

УДК 519.8

doi: 10.53816/23061456_2025_7–8_93

АЛГОРИТМ КОЛЛЕКТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ ALGORITHM FOR COLLECTIVE DISTRIBUTION OF OBJECTIVES

Канд. техн. наук А.Е. Привалов, канд. техн. наук М.А. Александров, канд. техн. наук Е.Л. Яковлев

Ph.D. A.E. Privalov, Ph.D. M.A. Aleksandrov, Ph.D. E.L. Iakovlev

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В статье представлен алгоритм коллективного распределения задач в группировке БПЛА, предназначенных для мониторинга возникновения и развития чрезвычайных ситуаций природного и техногенного происхождения. В основе разработки лежит применение управляющего цифрового двойника, обеспечивающего принципиально новый подход к координации беспилотных систем. Суть предложенного решения заключается в создании многоагентной системы управления, где виртуальное пространство цифрового двойника становится платформой для генерации управляющих воздействий. Такой подход позволяет перенести сложные вычислительные процессы в виртуальную среду, сохраняя при этом оперативность реагирования всей группировки на динамично меняющиеся условия чрезвычайной ситуации, что особенно критично при ликвидации последствий катастроф.

Ключевые слова: управляющий цифровой двойник, коллективное распределение задач.

The article presents an algorithm for the collective distribution of targets by a group of UAVs designed to monitor the occurrence and development of emergencies of natural and man-made origin. The development is based on the use of a control digital twin, which provides a fundamentally new approach to coordinating unmanned systems. The essence of the proposed solution is to create a multi-agent control system, where the virtual space of the digital twin becomes a platform for generating control actions. This approach allows you to transfer complex computing processes to a virtual environment, while maintaining the responsiveness of the entire group to dynamically changing emergency conditions, which is especially critical in disaster recovery.

Keywords: control digital twin, collective distribution of objectives.

Введение

Современные технологии активно используют БПЛА и их групповые формации для решения сложных задач в условиях высокой неопределенности и динамично меняющейся обстановки. Особое значение имеет мониторинг, локализация и ликвидация чрезвычайных ситуаций (ЧС), для чего создаются как штатные, так и нештатные подразделения беспилотников.

Помимо совершенствования самих аппаратов, значительный прогресс достигнут в области группового управления, включая методы координации роев, групп и отдельных единиц БПЛА [8–10].

В настоящее время выделяют два принципиально разных подхода к организации управления:

– централизованный — контроль осуществляется через единый командный центр;

– децентрализованный — аппараты взаимодействуют автономно на основе локальных алгоритмов.

Эти методы находят применение в различных сценариях — от военных операций до гражданских миссий по ликвидации ЧС [4].

Основные особенности централизованного и децентрализованного управления группами БПЛА заключаются в том, что:

1. Централизованное управление, предполагает наличие удаленного командного центра, имеет два ключевых ограничения:

– неполнота информации (центр не обладает детальными данными о текущем состоянии каждого БПЛА и динамически изменяющейся обстановке);

– вычислительная сложность (с ростом числа аппаратов в группе задача оптимизации их действий становится экспоненциально сложнее, что приводит к задержкам в принятии решений. Это делает централизованный подход малоэффективным в условиях быстро меняющейся оперативной обстановки, например, при ликвидации ЧС).

2. Децентрализованное управление, при котором каждый БПЛА автономно принимает решения, направленные на достижение общей цели, обеспечивает:

– высокую скорость реакции на изменения среды;

– устойчивость системы к выходу отдельных элементов из строя.

Однако такой подход не гарантирует глобальной оптимальности решений и требует:

– согласованного взаимодействия между аппаратами;

– совместимых протоколов связи;

– единых алгоритмов управления.

Проблема совместимости

Современные БПЛА различаются по назначению, техническим характеристикам и программному обеспечению, что осложняет их совместную работу в децентрализованном режиме. Как следствие, для каждой новой задачи придется разрабатывать специализированный комплекс, что увеличивает временные и финансовые затраты [1].

В статье предлагается гибридный подход, сочетающий преимущества обоих методов. Управ-

ляющие воздействия формируются децентрализованно, но в виртуальной среде цифрового двойника группы БПЛА. Это позволяет сохранить гибкость и скорость реакции децентрализованных систем, исключив необходимость сложной организации взаимодействия между реальными аппаратами [3].

Такой метод особенно актуален в условиях активного развития технологий IoT и высокоскоростной передачи данных, когда традиционное централизованное управление не успевает адаптироваться к быстро меняющейся обстановке [2].

Постановка задачи

Исходные данные.

1. Объект управления — совокупность БПЛА различного целевого назначения (I — количество БПЛА):

$$R = \{r_i | i = \overline{1, I}\}.$$

Каждый БПЛА описывается кортежем:

$$r_i = \left\langle X, Y, Z, U, \phi, \psi \left| \begin{array}{l} \phi: X \times Y \times Z \times U \times T \rightarrow Z, \\ \psi: X \times Y \times Z \times U \times T \rightarrow Y \end{array} \right. \right\rangle_i.$$

где X — множество входных воздействий;

Y — множество выходных воздействий;

Z — множество внутренних состояний;

U — множество управляющих воздействий;

ϕ — функция переходов;

ψ — функция выходов.

2. Перечень задач БПЛА:

$$G = \{g_j | j = \overline{1, J}\}.$$

Примером задач БПЛА могут служить список объектов или районов наблюдения для БПЛА мониторинга, обслуживаемые области для сельскохозяйственных БПЛА и т.п. По своей сути БПЛА является системой обслуживания, а множество G — входным потоком заявок.

Требуется определить множество U^* управляющих воздействий на объект управления:

$$U^* = \arg \operatorname{extr}_U \chi(G, R) | U^* \subset U, \quad (1)$$

где χ — целевая функция БПЛА.

Концепция управляющего цифрового двойника

Современные достижения в сфере информационных технологий, компьютерного моделирования и интернета вещей создают новые перспективы для применения цифровых двойников в управлении сложными динамическими системами.

Цифровой двойник (ЦД) представляет собой синхронизированную с физическим объектом виртуальную модель, связанную с ним двусторонними информационными каналами [6]. Ключевые характеристики цифрового двойника включают:

- способность выступать виртуальным аналогом объекта при планировании и моделировании;
- постоянную синхронизацию состояния с физическим прототипом;
- возможность автономного функционирования относительно реального объекта.

В контексте управления сложными техническими системами, такими как группы БПЛА, традиционные подходы требуют значительного усложнения бортовых систем управления.

В качестве инновационного решения предлагается концепция управляющего цифрового двойника (УЦД), предполагающая:

- формирование управляющих воздействий в виртуальном пространстве цифровой модели;
- синхронную передачу управляющих команд на физические объекты.

Такой подход позволяет сохранить все преимущества цифрового двойника, одновременно решая задачи управления сложными системами. Визуальное представление концепции УЦД приведено на рис. 1.

Основное преимущество данного подхода заключается в переносе вычислительной нагрузки с бортовых систем на виртуальную платформу, что значительно упрощает архитектуру самих БПЛА и повышает гибкость системы управления в целом [5].

Преимущества и ограничения управляющих цифровых двойников (УЦД) в системах управления БПЛА. Ключевые преимущества применения УЦД включают:

- минимизацию неопределенности при принятии решений благодаря использованию актуальной цифровой модели, постоянно синхронизируемой с физическим объектом;



Рис. 1. Концепция управляющего цифрового двойника

– возможность создания интегрированных систем управления на основе децентрализованных принципов, что значительно повышает скорость реагирования;

– оптимизацию бортовых систем управления БПЛА за счет переноса сложных вычислений на виртуальную платформу.

Однако внедрение УЦД имеет существенное ограничение: для эффективной работы требуется стабильный канал связи между цифровым двойником и реальным объектом. Нарушение этого условия может привести к рассогласованию системы и снижению эффективности управления.

Таким образом, УЦД открывают новые возможности для управления группами БПЛА, но их применение требует надежной инфраструктуры передачи данных.

Модель системы управления роём БПЛА как киберфизической системы с применением управляющего цифрового двойника

Согласно разрабатываемой модели, совокупность беспилотных летательных аппаратов (группа или роё) представляет собой пространственно распределённую киберфизическую систему с элементами дистанционного управления [7].

В данной системе каждый БПЛА функционирует как автономный интеллектуальный агент, обладающий:

– встроенной системой управления;
– способностью самостоятельно выбирать оптимальные методы выполнения поставленных задач.

Система в целом характеризуется:

– распределённой архитектурой;
– децентрализованным принципом управления;
– возможностью адаптивного поведения в изменяющихся условиях;

Ключевые особенности:

– сочетание физических объектов (БПЛА) с цифровыми компонентами управления;

– наличие механизмов межмашинного взаимодействия;

– поддержка коллективного принятия решений.

Преимущества подхода:

– повышенная отказоустойчивость системы;
– гибкость при изменении оперативной обстановки;

– масштабируемость групповых конфигураций.

Такая трактовка позволяет рассматривать роё БПЛА как единую киберфизическую систему, где каждый элемент сохраняет автономность, но при этом участвует в достижении общей цели.

Ключевые элементы концепции изображены на рис. 2:

Цифровая часть (УЦД роё БПЛА):

– два типа агентов: управления БПЛА и управления задачей;

– блоки планирования ресурсов и задач;

– блоки мониторинга и оценки;

– виртуальная модель БПЛА и среды;

– система передачи данных.

Физическая часть (реальный БПЛА (роё БПЛА):

– система управления;

– датчики и исполнительные механизмы;

– бортовая аппаратура.

Потоки данных:

– нисходящие (управляющие команды);

– восходящие (сенсорные данные и обратная связь);

– горизонтальные (координация между агентами).

Управляющий ЦД БПЛА определяется кортежем

$$Q = \langle R^m, A^R, A^G \rangle.$$

Множество

$$R^m = \{r_i^m | i = \overline{1, I}\}$$

является множеством агентов-моделей БПЛА, синхронизированных с ними через систему передачи данных

$$r_i^m = \left\langle X^m, Y^m, Z^m, U, \phi^m, \psi^m \left| \begin{array}{l} \phi^m : X^m \times Y^m \times Z^m \times U \times T \rightarrow Z^m, \\ \psi^m : X^m \times Y^m \times Z^m \times U \times T \rightarrow Y^m \end{array} \right. \right\rangle_i.$$

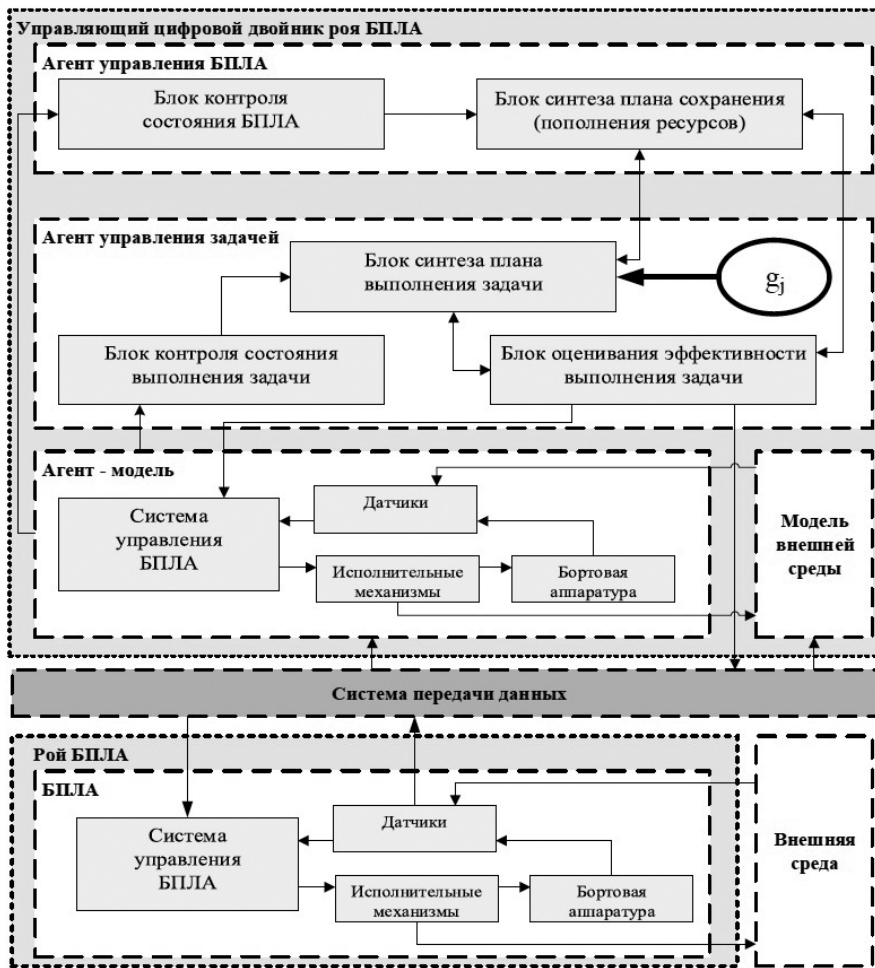


Рис. 2. Структурная схема системы управления БПЛА с цифровым двойником

Здесь верхний индекс t означает модель соответствующего элемента. Каждый агент-модель представляет собой гомоморфный образ соответствующего ему БПЛА. Следовательно, на множестве R определена вектор-функция

$$\mu = \{ \mu_i : r_i \rightarrow r_i^m \mid i = \overline{1, I} \}.$$

Множество

$$A^R = \{ a_i^R \mid i = \overline{1, I} \}$$

является множеством агентов управления БПЛА, цель которых состоит в сохранении и умножении возобновляемых и не возобновляемых ресурсов БПЛА. С этой целью агент на основании анализа состояния систем БПЛА составляет план восполнению ресурсов БПЛА U_i^R (сохранение необходимой энерговооруженности для возвращения в точку пополнения и восстановления).

Множество

$$A^G = \{ a_j^G \mid j = \overline{1, J} \}$$

представляет собой множество агентов управления задачами, целью которых является использование ресурсов БПЛА для выполнения стоящих перед ними задач. С этой целью каждый агент осуществляет синтез плана выполнения задачи U_j^G , который совместно с планами сохранения и восполнения ресурсов, привлекаемых к выполнению задачи поступают на блок оценивания эффективности выполнения задачи. На основе вышеизложенного разработан алгоритм коллективного распределения задач рис. 3.

При достижении показателями выполнения задачи заданного критерия (1) решение синхронно передается:

- на соответствующие агенты-модели в цифровом двойнике;

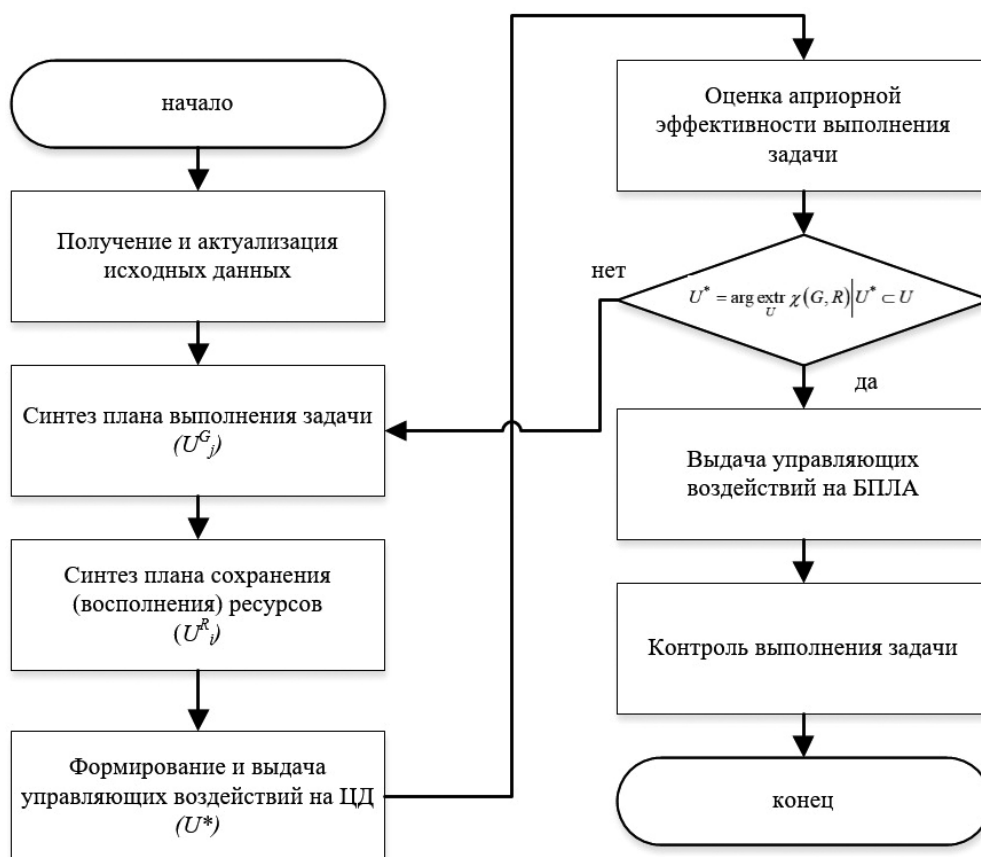


Рис. 3. Блок-схема алгоритма коллективного распределения задач

– на физические БПЛА через систему передачи данных.

При этом управляющие агенты параллельно выполняют непрерывный мониторинг состояния выполнения задачи и генерацию корректирующих управляющих сигналов при отклонениях, а система поддерживает динамическое равновесие за счет:

- взаимодействия двух типов управляющих агентов;
- баланса их противоположно направленных функций;
- автоматической компенсации возмущающих воздействий.

Описанное взаимодействие обеспечивает:

- стабильность системы управления;
- адаптивность к изменяющимся условиям;
- сохранение заданных характеристик функционирования.

Такой подход гарантирует устойчивость системы при сохранении ее оперативной гибкости, что особенно важно в условиях неопределенности внешней среды.

Заключение

Представленная концепция предлагает принципиально новое решение для организации группового управления разнородными БПЛА, обладающими различным функциональным назначением, отличающимися характеристиками систем управления, разнотипными каналами связи.

Ключевые преимущества алгоритма:

- 1) универсальность групповой структуры:
 - возможность интеграции в единый рой БПЛА разных типов и модификаций;
 - гибкая адаптация состава группы под конкретную задачу;
 - простое добавление новых специализированных модулей;
- 2) децентрализованное управление без ограничений:
 - реализация всех преимуществ многоагентных систем;
 - отсутствие необходимости прямого взаимодействия между физическими БПЛА;

– перенос всех координационных функций в виртуальное пространство УЦД;

3) оптимизация бортовых систем:

– упрощение архитектуры управления каждого отдельного БПЛА;

– сведение задач бортовой системы только к локальному управлению;

– повышение надежности за счет минимизации сложных вычислений на борту;

4) повышенная живучесть в экстремальных условиях:

– эффективная работа в агрессивных средах (ЧС, зоны поражения);

– устойчивость к потере отдельных элементов группы;

– быстрое восстановление функциональности после повреждений.

В технологической основе решения лежат виртуальная координация через цифрового двойника (устраняет проблему совместимости разнородных систем), динамическое перераспределение задач при изменении состава группы и автоматическая адаптация к изменяющимся внешним условиям.

Данный подход особенно актуален для:

– ликвидации последствий ЧС;

– проведения сложных поисково-спасательных операций;

– работы в условиях радиоэлектронного противодействия;

– миссий с высоким риском потери БПЛА.

Основное преимущество — сочетание гибкости гетерогенных систем с надежностью централизованного управления, достигаемое за счет переноса ключевых функций в виртуальную среду цифрового двойника.

Список источников

1. Муслимов Т.З. Методы и алгоритмы группового управления беспилотными летательными аппаратами самолетного типа: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Муслимов Т.З., 2020. 137 с.

2. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. Москва: Издательская фир-

ма «Физико-математическая литература», 2009. 280 с.

3. Потюпкин А.Ю., Пантелеймонов И.Н., Тимофеев Ю.А., Волков С.А. Управление многоспутниковыми орбитальными группировками // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7, № 3. С. 61–70.

4. Абросимов В.К. Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов: монография. М.: Наука, 2017. 304 с.

5. Бычков И.В., Давыдов А.В., Нагул Н.В., Ульянов С.А. Событийный подход к многорежимному управлению группировкой подводных роботов в обследовательской миссии // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23, № 2. С. 3–19.

6. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 16 с.

7. ПНСТ 417–2020 Система киберфизическая. Термины и определения / разработ. АО «ВНИИС» и АО «РВК»; утв. и введен в действие 23 июля 2020 г. М.: Стандартиформ, 2020. 8 с.

8. Джавадов Н.Г., Агаев Ф.Г., Гусейнов Г.А., Зульфугарлы П.Р. Вопросы оценки выполнимости задач, поставленных перед беспилотными летательными аппаратами // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/10.34759/trd-2022-127-20> (дата обращения: 12.05.2005).

9. Дилан А.Г. Оптимизация многоцикловой системы дистанционного зондирования с применением БПЛА // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/10.34759/trd-2023-129-22> (дата обращения: 12.05.2005).

10. Ненашев В.А., Афанасьева И.В., Залищук А.А., Григоров М.Ю., Морозов А.В. Формирование трехмерных моделей местности на основе лидарной съемки для выявления структурных изменений земной поверхности // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/10.34759/trd-2023-131-15> (дата обращения: 12.05.2005).

Resources

1. Muslimov T.Z. Methods and algorithms of group control of unmanned aerial vehicles of aircraft type: specialty 05.13.01 «System analysis, management and information processing (by industry)»: dissertation for the degree of candidate of technical Sciences / Muslimov T.Z., 2020. 137 p.

2. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. Models and algorithms of collective control in groups of robots. Moscow: Physico-mathematical literature, 2009. 280 p.
3. Potyupkin A.Yu., Panteleimonov I.N., Timofeev Yu.A., Volkov S.A. Management of multi-satellite orbital groupings // Rocket and space instrumentation and information systems. 2020. Vol. 7. No 3. Pp. 61–70.
4. Abrosimov V.K. Collectives of intelligent aircraft: a monograph. Moscow: Nauka Publishing House, 2017. 304 p.
5. Bychkov I.V., Davydov A.V., Nagul N.V., Ulyanov S.A. Event-based approach to multi-mode control of a group of underwater robots in a survey mission. Computational Technologies. 2018. Vol. 23. No 2. Pp. 3–19.
6. GOST R 57700.37–2021. Computer models and modeling. Digital counterparts of products. General provisions. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. 16 p.
7. PNST 417–2020 Cyberphysical system. Terms and definitions / developed JSC VNIIS and JSC RVC.; approved on July 23, 2020. Moscow: Standartinform, 2020. 8 p.
8. Javadov N.G., Agaev F.G., Huseynov G.A., Zulfugarly P.R. Issues of assessing the feasibility of tasks assigned to unmanned aerial vehicles // Proceedings of MAY 2022. No 127. URL: <https://trudymai.ru/10.34759/trd-2022-127-20> (date of access: 12.05.2025).
9. Dylan A.G. Optimization of a multi-cycle remote sensing system using UAVs // Proceedings of the MAI. 2023. No 129. URL: <https://trudymai.ru/10.34759/trd-2023-129-22> (accessed: 12.05.2025).
10. Nenashev V.A., Afanasyeva I.V., Zalishchuk A.A., Grigorov M.Yu., Morozov A.V. Formation of three-dimensional terrain models based on lidar surveys to identify structural changes in the Earth's surface // Proceedings of MAI. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/10.34759/trd-2023-131-15> (date of access: 12.05.2025).