в том числе при выведении из строя нескольких беспилотников [5].

Данная технология реализуется в том случае, когда малоразмерные БПЛА могут двигаться, с одной стороны, с минимально возможными дистанциями между собой, с другой – с максимально возможными дистанциями. Однако у группы дронов существуют недостатки, которые нельзя не учитывать. Как правило, один из них – это сложность формирования роя, то есть обеспечение положения между отдельными дронами. При маневрировании или изменении окружающей среды взаимодействие между дронами может не успеть прийти в стационарное состояние – возможны столкновения дронов в воздухе. При минимальной дистанции столкновение дронов друг с другом становится одной из главных проблем.

Для обеспечения позиции дрона в рое можно использовать сколь угодно сложные системы, включая компьютерное зрение, GPS, ГЛОНАСС или лидары. На тяжелых беспилотных летательных аппаратах реализация таких сложных систем не представляет трудностей. Но, как уже было отмечено, оснащение и задачи таких БПЛА не требуют образования роя.

Стивен Лаццаро из Висконсинского университета в Мадисоне (США) [6] рекомендует формирование простейшего роя на базе ведущего. Таким образом, управление всем роем беспилотников сводится к управлению одним ведущим. Остальные удерживают заданную позицию относительно соседей и ведущего дрона (рис. 1). Чем выше отклонение от заданной дистанции, тем жестче вводимая корректировка.

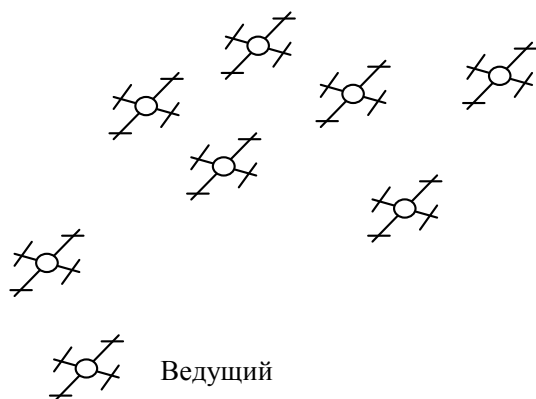


Рис. 1. Слой роя БПЛА

Задачи определения параметров роя БПЛА требует формализованных и понятных для

представления методов описания и расчета сложных структур.

Идентификация динамических моделей

Как показано во введении, к движению БПЛА в рое предъявляются требования по сохранению расстояния между дронами и следование за ведущим. Безопасное расстояние между дронами будет определяться как минимальное, обеспеченное возможностью управления и колебаниями дрона, связанными с его массой, мощностью тяги и изменениями движения подвижной среды. Поэтому целесообразно рассматривать движение системы относительно координатных осей, движущихся со скоростью ведущего дрона. Таким образом, выделяются колебания движения дронов, влияющие на изменение расстояния между ними, а рой можно рассматривать как колебательную систему высокого порядка.

Несмотря на значительное аппаратное и программное разнообразие реализации, рой можно представить как механическую колебательную систему. В механических колебательных системах можно выделить тела, за которыми в расчете сохраняются свойства инерции и считаются массы и связи, задаваемые программно. Наиболее эффективно работают связи, которые можно представить как упругие. Таким образом, динамическая модель идентифицируется как колебательная система с сосредоточенными параметрами. Очевидно, что рой представляет собой колебательную систему со многими степенями свободы, колебание которой является суммой колебаний отдельных дронов.

Так как рой во время полета постоянно подвержен воздействию возмущений среды, то практически всё время в процессе функционирования поддерживаются колебания. Величина этих колебаний зависит не только от величины возмущающей силы, но и от характеристик колебательной системы, которые, в свою очередь, зависят от величины масс и упруговязких свойств связей. Только упругую модель связи применяют в тех случаях, когда можно игнорировать сопротивление неупругого характера.

Таким образом, рой БПЛА можно рассматривать как колебательную систему с теми же параметрами, которые реально присущи группе дронов.

Формализация описания топологических моделей роя беспилотных летательных аппаратов

Известно, что наибольшей формализацией при описании механических и электронных систем обладают топологические методы.

Опишем структуру и количественные характеристики топологической модели роя дронов, показанного на рис. 2, применяя теоретико-множественный подход к описанию графа.

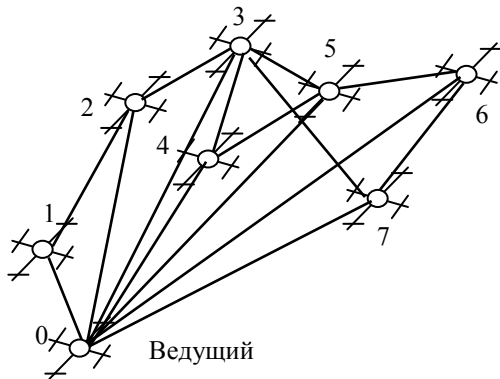


Рис. 2. Построение топологической модели

Число вершин графа обозначим через N . Вершинные множества (ВМ) используем для описания структуры графа. Обозначим множества τ_i вершин графа, которые соединены с i -й вершиной. Корневую вершину графа обозначим цифрой 0. Вершинные множества графа, изображенного на рис. 2, можно записать как

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \{0, 2\}; \\ \tau_2 &= \{0, 1, 3\}; \\ \tau_3 &= \{0, 2, 4, 5, 7\}; \\ \tau_4 &= \{0, 3, 5\}; \\ \tau_5 &= \{0, 3, 4, 6\}; \\ \tau_6 &= \{0, 5, 7\}; \\ \tau_7 &= \{0, 6, 3\}, \end{aligned} \tag{1}$$

где τ_i – вершинное множество.

ВМ являются простой и экономной формой математической записи графа системы. Элементами ВМ являются начальные вершины дуг графа, инцидентные данной вершине. Вершина, обозначенная цифрой 0, входит в каждое ВМ и называется корнем дерева.

Такое описание корректно для топологических моделей динамических систем, у которых вершины графа соответствуют инерционным компонентам, а дуги, соединяющие i -е вершины с корнем, соответствуют упругим компонентам, связанным с соблюдением позиции дрона.

Используя метод анализа по частям [7], разобьем граф на одновершинные части, разрывая

дуги графа по линиям $0A_1, 0A_2, \dots, 0A_6$, как показано на рис. 3.

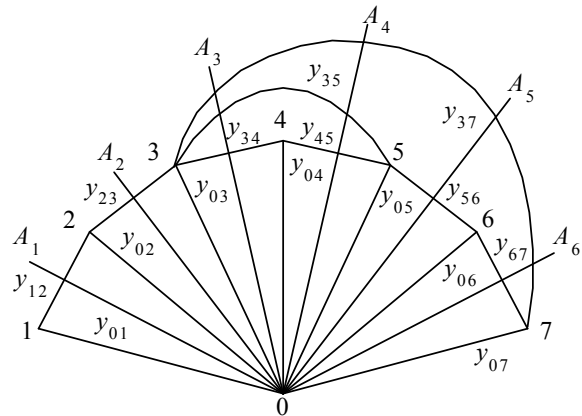


Рис. 3. Граф роя БПЛА

Множество порядковых номеров N_{τ_i} приведем в соответствие каждому вершинному множеству, как в примере $N_{\tau_3} = 1, 2, 3, 4, 5$; $N_{\tau_2} = 1, 2, 3$. ВМ отображают структуру одновершинных частей (ОЧ) графа γ_i . ОЧ получились при разделении графа линиями $0A_1, 0A_2, \dots, 0A_6$, разрезающими ребра графа и проходящими через нулевую вершину (см. рис. 3).

Количественное описание топологической модели возможно, если установить соответствие между множеством весов ребер и множеством ребер графа. При этом веса ребер могут быть многочленами нулевой, первой или второй степени комплексной переменной p . Указанное представление упрощает структуру графа. Упрощение происходит за счет объединения параллельных ветвей с различными степенями дифференциального оператора в одно ребро со сложным весом. Например, веса ребер для графа, показанного на рис. 3:

$$\begin{aligned} y_{01} &= m_1 p^2 + h_1 p + c_1; & y_{12} &= h_{12} p + c_{12}; & y_{35} &= c_{35}; \\ y_{02} &= m_2 p^2; & y_{23} &= h_{23} p + c_{23}; & y_{37} &= c_{37}; \\ y_{03} &= m_3 p^2; & y_{34} &= h_{34} p + c_{34}; & & \\ y_{04} &= m_4 p^2; & y_{45} &= h_{45} p + c_{45}; & & \\ y_{05} &= m_5 p^2; & y_{56} &= h_{56} p + c_{56}; & & \\ y_{06} &= m_6 p^2; & y_{67} &= h_{67} p + c_{67}; & & \\ y_{07} &= m_7 p^2; & & & & \end{aligned} \tag{2}$$

где m_i – параметр, отражающий инерцию дрона; h_i – параметр, аналогичный упругим свойствам при управлении; c_i – параметр, отражающий потери в среде при движении дрона.

Каждому ВМ τ_i соответствует множество весов ребер Y_i , поскольку ВМ определяют ребра,

соединяющие i -ю вершину графа с остальными вершинами. Для графа, показанного на рис. 3, множества весов ребер имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \{y_{01}, y_{02}\}; & Y_5 &= \{y_{05}, y_{45}, y_{56}\}; \\ Y_2 &= \{y_{02}, y_{12}, y_{23}\}; & Y_6 &= \{y_{06}, y_{56}, y_{67}\}; \\ Y_3 &= \{y_{03}, y_{23}, y_{34}, y_{35}, y_{37}\}; & Y_7 &= \{y_{07}, y_{67}, y_{37}\}; \\ Y_4 &= \{y_{04}, y_{34}, y_{45}\}; \end{aligned} \quad (3)$$

Введем множество варьируемых параметров U :

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_R\}, \quad (4)$$

где R – количество варьируемых параметров; u_R – варьируемый параметр.

Рассмотрим более сложную задачу. В существующих способах описаний каждому ребру графа ставится в соответствие буквенный или числовой вес. Предлагаем в многочленах вида $b_2(u)p^2 + b_1(u)p + b_0(u)$, которые выражают веса ребер, коэффициенты при степенях p представлять комбинациями произведений варьируемых параметров, как в выражении

$$b_k = \sum_{j=0}^{J_k} q_j u_1^{s_1} u_2^{s_2} \times \dots \times u_R^{s_R}, \quad (5)$$

где $k = 0, 1, 2$; q_j – вес слагаемого; s_r – степень вхождения варьируемого параметра.

Коэффициент b_k представляется в виде суммы слагаемых с весом каждого слагаемого q_j , где задаются степени s_1, s_2, \dots, s_R вхождения варьируемых параметров в j -е слагаемое. Отсюда вес ребра представляется функцией параметров $y(U)$, которую назовем параметрической функцией ребра (ПФР).

Таким образом, каждая одновершинная часть графа γ_i описывается множествами $T_i = \{\tau_i, Y_i\}$, а совокупность этих множеств $T_i, i=1, 2, \dots, N$ полностью описывает граф γ , причем не только с точки зрения его структуры, но и параметрических характеристик.

Выводы

Модель учитывает медленное изменение значений динамических параметров БПЛА. Полученная модель учитывает не только динамические свойства, но и изменчивость структуры роя. В дальнейшем полученную топологическую модель планируется использовать при проектировании поведения роя с использованием известных методов, например, [8–10].

Таким образом, получена топологическая модель роя БПЛА, отражающая динамические свойства поведения роя в реальных условиях.

Библиографические ссылки

1. Голутвина В. Дрон в китайском зоопарке помогал тиграм похудеть. URL: <https://usa.one/author/vgolutvina/> (дата обращения: 06.07.2018).
2. Плеханов И. Военные новости: все сегодня хотят свой рой военных дронов // ИноСМИ.RU. № 58 (183). URL: <https://inosmi.ru/military/20171215/241006984.html> (дата обращения: 06.07.2018).
3. Долгирев В. Д. Разработка командного взаимодействия военных БПЛА: Математическое моделирование. URL: http://genius.pstu.ru/file.php/1/pupils_works_2017/DolgirevVladislav.pdf (дата обращения: 06.07.2018).
4. Vasilev D. S., Abilov A. V., Khvorenkov V. V. Peer Selection Algorithm in Flying Ad Hoc Networks. Proc. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2016, pp. 382–386.
5. Ходаренок М. Пентагон запустил рой дронов. URL: <https://www.gazeta.ru/army/2016/10/25/10278941.shtml> (дата обращения: 06.07.2018).
6. Stephen Lazzaro. Flying Multiple Drones From 1 Remote Controller. URL: <https://minds.wisconsin.edu/handle/1793/72188> (дата обращения: 06.07.2018).
7. Nistyuk A. I., Lyalin V. E., Danilov M. V., Mikhailov Y. O. Diacoptical Analysis Algorithms of Topological Site Models of Information Backup and Storage Carrier. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2016, vol. 8, pp. 470–477.
8. Kulev M. K., Lyalin V. E., Nistyuk A. I. Synthesis of Tape Drives on the Basis of Frequency Spectra for a Three Component Rheological Tape Model. *Vibration Engineering*, 1990, vol. 4, pp. 61–71.
9. Nistyuk A. I., Danilov M. V., Sivtsev N. S., Kugultinov S. D. Method for Direct Identification of Optimum Modal Values of Dynamical Systems. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2016, vol. 8, pp. 256–263.
10. Нустюк А. И. Оптимизация параметров лентопротяжных механизмов при синтезе по частотным спектрам // Вибротехника. 1987. № 2 (55). С. 47–55.

References

1. Golutvina V. *Dron v kitajckom zooparkе pomogal tigraм pоxudet'* [The Danes in the Chinese reserve helped tigers to gain] (in Russ.). Available at: <https://usa.one/author/vgolutvina/> (accessed 06.07.2018).
2. Plekhanov I. *Voennye novosti: vse segodnya hotyat svoj roj voennyh dronov* [Military news: everyone today wants a swarm of military drones]. *InoSMI.RU*, vol. 58, no. 183 (in Russ.). Available at: <https://inosmi.ru/military/20171215/241006984.html> (accessed 06.07.2018).
3. Dolgirev V. D. *Razrabotka komandnogo vzaimodejstviya voennyh BPLA: Matematicheskoe modelirovanie* [Development of command interaction of military UAVs: Mathematical modeling] (in Russ.). Available at: http://genius.pstu.ru/file.php/1/pupils_works_2017/DolgirevVladislav.pdf (accessed 06.07.2018).
4. Vasilev D. S., Abilov A. V., Khvorenkov V. V. Peer Selection Algorithm in Flying Ad Hoc Networks. Proc. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2016, pp. 382–386.

5. Hodarenok M. *Pentagon zapustil roj dronov* [Pentagon launched a swarm of drones] (in Russ.). Available at: <https://www.gazeta.ru/army/2016/10/25/10278941.shtml> (accessed 06.07.2018).

6. Stephen Lazzaro. Flying Multiple Drones From 1 Remote Controller. URL: <https://minds.wisconsin.edu/handle/1793/72188> (дата обращения: 06.07.2018).

7. Nistyuk A. I., Lyalin V. E., Danilov M. V., Mikhailov Y. O. Diacoptical Analysis Algorithms of Topological Site Models of Information Backup and Storage Carrier. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2016, vol. 8, pp. 470-477.

8. Kulev M. K., Lyalin V. E., Nistyuk A. I. Synthesis of Tape Drives on the Basis of Frequency Spectra for a Three Component Rheological Tape Model. *Vibration Engineering*, 1990, vol. 4, pp. 61-71.

9. Nistyuk A. I., Danilov M. V., Sivtsev N. S., Kugultinov S. D. Method for Direct Identification of Optimum Modal Values of Dynamical Systems. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2016, vol. 8, pp. 256-263.

10. Nistyuk A. I. *Optimizaciya parametrov lentoprotiyazhnyh mekhanizmov pri sinteze po chastotnym spektram* [Optimization of parameters of tape drive mechanisms in the synthesis of frequency spectra]. *Vibrotekhnika*, 1987, vol. 2, no. 55, pp. 47-55 (in Russ.).

Development of Swarm Technology for Mobile Self-Organizing Networks. Identification of Dynamic Models

A. I. Nistyuk, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A. V. Abilov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. V. Khvorenkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. A. Alekseev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

In this paper, we present our methodology to unmanned aerial vehicles in order to enable the safe flight of multiple UAVs with one remote controller. Unmanned aerial vehicles are united in groups. The group of aircraft forms the so-called "swarm". "Swarm" can carry out more difficult tasks than a sole aircraft. The problem of providing the minimum distance between devices in "swarm" appears here. The distance between the UAVs depends on a set of factors, both on control of devices, and on changes of the external environment.

Authors offer to consider the dynamic model of "swarm" of the UAVs as an oscillatory system. The oscillatory system moves with a speed of the leading device. The minimum distance is provided with the minimum fluctuations.

The considered oscillatory system has a number of features:

First, a number of parameters of the oscillatory system changes in time, for example, the mass of drones owing to reduction of amount of fuel, expenditure of a payload, loss of parts of the drone change. Secondly, the structure of "swarm" changes that is connected with departure and arrival of drones in "swarm", variation of an order of creation of drones, etc. Thirdly, "swarm" can consist from drones different in design, characteristics and equipment.

Authors suggest using the set-theoretic approach for the description of structure and quantitative characteristics. The formalized description of topological model of drones is used that considers all the mentioned features.

The model considers not only dynamic parameters, but also the variability of the structure of "swarm" and a slow change in dynamic parameters of UAVs.

Keywords: unmanned aerial vehicle, drone, mobile self-organizing networks, dynamic model, topological model, multiple UAVs.

Получено 06.08.2018