

УДК 629.05

Некоторые вопросы интеллектуализации стратегий группового управления мобильными роботами для автоматизации задач в поисково - спасательных миссиях

Логунова Елена Александровна

Петрунина Елена Валерьевна (научный руководитель)

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Рассмотрены особенности организации управления группой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), существующие и перспективные методы организации взаимодействия БПЛА в составе одной группировки при выполнении различных задач в поисково-спасательных миссиях. Рассмотрены стратегии группового управления и алгоритмы роевого интеллекта, их применение при организации групп БПЛА. Приведена постановка задачи группового управления и схемы управления.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, БПЛА, роевое управление, дрон, децентрализованная (распределенная) стратегия управления

Введение. Преимущества группового применения роботов в задачах робототехники очевидны: больший радиус действия, достигаемый за счет рассредоточения роботов по всей рабочей зоне, и расширенный набор выполняемых функций, достигаемый за счет возможности установки на каждого робота индивидуальных исполнительных устройств, и, наконец, более высокая вероятность выполнения задания, достигаемая за счет возможности перераспределения целей между роботами группы в случае выхода из строя некоторых из них.

Поэтому такие сложные задачи робототехники, как масштабное исследование и зондирование поверхности других планет, сборка сложных конструкций в космосе и под водой, участие в боевых, поисково-спасательных операциях, разминирование территорий и т. п., могут эффективно решаться роботами только при их групповом взаимодействии.

При этом возникают новые проблемы группового управления и коммуникации, связанные с организацией группового взаимодействия роботов.

В поисково-спасательных миссиях, выполняемых группой БПЛА, можно автоматизировать следующие задачи управления:

- 1) планирование маршрута: автоматическое создание оптимальных маршрутов для БПЛА с учетом препятствий и зон поиска;
- 2) координация действий: синхронизация работы нескольких БПЛА для выполнения совместных задач, таких как охват больших территорий [1];
- 3) обработка данных: автоматический анализ данных с сенсоров для выявления потенциальных объектов поиска;
- 4) мониторинг состояния: автоматическое отслеживание состояния БПЛА, включая уровень заряда батареи и технические неисправности;

5) обмен информацией: автоматизированный обмен данными между БПЛА и наземными операторами для повышения эффективности операций [2];

6) адаптивное управление: изменение стратегии поиска в реальном времени на основе полученных данных и условий окружающей среды [3, 4];

7) обнаружение и идентификация объектов: использование алгоритмов машинного обучения для автоматического распознавания и классификации объектов на изображениях;

8) управление ресурсами: оптимизация распределения задач между БПЛА в зависимости от их возможностей и текущих условий [5].

Чтобы автоматизировать такого рода задачи, разработаны и продолжают разрабатываться методы роевого интеллекта и машинного обучения. Обзору данных методов и будет посвящена статья.

Под группой роботов принято понимать группу мобильных объектов, координирующих свои действия для достижения общей цели.

Проблемы группового управления группой объектов, объединенных одной целью, актуальны для многих сфер. Примеры приведены на рис. 1 [6].

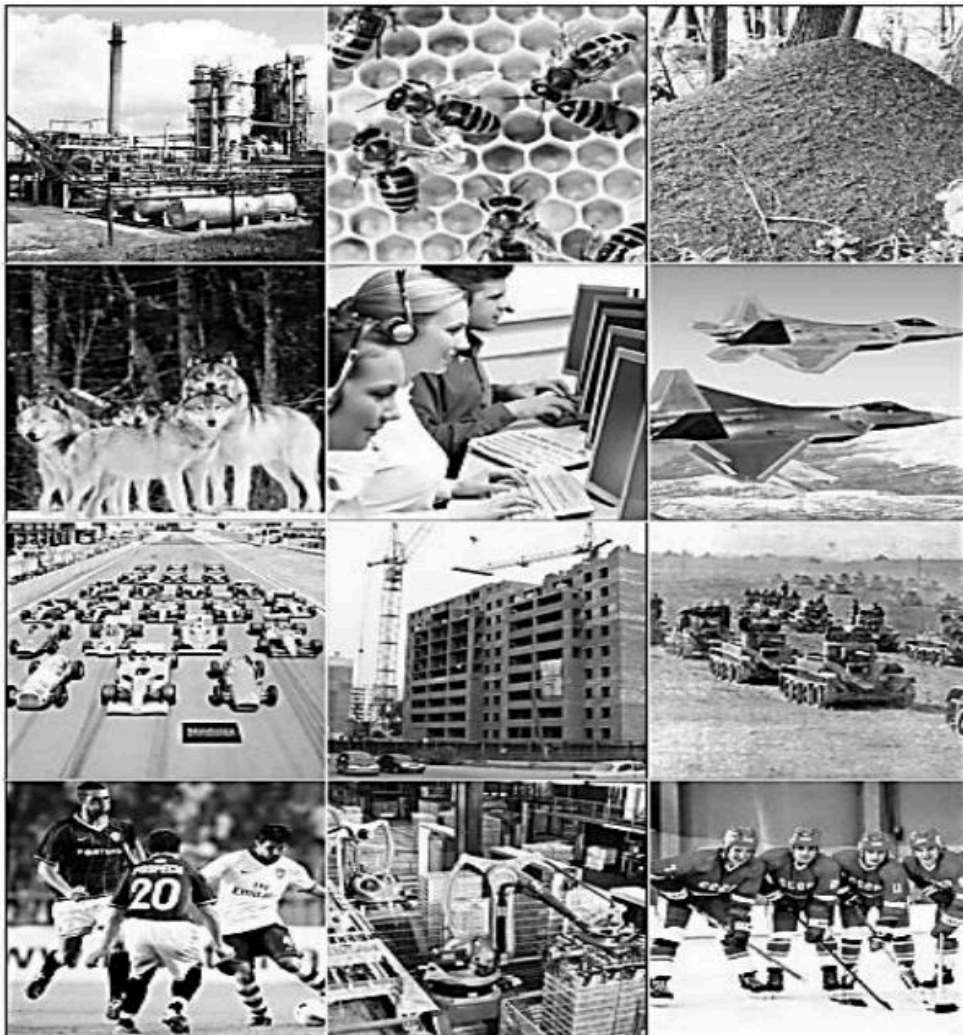


Рис. 1. Примеры задач группового управления в распределенных системах

Постановка задачи группового управления. Формальную постановку задачи группового управления распределенной системой можно сформулировать следующим образом. Пусть некоторая распределенная система R , состоящая из n подсистем (объектов) $R_i (i = \underline{1}, n)$ функционирует в среде E , причем каждый объект R_i может выполнять некоторый набор действий $A_i = \langle a_1^i, a_2^i, \dots, a_m^i \rangle$. Набор действий всех объектов $R_i \in R_i (i = \underline{1}, n)$ обозначим вектором $A = \langle A_1, A_2, \dots, A_n \rangle$. В результате выполнения действий объектами $R_i (i = \underline{1}, n)$ изменяются состояния как самой системы R , так и среды E , то есть

$$\dot{R} = f_1(A, R, E); \quad (1)$$

$$E = f_2(A, R, E). \quad (2)$$

Причем на состояние системы R и среды E , а также на действие объектов $R_i (i = \underline{1}, n)$ в той или иной ситуации налагаются ограничения вида

$$\phi(A, R, E) \leq 0; \quad (3)$$

$$\psi(A, R, E) \leq 0. \quad (4)$$

Состояние каждого объекта $R_i \in R_i (i = \underline{1}, n)$ в момент времени t описывается вектор-функцией $r_i(t) = [r_{i,1}(t), r_{i,2}(t), \dots, r_{i,h}(t)]^T$ (h — число параметров состояния i -го объекта). Состояние группы объектов задается вектором $R(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_n(t)]^T$. Состояние среды вокруг i -го объекта в момент времени t описывается вектором $e_i(t) = [e_{i,1}(t), e_{i,2}(t), \dots, e_{i,w}(t)]^T$ (w — число параметров состояния среды вокруг i -го объекта). Тогда состояние среды, в которой функционируют объекты рассматриваемой группы, при условии стационарности среды, в момент времени t описывается вектором

$$E(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)]^T. \quad (5)$$

Объекты и среда, взаимодействуя друг с другом, образуют систему «группа объектов — среда», под состоянием которой в момент времени t понимают состояние, описываемое парой $S_c = \langle R, E \rangle$. Множество различных состояний системы «группа объектов — среда» описывается точками $n(h + w)$ -мерного пространства состояний $\{S_c\}$. Под начальным и целевым (конечным) состояниями системы понимаются состояния $S_0 = \langle R_0, E_0 \rangle$, $S_k = \langle R_k, E_k \rangle$ соответственно. Необходимо определить такие действия $A_i (i = \underline{1}, n)$ всех объектов $R_i (i = \underline{1}, n)$, входящих в систему R , в результате выполнения которых исходная (начальная) ситуация $S_0 = \langle R_0, E_0 \rangle$ преобразуется в целевую (конечную) ситуацию $S_k = \langle R_k, E_k \rangle$, а также достигается экстремум некоторого функционала качества

$$Y = F(A_1, A_2, \dots, A_n, R, E). \quad (6)$$

Через соотношения (1)–(6) описываются все схемы стратегий управления.

Стратегии группового управления. Различные стратегии группового управления показаны на рис. 2 [7, 8].



Рис. 2. Стратегии группового управления

Централизованная единоличная стратегия группового управления предполагает наличие центрального устройства управления — командира, принимающего единоличные решения (рис. 3).

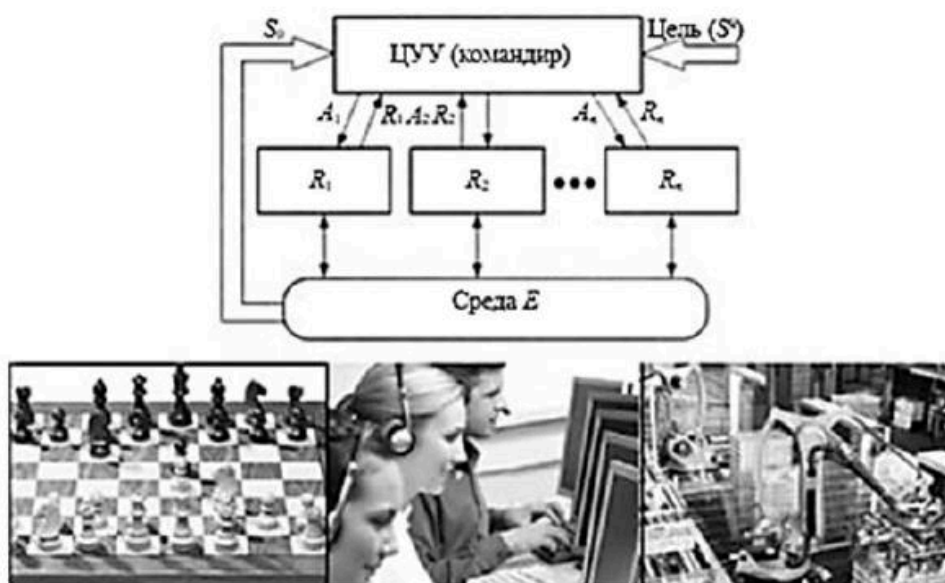


Рис. 3. Централизованная единоначальная стратегия группового управления

Центральная иерархическая стратегия группового управления допускает несколько центральных устройств управления различного уровня (рис. 4).

В централизованной системе группа БПЛА рассматривается как единый объект управления. Система управления включает центральное устройство и каналы связи с каждым роботом, который постоянно передает информацию о своем состоянии и окружающей среде. На основе этих данных система

формирует действия для достижения целей группы, которые затем передаются БПЛА для выполнения. Цикл повторяется с учетом новой информации до достижения общей цели [9].

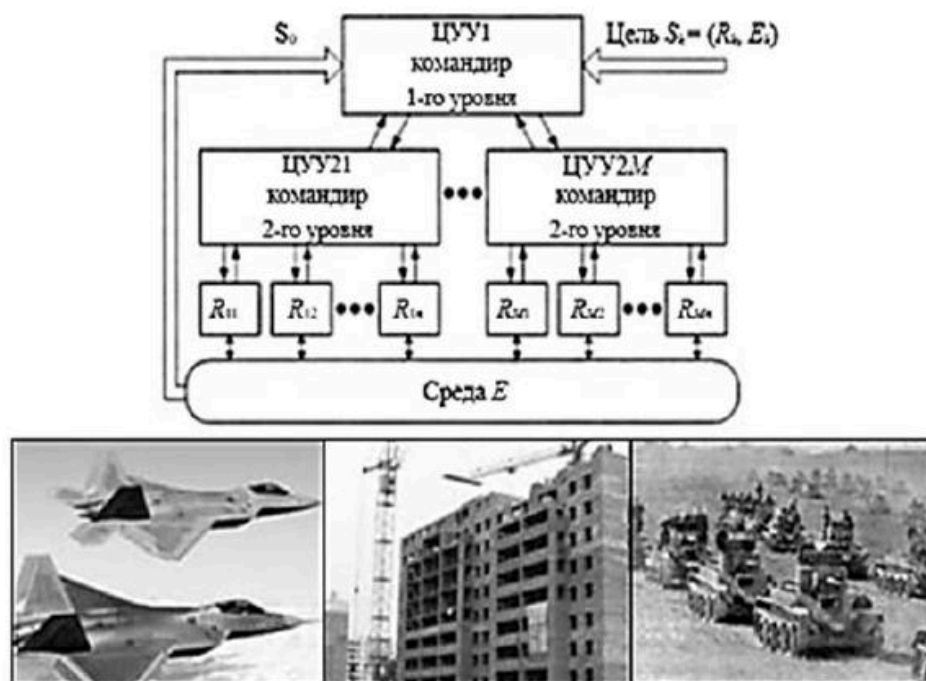


Рис. 4. Централизованная иерархическая стратегия группового управления

При централизованной организации БПЛА выполняют либо команды от системы, как при дистанционном управлении, либо разрабатывают действия для достижения промежуточных целей (рис. 5). Оператор может управлять полетом и обмениваться информацией с каждым БПЛА или только с «ведущим» аппаратом, который передает команды остальным (рис. 6).

Преимущества централизованных систем управления (СГУ) включают простоту организации на начальных этапах, возможность глобальной оптимизации задач и облегчение координации для предотвращения столкновений. Недостатки заключаются в сложности взаимодействия группы в динамичной среде, наличии единой точки отказа (выход из строя центрального контроллера приводит к сбоям всей системы), трудностях с масштабируемостью при добавлении новых дронов, высоких требованиях к пропускной способности связи и возможных задержках, которые могут вызвать ошибки управления.

Децентрализованная коллективная стратегия подразумевает отсутствие у группы центрального устройства управления (командира), но в то же время наличие некоторого канала обмена информацией между объектами группы, с помощью которого отдельные объекты могут координировать и оптимизировать свои действия для достижения общей цели (рис. 7).

Роевая стратегия наиболее эффективно может быть использована при управлении массовыми группами объектов. Данная стратегия подразумевает

наличие у каждого отдельного объекта роя ограниченного набора простейших действий, а также ограниченной зоны обмена информацией с ближайшими объектами, входящими в состав роя (рис. 8).

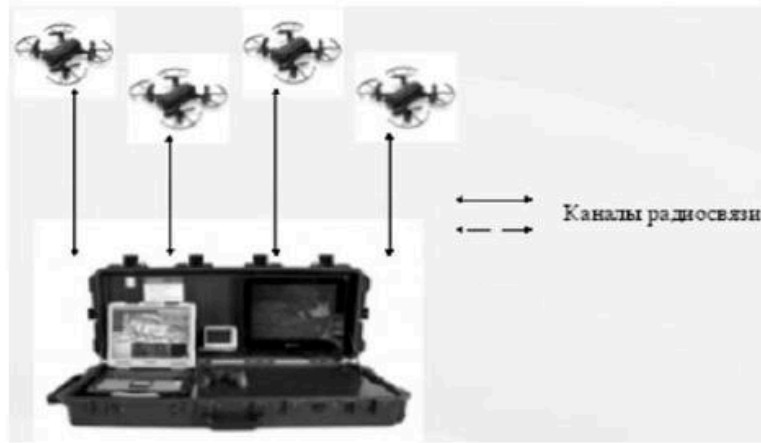


Рис. 5. Способ централизованного управления группой БПЛА

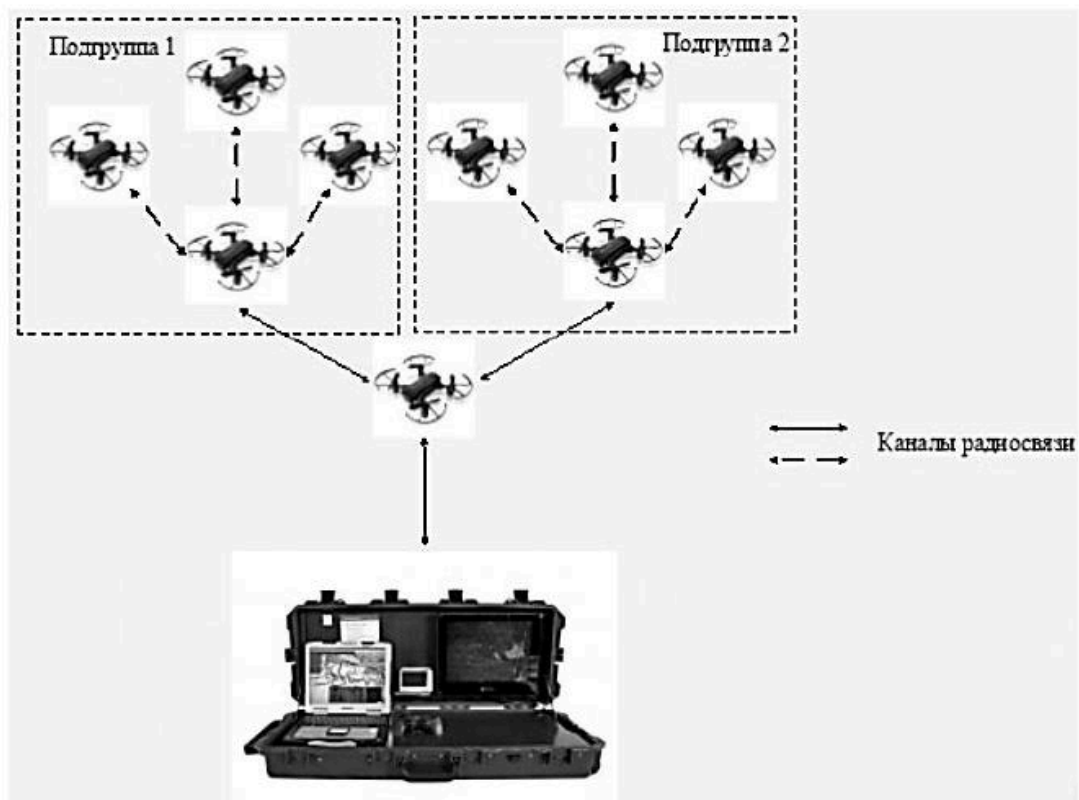


Рис. 6. Способ централизованного управления группой БПЛА с «ведущим»

В отличие от коллективной и роевой стратегий группового управления **стая́ная стратегия** подразумевает отсутствие не только командира в группе объектов, но и какого-либо прямого канала связи между ними. При этом объ-

екты, входящие в группу, могут получать только опосредованную информацию о действиях других объектов группы путем анализа изменений, происходящих в среде (рис. 9).

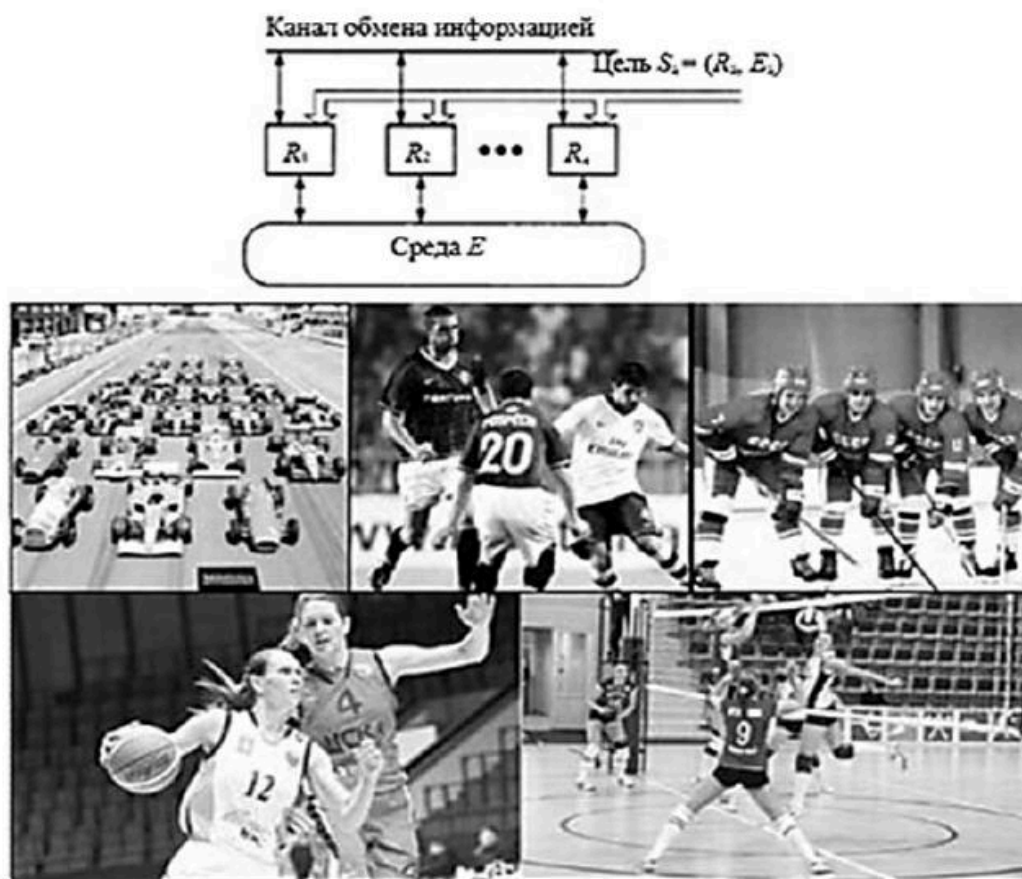


Рис. 7. Децентрализованная коллективная стратегия группового управления

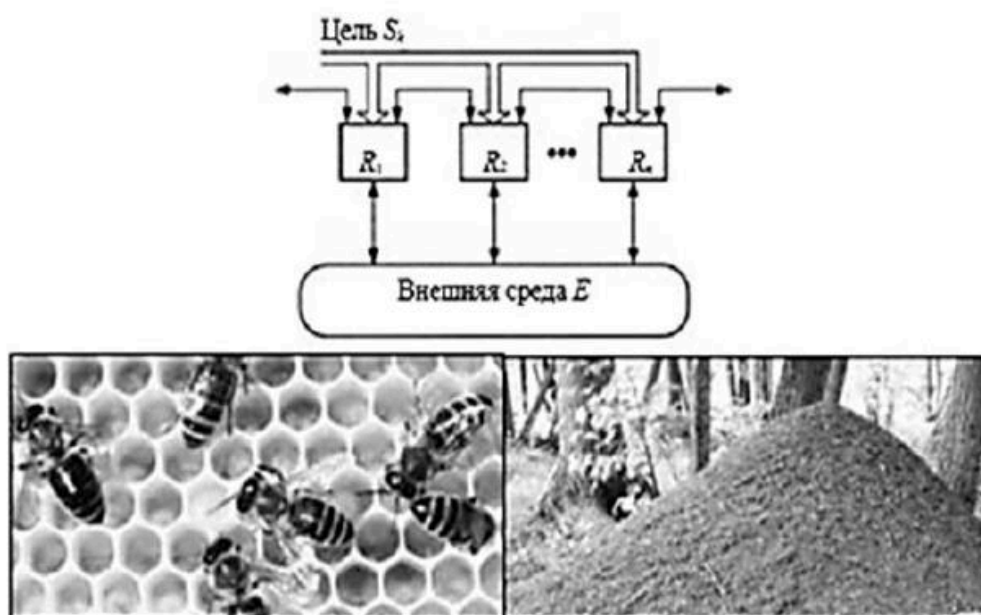


Рис. 8. Децентрализованная роевая стратегия группового управления

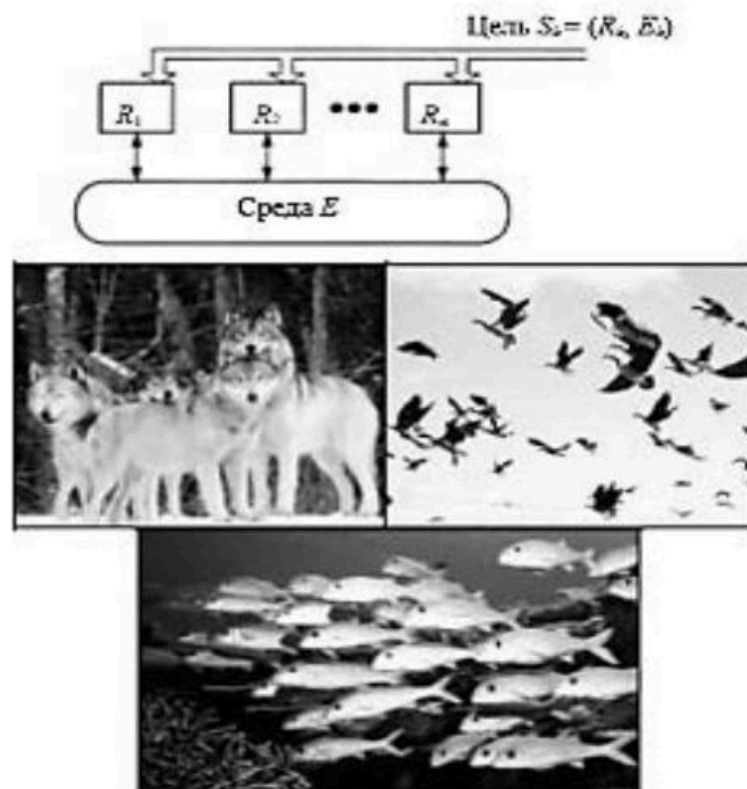


Рис. 9. Децентрализованная стайная стратегия группового управления

Децентрализованные (или распределенные) системы группового управления не имеют недостатков централизованных систем, так как каждый БПЛА принимает решения на основе локальной информации и взаимодействия с соседями, без необходимости центрального координатора (рис. 10–12).

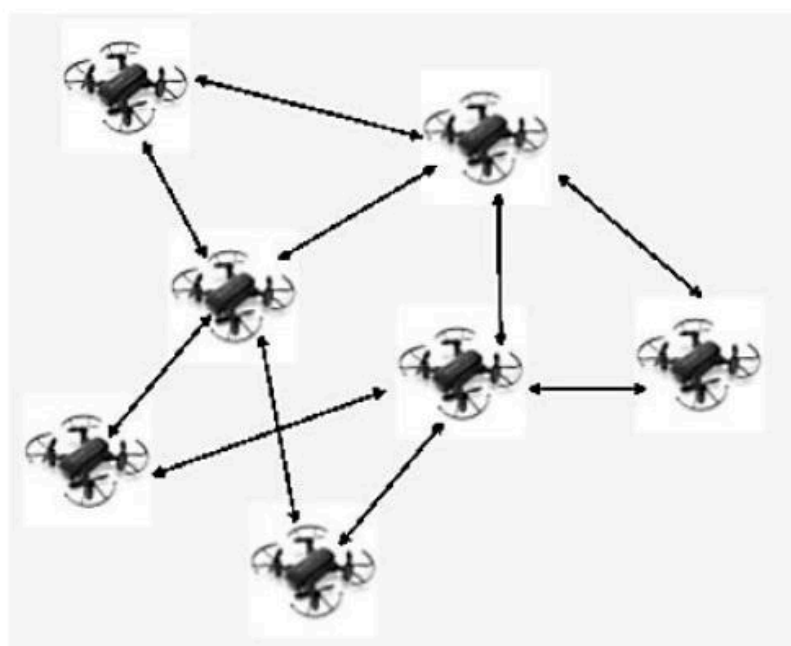


Рис. 10. Способ децентрализованного управления группой БПЛА

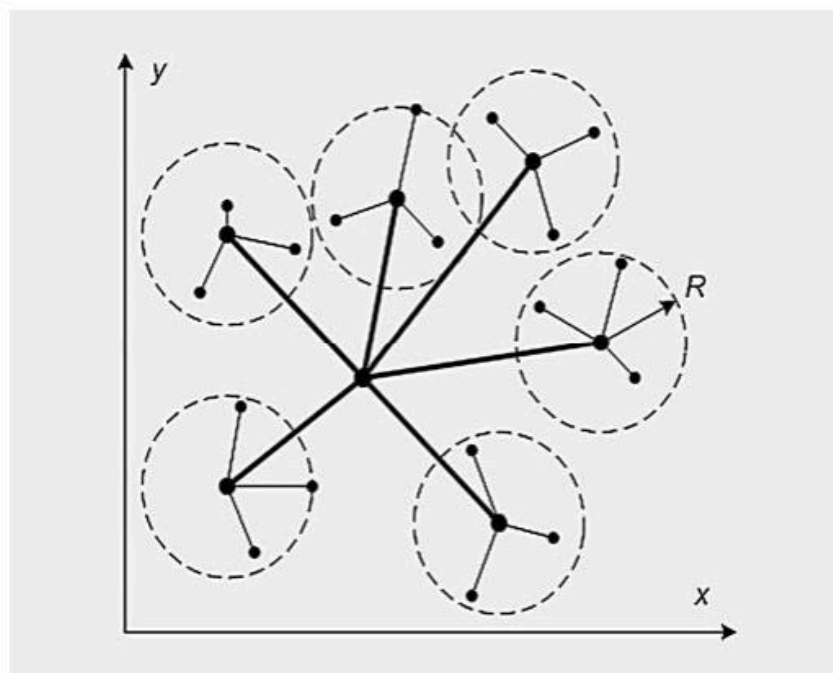


Рис. 11. Схема взаимодействия БЛА при децентрализованном (роевом) управлении

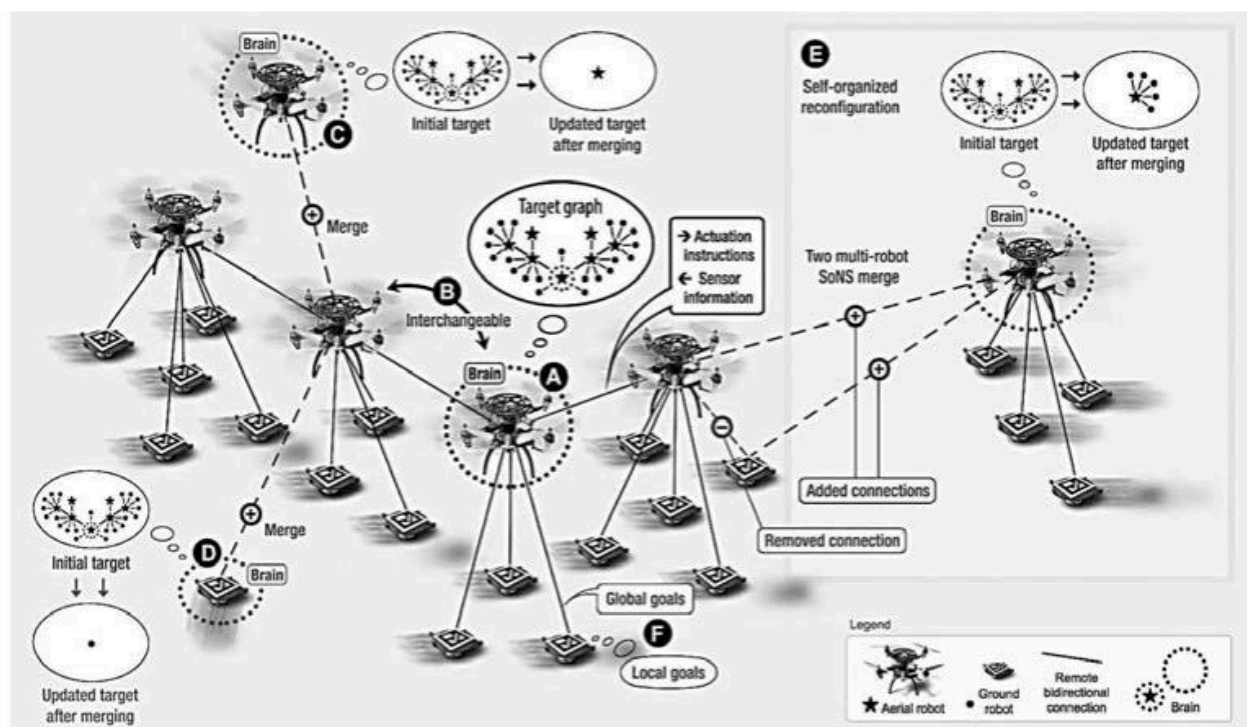


Рис. 12. Способ децентрализованного управления группой БПЛА

Принципы роя (по Крейгу Рейнольдсу):

- частицы роя стремятся не сталкиваться друг с другом;
- каждая частица с учетом предыстории своего движения отыскивает собственное лучшее положение в рое;
- каждая частица всегда стремится к лучшему положению всего роя.

Преимущества децентрализованных СГУ включают высокую надежность, устойчивость к отказам, легкость масштабирования, снижение требований к пропускной способности и адаптивность к изменениям. Недостатки связаны с сложностью реализации, менее точной координацией и возможными конфликтами в сложных средах.

Объединение преимуществ первых двух подходов привело к появлению **гибридного управления**, которое сочетает элементы централизованного иерархического и децентрализованного управления [10]. Некоторые задачи решаются централизованно, а другие — децентрализованно. Такой принцип используется для управления большими группами БПЛА, выполняющими одну крупную задачу, которую можно разбить на несколько подзадач. Если в группе есть подгруппы дронов для выполнения этих подзадач, иерархическая структура становится наиболее эффективной. Она может сочетать элементы централизованных и распределенных систем, обеспечивая комбинированный подход. В хорошо организованных средах, таких как авиашоу, может преобладать централизованный подход.

Преимущества: гибкость и адаптивность (возможность адаптировать систему к различным ситуациям) и оптимизация производительности (лучшие качества как централизованного, так и децентрализованного управления); баланс между точностью координации и устойчивостью к отказам. **Недостатки:** сложная реализация (требуется разработка механизмов для переключения между централизованным и децентрализованным управлением) и необходимость тщательной настройки и оптимизации параметров. Также наблюдается более сложная организация информационного обмена и высокими требованиями к вычислительным ресурсам для управления подгруппами. **Применение:** подходит для широкого спектра задач, где требуется баланс между надежностью и производительностью.

Заключение. Управление группами БПЛА — сложная и динамично развивающаяся область. Выбор стратегии управления зависит от конкретной задачи, размера группы БПЛА и условий эксплуатации. Дальнейшие исследования и разработки направлены на создание более автономных, интеллектуальных и надежных систем управления, способных решать широкий спектр задач в различных областях.

Правильно выбранная стратегия управления группой БПЛА позволяют наиболее эффективно использовать ресурсы (заряды аккумуляторов, временные ресурсы, аппаратные вычислительные ресурсы БПЛА и навесное оборудование) и оперативно распределять поступающие в режиме реального времени новые транспортные задачи между отдельными аппаратами группы непосредственно в процессе выполнения заданий.

Литература

- [1] Довгаль В.А., Довгаль Д.В. Анализ систем коммуникационного взаимодействия дронов, выполняющих поисковую миссию в составе группы. *Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки*, 2020, вып. 4 (271), с. 87–94.
- [2] Смирнов Д.А. Методы координации беспилотников для выполнения совместных задач. *Научные труды Специального института*, 2024, № 8 (3), с. 78–89.
- [3] Martinez J., Lee J. Collaboration in swarm robotics: Lessons for UAVs. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021, pp. 103–116.
- [4] Yang Y., Wang Y., Multi-agent coordination for UAV swarm: A game-theoretic approach. *Journal of Autonomous Vehicles and Systems*, 2021, vol. 5 (2), pp. 123–138.
- [5] Zhao H., Distributed control strategies for UAV formations. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, vol. 39 (4), pp. 989–1002.
- [6] Готлиб Б.М., Вакалюк А.А. *Введение в специальность «Мехатроника и робототехника»*. Екатеринбург, УрГУПС, 2012, 134 с.
- [7] Иванов С.А., Петров И.В., Стратегии управления группами беспилотных летательных аппаратов. *Авиационная техника и технологии*, 2023, № 15 (2), с. 45–57.
- [8] Мустаев А.Ф. Стратегии управления роем беспилотных летательных аппаратов. *Вестник науки*, 2019, т. 5, № 3 (12), с. 96–99.
- [9] Кузнецов А.Н. Системы управления многоцелевыми БПЛА: современные подходы. *Журнал аэрокосмических технологий*, 2022, № 10 (1), с. 22–34.
- [10] Лебедев И.В. Модели группового взаимодействия БПЛА в условиях неопределенности. *Труды конференции по автоматизации и информации*, 2023, с. 101–113.

Some issues related to the intellectualization of group management strategies for mobile robots to automate tasks in search and rescue missions

Logunova Elena Alexandrovna

Petrulina Elena Valerievna (*scientific advisor*)

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

This article discusses the features of the organization of the management of a group of unmanned aerial vehicles (UAVs), existing and promising methods of organizing the interaction of UAVs as part of one grouping when performing various tasks in search and rescue missions.

Keywords: unmanned aerial vehicles, UAVs, swarm control, drone