

УДК 007.52

**Д.Я. Иванов**

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРОЯ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА**

*Рассмотрена проблема строевых задач в группах роботов применительно к мониторингу труднодоступных объектов и другим задачам групповой робототехники. Дана формальная постановка задачи. Рассмотрены различные варианты строевых задач. Показана актуальность решения строевой задачи, в которой целевое положение роботов определяется их относительным расположением. Приведен краткий обзор методов решения задачи о назначениях, применимых при решении строевых задач. Предложен подход, позволяющий сократить вычислительную сложность решения задачи. На основе предлагаемого подхода приведен алгоритм децентрализованного управления группой роботов при решении строевой задачи.*

*Группа роботов; мониторинг; стратегия управления.*

**D.Ya. Ivanov**

**FORMATION OF STRUCTURE BY GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN TASKS OF MONITORING**

*The paper considers the formation tasks in groups of robots for monitoring of remote objects and other problems of a multi-robotics. A formal problem statement is given. Various variants of formation tasks are shown. The article shows urgency solving the formation task, where target positions of robots are determined by their relative positions. There is a brief review of methods for solving the assignment problem, applicable to the solution of formation tasks. The new approach for solving formation task is given. The approach reduces the computational complexity of solving the problem. There is an algorithm which is based on the proposed approach for decentralized control of a group of robots to solve formation tasks.*

*Group of robots; monitoring; control strategy.*

**Введение.** В области обеспечения комплексной безопасности объектов наблюдается тенденция к использованию распределенных сенсорных систем сбора данных о состоянии объекта, получивших название «паутины датчиков» [1] (от англ. *sensor network*). Для обеспечения непрерывного контроля за состоянием объекта применяются локальные паутины датчиков. Однако для обеспечения комплексной безопасности протяженных и труднодоступных объектов, а также для периодического усиления контроля за объектом (например, мониторинг помещений во время визита высокопоставленных лиц), применяются мобильные паутины датчиков, использующие датчики, установленные на мобильных роботах. Для обеспечения безопасности таких объектов перспективным оказывается применение групп летающих роботов (малоразмерных беспилотных летательных аппаратов).

Распределение участников группы в пространстве позволяет расширить область покрытия бортовых сенсорных устройств роботов группы и увеличить объем доступных роботам данных о состоянии окружающей среды, что делает возможным применение роботов в ряде специфических для групповой робототехники задач, таких как мониторинг протяженных объектов (лесных массивов [2], транспортных магистралей [3], границ [4] и др.), противопожарный мониторинг помещений [5], формирование мобильных коммуникационных сетей [6], формирование мобильных фазированных антенных решеток [7, 8] и т.п. Решение подобных задач мониторинга требует формирования и поддержания в процессе функционирования строя роботов. Задачу формирования и поддержания строя будем называть «строевой задачей». В данной работе рассматривается решение строевой задачи группой беспилотных летательных аппаратов (БЛА).

**Формулировка строевой задачи.** Пусть в некоторой среде функционирует группа роботов. В начальный момент времени положение роботов группы в пространстве задано произвольным образом. Каждый робот группы способен выполнять действие по перемещению в пространстве. Строевая задача заключается в формировании группой роботов некоторого заданного построения оптимальным или близким к оптимальному образом, например за минимальное время, или с минимальной суммой перемещений роботов.

Подходы к решению строевых задач зависят от того, каким способом задается целевое положение роботов группы.

**Варианты строевых задач.** В зависимости от целевой задачи, решаемой группой роботов, целевое конечное положение может задаваться в виде:

- ◆ матрицы абсолютных координат, позволяющей задавать целевое положение каждому роботу группы;
- ◆ матрицы координат, позволяющей задавать все возможные целевые положения роботов группы;
- ◆ матрицы дистанций между роботами, позволяющей задавать относительное взаимное положение роботов в строю;
- ◆ матрицы углов между направлениями на соседних роботаов(как, например, в работе [9]).

В первом случае решение строевой задачи сводится к задаче управления отдельными роботами для перемещения их в заданные целевые положения оптимальным образом.

Во втором случае решение строевой задачи заключается сначала в решении задачи о назначениях, методы решения которой широко известны и приведены во многих работах [10–14], а затем в решении задачи управления отдельными роботами для перемещения их в определенные для них целевые положения.

Наибольший интерес представляет третий случай, когда задается относительное взаимное расположение роботов группы. Данная задача характерна для тех случаев, когда при осуществлении мониторинга роботы, в частности БЛА, должны поддерживать некоторые заданные дистанции по отношению друг к другу. Несколько таких задач иллюстрируются рис. 1. Для этой задачи целевое положение задается в виде матрицы дистанций между роботами. Рассмотрим один из подходов к решению данной строевой задачи.

**Предлагаемый подход к решению строевой задачи по поддержанию взаимного положения в группе роботов.** В данной работе рассматривается задача формирования строя группой из  $N$  роботов (БЛА, представляющих собой квадрокоптеры). Состояние каждого робота  $r_i$  в дискретный момент времени  $t_m$  ( $m = 0, 1, 2, \dots, k$ ) описывается вектор-функцией  $\mathbf{x}_i(t_m) = [x_{i,1}(t_m), x_{i,2}(t_m), x_{i,3}(t_m), \dots, x_{i,G}(t_m)]^T$  ( $i = \overline{1, N}$ ), где  $x_{i,\mu}(t_m)$  ( $\mu = \overline{1, G}$ ) – параметр, описывающий положение робота  $r_i$  в пространстве. Тогда состояние группы в целом описывается матрицей  $\mathbf{x}(t_m) = [\mathbf{x}_1(t_m), \mathbf{x}_2(t_m), \dots, \mathbf{x}_i(t_m), \dots, \mathbf{x}_N(t_m)]$  размерностью  $N \times G$ . Решение строевой задачи заключается в том, чтобы для всех роботов  $r_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ) группы  $\mathbf{R}$  определить в каждый момент времени  $t_m$  такие действия  $\mathbf{a}_i(t_m)$ , которые бы переводили группу из начального состояния  $\mathbf{x}(t_0)$  в заданное конечное состояние  $\mathbf{x}(t_k)$ .

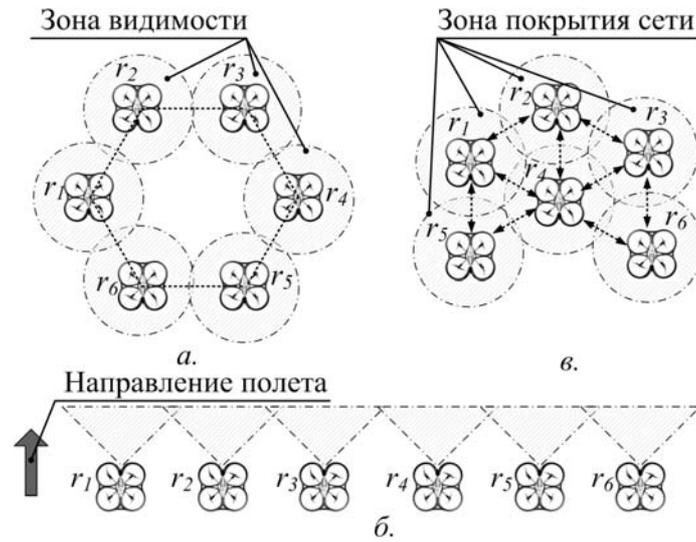


Рис. 1. Примеры целевых положений при решении задач группой квадрокоптеров: а – периметрального мониторинга; б – видеомониторинга протяженных объектов; в – формирования коммуникационной сети

Пусть конечное состояние группы  $\mathbf{x}(t_k)$  описывается матрицей  $\mathbf{D}_k$  дистанций  $d_{i,j}(t_k)$  ( $i, j = \overline{1, N}; i \neq j$ ) между роботами группы следующего вида:

$$\mathbf{D}_k = \begin{bmatrix} 0 & d_{1,2} & d_{1,3} & \cdots & d_{1,N} \\ - & 0 & d_{2,3} & \cdots & d_{2,N} \\ - & - & 0 & \ddots & \vdots \\ - & - & - & 0 & d_{N-1,N} \\ - & - & - & - & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В каждый текущий момент времени  $t_m$  робот  $r_i$  определяет дистанции  $d_{i,j}(t_m)$  до соседних с ним роботов группы и в случае, если эти дистанции отличаются от заданных, выбирает такое свое действие  $\mathbf{a}_i(t_m)$ , которое бы позволяло приблизить положение к заданному.

Рассмотрим взаимодействие роботов  $r_i$  и  $r_j$  как некоторую силу взаимодействия  $\mathbf{f}_{i,j}(t_m)$  между роботами. Значение этой силы определяется разностью между целевой и текущей дистанцией между роботами  $r_i$  и  $r_j$ :

$$|\mathbf{f}_{i,j}(t_m)| = |d_{i,j}(t_k) - d_{i,j}(t_m)|. \quad (2)$$

Направление  $\varphi_{i,j}(t_m)$  вектора  $\mathbf{f}_{i,j}(t_m)$  зависит от соотношения между целевой и текущей дистанциями между роботами  $r_i$  и  $r_j$  и направления  $\gamma_{i,j}(t_m)$  от робота  $r_i$  к роботу  $r_j$  (рис. 2):

$$\begin{cases} \varphi_{i,j}(t_m) = \gamma_{i,j}(t_m), d_{i,j}(t_k) > d_{i,j}(t_m), \\ \varphi_{i,j}(t_m) = \gamma_{i,j}(t_m) + \pi, d_{i,j}(t_k) < d_{i,j}(t_m). \end{cases} \quad (3)$$

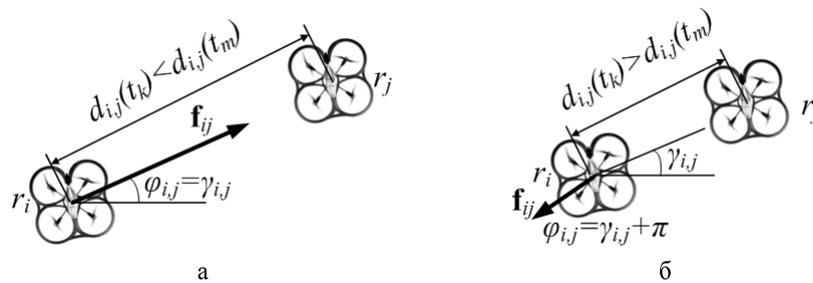


Рис. 2. Направление вектора  $\mathbf{f}_{i,j}(t_m)$

Действие  $\mathbf{a}_i(t_m)$  рассматривается как вектор перемещения и определяется суммой векторов сил взаимодействия  $\mathbf{f}_{i,j}(t_m)$  с другими роботами группы (рис. 3):

$$\mathbf{a}_i(t_m) = \sum_{j=1}^{N_i} \mathbf{f}_{i,j}(t_m), \tag{4}$$

где  $N_i$  – количество соседних роботов.

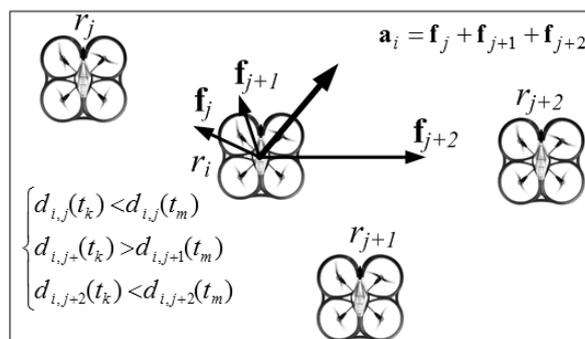


Рис. 3. Формирование вектора перемещения  $\mathbf{a}_i(t_m)$  робота  $r_i$

Алгоритм решения строевой задачи группой роботов можно представить следующим образом:

1. Инициализация  $\mathbf{x}(t_0) = [\mathbf{x}_1(t_0), \mathbf{x}_2(t_0), \dots, \mathbf{x}_N(t_0)]$ ,  $\mathbf{D}_k$ ,  $m \leftarrow 0$ .
2.  $\mathbf{D}_m \leftarrow \mathbf{x}(t_0)$ .
3. **while**  $\mathbf{D}_m \neq \mathbf{D}_k$  **do**.
4. **for**  $i=1$  **to**  $i=N$  **do**.
5.  $\mathbf{a}_i(t_m) \leftarrow \sum_{j=1}^{N_i} \mathbf{f}_{i,j}(t_m)$ .
6. **end for**.
7.  $\mathbf{D}_m \leftarrow P(\mathbf{x}(t_m))$ .
8.  $m \leftarrow m + 1$ .
9. **end while**.

Вычислительная сложность предложенного алгоритма не высока, поэтому алгоритм может быть легко реализован в реальном времени бортовыми вычислительными средствами даже миниатюрных БЛА. При этом численность группы роботов может быть достаточно большой.

В тех случаях, когда выполнение строевой задачи подразумевает последовательные перестроения, то есть промежуточные значения целевого положения  $\mathbf{x}(t_m)$  заранее определены, такая сложная строевая задача разбивается на подзадачи и решается как последовательность простых строевых задач по формированию перестроения из начального в конечное положение.

**Результаты исследований.** Для исследования предложенного подхода к решению строевых задач в группах роботов при децентрализованных стратегиях управления, а также полученного на основе этого подхода алгоритма, была написана программа компьютерного моделирования. При моделировании рассматривалась двумерная строевая задача с изначально заданным назначением. В качестве роботов, объектов моделирования, использована упрощенная модель полета квадрокоптеров.

При компьютерном моделировании было исследовано поведение роботов в группах различной численности при управлении с помощью предложенного алгоритма решения строевой задачи. На рис. 4 показаны фрагменты визуального поля программы моделирования в процессе построения группы из четырех коптеров. В качестве целевого положения роботов группы выбран квадрат, описанный матрицей дистанций:

$$\mathbf{D}_k = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 7,07 & 5 \\ & 0 & 5 & 7,07 \\ & & 0 & 5 \\ & & & 0 \end{bmatrix}.$$

При этом дистанции между роботами в конечный момент времени (рис. 4,в) описывались матрицей

$$\mathbf{D}(t_k) = \begin{bmatrix} 0 & 5,17 & 7,09 & 4,99 \\ & 0 & 5,01 & 7,09 \\ & & 0 & 5,17 \\ & & & 0 \end{bmatrix}.$$

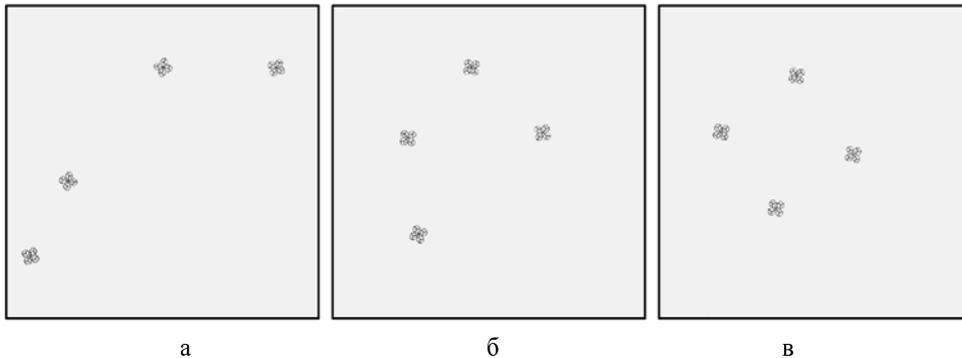


Рис. 4. Фрагменты экранной формы программы моделирования: а – начальное положение; б – промежуточное положение; в – конечное положение

При проведении программного моделирования задавалось различное число роботов и разные типы строев. Предложенный подход позволял достаточно быстро формировать заданный строй.

В настоящее время готовится натурный эксперимент по управлению группой из шести квадрокоптеров ArDrone при решении строевых задач в целях мониторинга.

**Заключение.** Практическая значимость исследования состоит в необходимости решения строевых задач в большинстве практических приложений групп роботов, таких как мониторинг удаленных и труднодоступных объектов, формирование мобильных коммуникационных сетей, формирование мобильных фазированных антенных решеток и ряда других применений.

Рассмотренный в статье подход к решению строевых задач в группах роботов представляется перспективным для управления группами мобильных роботов. На основании предложенного подхода разработан алгоритм управления группой роботов в среде без препятствий. Компьютерное моделирование показало работоспособность и эффективность предложенного подхода.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чувькин Б.В., Балыкова, А.Ю., Грачев А.Д. Паутина датчиков – новая концепция построения ТСО // Проблемы объектовой охраны. – 2004. – Вып. 4. – С. 11-20.
2. Casbeer D.W., Beard R.W., McLain T.W., Sai-Ming Li, Mehra R.K. Forest fire monitoring with multiple small UAVs // American Control Conference. – 2005. – Vol. 5. – P. 3530-3535.
3. Puri A., Valavanis K. P., Kontitsis M. Statistical Profile Generation for Traffic Monitoring Using Real-time UAV based Video Data // Control & Automation, 27-29 June 2007. – P. 1-6.
4. Purohit A., Zhang P. Controlled-Mobile Sensing Simulator for Indoor Fire Monitoring // the First IEEE Workshop on Design, Modeling and Evaluation of Cyber Physical Systems (CyPhy'11), Istanbul, Turkey, July 2011.
5. Kingston D., Beard R.W., Holt R.S. Decentralized Perimeter Surveillance Using a Team of UAVs // Robotics, IEEE Transactions. – 2008. – Vol. 24. – Issue 6. – P. 1394-1404.
6. Градецкий В.Г., Ермолов И.Л., Князьков И.Л., Соболевников С.А. Построение подвижных коммуникационных сетей на базе наземных автономных мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация и управления. – 2011. – № 11. – С. 27-32.
7. Chandraa R.S., Brehenyb S.H., D'Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles // Automatica. – Vol. 44. – Issue 8. – 2008. – P. 1976-1984.
8. Tonetti S., Hehn M., Lupashin S., D'Andrea R. Distributed Control of Antenna Array with Formation of UAVs // 18th IFAC World Congress, 2011.
9. Bishop A. A very relaxed control law for bearing-only triangular formation control // 18th IFAC World Congress. – 2011. – P. 5991-5998.
10. Kuhn H.W. The Hungarian Method for the assignment problem // Naval Research Logistics Quarterly. – 1955. – Vol. 2. – P. 83-97.
11. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 4. – С. 70-75.
12. Baykasoğlu A., Özbakır L., Tapkan P. Artificial Bee Colony Algorithm and Its Application to Generalized Assignment Problem // Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization. – 2007. – P. 113-144.
13. Duman E., Uysal M., Alkaya A.F. Migrating Birds Optimization: A New Meta-heuristic Approach and Its Application to the Quadratic Assignment Problem // Applications of Evolutionary Computation. Lecture Notes in Computer Science. – 2011. – Vol. 6624. – P. 254-263.
14. Подлипьян П.Е., Максимов Н.А. Многофазный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2011. – Вып. 43.

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

**Иванов Донат Яковлевич** – Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем им. А. В. Каляева Южного федерального университета; e-mail: donat.ivanov@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634315491; младший научный сотрудник.

**Ivanov Donat Yakovlevich** – Scientific-Research Institute Multiprocessing Computing Systems after Kalyaev of South Federal University; e-mail: donat.ivanov@gmail.com; 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634315491; research assistant.