

УДК 681.518.3  
doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-3

## АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. Г. Избасов<sup>1</sup>, П. Д. Головин<sup>2</sup>, Н. К. Юрков<sup>3</sup>, Н. В. Горячев<sup>4</sup>, И. И. Кочегаров<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Военный институт сил воздушной обороны, Актобе, Республика Казахстан

<sup>2,3,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> iag1973@mail.ru, <sup>2</sup> GPD75@yandex.ru, <sup>3</sup> yurkov\_NK@mail.ru, <sup>4</sup> ra4foc@yandex.ru, <sup>5</sup> kipra@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Формализуются задачи интеллектуального управления группой беспилотных летательных аппаратов. Оценены задачи интеллектуального управления группой БПЛА-агентов. В парадигме мультиагентного подхода детально раскрывается алгоритм функционирования информационно-измерительной системы управления группой беспилотных летательных аппаратов. *Материалы и методы.* В ходе анализа известных подходов к управлению группой летательных аппаратов обоснованы их недостатки и выделены преимущества мультиагентного управления с представлением каждого объекта управления в виде функционально самодостаточного агента. Дан алгоритм работы мультиагентной системы интеллектуального управления группой БПЛА. *Результаты.* Алгоритм обеспечивает повышение уровня автономной самоорганизации при выполнении как запланированных, так и незапланированных задач с обеспечением периодического целераспределения. *Выводы.* Сформулированы этапы выполнения задач интеллектуального управления группой БПЛА-агентов с учетом влияющих факторов, позволяющих эффективно скоординировать действия аппаратов внутри группы. Разработан алгоритм работы мультиагентной системы управления группой БПЛА-агентов с учетом аппаратов с ограниченными тактико-техническими характеристиками, обеспечивающий автономность группы при периодическом распределении целей для выполнения запланированных задач.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная система, управление, летательный аппарат, мультиагентный подход

**Для цитирования:** Избасов А. Г., Головин П. Д., Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кочегаров И. И. Алгоритмическое обеспечение мультиагентной информационно-измерительной системы управления группой беспилотных летательных аппаратов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 25–31. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-3

## ALGORITHMIC SUPPORT OF A MULTI-AGENT INFORMATION AND MEASUREMENT CONTROL SYSTEM FOR A GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

A.G. Izbasov<sup>1</sup>, P.D. Golovin<sup>2</sup>, N.K. Yurkov<sup>3</sup>, N.V. Goryachev<sup>4</sup>, I.I. Kochegarov<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Military Institute of the Air Defense Forces of Aktobe, Aktobe, Republic of Kazakhstan

<sup>2,3,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> iag1973@mail.ru, <sup>2</sup> GPD75@yandex.ru, <sup>3</sup> yurkov\_NK@mail.ru, <sup>4</sup> ra4foc@yandex.ru, <sup>5</sup> kipra@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The paper formalizes the tasks of intelligent control of a group of unmanned aerial vehicles. The tasks of intellectual management of a group of UAV agents are evaluated. In the paradigm of the multi-agent approach, the algorithm of functioning of the information and measurement control system for a group of unmanned aerial vehicles is disclosed in detail. *Materials and methods.* During the analysis of known approaches to the management of a group of flight vehicles, their disadvantages are substantiated and the advantages of multi-agent management with the representation of each control object in the form of a functionally self-sufficient agent are highlighted. The algorithm of operation of a multi-agent intelligent control system for a group of UAVs is given. *Results.* The algorithm provides an increase in the level of autonomous self-organization when performing both planned and unplanned tasks with periodic target allocation. *Conclusions.* The stages of performing the tasks of intelligent control of a group of UAV agents are

formulated, taking into account the influencing factors that make it possible to effectively coordinate the actions of the devices within the group. An algorithm has been developed for the operation of a multi-agent control system for a group of UAV agents, taking into account devices with limited performance characteristics, ensuring the autonomy of the group with periodic distribution of goals to perform planned tasks.

**Keywords:** information and measurement system, control, aircraft, multi-agent approach

**For citation:** Izbasov A.G., Golovin P.D., Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kochegarov I.I. Algorithmic support of a multi-agent information and measurement control system for a group of unmanned aerial vehicles. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):25–31. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-3

В России в настоящее время проводятся проектирование, разработка и внедрение беспилотных систем в различных отраслях народного хозяйства, экологического, энергетического и промышленного мониторинга, антитеррористического контроля безопасности, участия в аварийно-спасательных мероприятиях на местах катастроф и т.д. Одним из главных достоинств непилотируемых аппаратов является исключение роли человека-оператора во время выполнения жизненно опасных задач.

Однако не все поставленные задачи могут быть решены одним БПЛА в силу его ограниченных возможностей. Как показывает практика, существуют такие задачи, которые могут эффективно решаться только с помощью группы БПЛА, действующей по заранее разработанному алгоритму. Следует отметить, что при использовании группового применения БПЛА повышается оперативность принятия решений, что сказывается на уменьшении времени выполнения и повышении вероятности выполнения задач.

Анализ современной литературы показал, что в разрабатываемых системах контроля и управления для группы БПЛА отсутствует самостоятельная постановка новой задачи, которая не позволит оперативно проанализировать и решить несколько сценариев ее выполнения. Типичные примеры таких ситуаций: выход из строя части аппаратов из группы, изменение приоритетов и координат целей, критериев принятия решения и т.д. Эффективность таких систем уменьшится при увеличении фактора априорной неопределенности вследствие невозможности адаптации к внешним переменам, например, окружающей среды. К тому же дальнейшее совершенствование схем контроля и управления традиционных систем является время- и ресурсозатратным процессом и требует профессиональных специалистов [1].

Для решения таких проблем следует воспользоваться технологией мультиагентов. В ее основе понятия «агента» – программное обеспечение (ПО), которое способно самостоятельно контролировать, управлять и принимать решения в группе в зависимости от текущей ситуации, одновременно взаимодействуя со всеми аппаратами в группе. При этом выход из строя или потеря одного или нескольких БПЛА из группы никак не отразится на выполнении поставленной задачи для всей группы.

В кортеже с технологией искусственного интеллекта (ИИ) реализуется возможность умения обозначать новые более приоритетные цели, а также способность представлять и перераспределять между агентами пути приближения к ней для выполнения поставленной задачи.

Следует выделить следующие отличительные черты при использовании группы интеллектуальных БПЛА-агентов:

- автоматическое приспособление к неопределенным и меняющимся условиям окружающей среды;
- целенаправленное и согласованное распределение действий между БПЛА-агентами группы для выполнения запланированных заданий;
- активное коллективное поведение, ориентированное для самостоятельного решения как общей, так и частной задач.

### *Задачи интеллектуального управления группой БПЛА-агентов*

В теории автономного поведения группы БПЛА интеллектуальное управление поведением отдельных устройств играет решающее значение в обеспечении согласованных действий внутри группы для выполнения запланированных задач.

Если для простых задач имеется возможность реализации алгоритмов интеллектуального управления классическими методами, то для сложного задания необходимо обеспечить реализацию действий с распределением функций для коллективного взаимодействия внутри группы с помощью ИИ [2].

Для мультиагентной системы управления группой БПЛА-агентов предлагается разбить выполнение задачи интеллектуального управления на три этапа. Каждый из трех предлагаемых этапов выполнения может быть подвергнут воздействию влияющих фактов, показанных на рис. 1.



Рис. 1. Этапы выполнения задач интеллектуального управления группой БПЛА-агентов

Каждый этап выполнения задач может быть реализован как при использовании традиционных подходов, так и при использовании технологий нейронных сетей.

### ***Алгоритм работы мультиагентной системы интеллектуального управления группой БПЛА***

Для сохранения высокой эффективности группового применения БПЛА мультиагентная система управления должна иметь самоорганизующуюся структуру, способную функционировать в автономном режиме и адаптироваться к любой обстановке, при координации совместных действий между агентами в группе.

Для создания мультиагентной системы интеллектуального управления группой БПЛА-агентов предлагается использовать методы и теорию мультиагентных систем. При таком подходе построения распределение действий в ходе выполнения задачи между БПЛА-агентами с учетом приоритетов, потерь и технического состояния возлагается на бортовую аппаратуру управления агента (БАУА). БАУА каждого аппарата объединена в единую информационно-программную сеть, обеспечивающую целенаправленную работу всей группы.

Преимущества мультиагентной системы управления по сравнению с другими способами реализации совместных действий в группе:

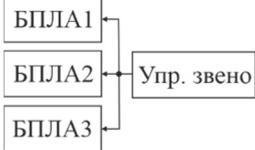
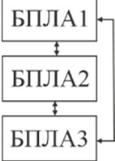
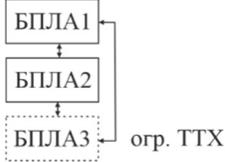
- 1) управление действиями всех БПЛА-агентов осуществляется через синхронизированный интервал времени;
- 2) распределение и перераспределение задач между БПЛА-агентами с учетом минимального пути до цели, приоритетов при наличии аппаратов с ограниченными тактико-техническими характеристиками (ТТХ);
- 3) формирование и переформирование эшелонированного строя для избегания столкновений внутри группы;
- 4) высокая вероятность выполнения задачи.

При этом основным достоинством мультиагентной системы управления является возможность обмена информацией с любым участником группы [3].

В табл. 1 приведен сравнительный анализ существующих систем управления для группы БПЛА.

Таблица 1

Сравнительный анализ систем управления группой БПЛА

Название	Графическое представление	Источник	Отличительные характеристики
Централизованная		[2]	Потеря управляющего звена (оператора) снизит вероятность выполнения поставленных задач
Сетецентрическая		[4]	Высокая вероятность выполнения поставленных задач, но без учета БПЛА с ограниченными ТТХ
Мультиагентная			Высокая вероятность выполнения поставленных задач с учетом БПЛА с ограниченными ТТХ

Анализ технической литературы выявил недостатки в организации группового управления при реализации автономной работы разработанных систем управления в процессе перераспределения целей между БПЛА с ограниченными ТТХ.

Так же общим недостатком разработанных систем управления является наличие каналов управления и передачи данных с пункта управления. Такие каналы могут быть легко обнаружены и подавлены, что может привести к потере группы.

Алгоритм работы мультиагентной системы управления группой БПЛА-агентов при координации совместных действий показан на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм работы мультиагентной системы управления группой БПЛА

При предполетной подготовке формируются исходные данные: загружаются координаты всех объектов и коэффициенты их важности (приоритеты), происходит синхронизация по времени приемо-передатчиков аппаратов, каждому БПЛА-агенту присваивается свой регистрационный номер. Для избегания столкновений аппаратов в группе определяются безопасные интервалы и эшелонированное положение в строю. Полет группы к целям может осуществляться при использовании навигационной системы и системы наведения [4].

Через фиксированный интервал времени между БПЛА-агентами группы происходит обмен короткими зашифрованными сообщениями с текущими координатами и техническим состоянием для каждого аппарата. С помощью программного обеспечения (ПО) происходит перерасчет минимального расстояния до целей с учетом приоритетов для каждого БПЛА-агента. В случае несоответствия текущего местонахождения каждого из аппаратов группы до своей цели от предполетного задания происходит перераспределение целей с учетом приоритетов для каждого БПЛА-агента группы. При появлении БПЛА-агента в группе с ограниченными ТТХ, не позволяющими ему достигнуть заданной цели, происходит перерасчет расстояния с выбором новой цели независимо от приоритета и с возможностью ее достижения [5].

БАУА каждого БПЛА-агента решает задачу повторного распределения целей с одинаковыми исходными данными для каждого борта по единому алгоритму, учитывающему не только работоспособные БПЛА, но и с ограниченными ТТХ. В результате при такой системе управления больше не потребуется передачи никаких дополнительных команд для управления и наведения на цель для каждого аппарата в независимости от его ТТХ, что обеспечит эффективность работы всей группы [6].

Таким образом, рассмотренный подход позволит группе БПЛА-агентов автономно самоорганизовываться при выполнении как запланированных, так и незапланированных задач с решением периодического целераспределения [7].

В табл. 2 приведен пример выполнения задания по предложенному алгоритму для группы из четырех БПЛА-агентов, где Ц – цель, а П – ее приоритет (1 – max, 3 – min),  $\Delta T$  – фиксированный интервал времени для момента обмена информацией между агентами в группе,  $T_0$  – начальный момент времени [8].

Таблица 2

Пример выполнения задач группой БПЛА-агентов с помощью алгоритма мультиагентной системы управления

Время	Движение БПЛА-агентов к целям	Текущее задание
1 $T_0$		Предполетное задание сформировано: БПЛА1 → Ц1П3 БПЛА2 → Ц3П1 БПЛА3 → Ц3П1 БПЛА4 → Ц2П2
$T_0 + \Delta t$		Полетное задание переформировано: БПЛА1 → Ц1П3 БПЛА2 → Ц3П1 БПЛА3 (огр.ТТХ) → Ц2П2 БПЛА4 → Ц3П1
$T_0 + 2\Delta t$		Полетное задание переформировано: БПЛА1 потерян БПЛА2 → Ц1П3 БПЛА3 (огр.ТТХ) → Ц2П2 Полетное задание выполнено: БПЛА4 → Ц3П1

Окончание табл. 2

1	2	3
$T_0 + 3\Delta t$	ЦЗП1  БПЛА4 Ц2П2  БПЛА3 (огр. ТТХ)	Полетное задание выполнено: БПЛА2 → Ц1П3 БПЛА3 (огр.ТТХ) → Ц2П2 БПЛА4 → Ц3П1

### Заключение

Сформулированы этапы выполнения задач интеллектуального управления группой БПЛА-агентов с учетом влияющих факторов, позволяющих эффективно скоординировать действия аппаратов внутри группы. Разработан алгоритм работы мультиагентной системы управления группой БПЛА-агентов с учетом аппаратов с ограниченными ТТХ, обеспечивающий автономность группы при периодическом распределении целей для выполнения запланированных задач.

### Список литературы

1. Горячев Н. В., Ергалиев Д. С., Полтавский А. В. [и др.]. Беспилотные летательные аппараты. Проблемы проектирования и эксплуатации : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 322 с.
2. Кутахов В. П., Мещеряков Р. В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологии искусственного интеллекта // Проблемы управления. 2022. № 1. С. 67–74.
3. Полтавский А. В., Юрков Н. К. Отбор операторов автоматизированных рабочих мест многофункциональным комплексам беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1 (25). С. 70–76.
4. Халимов Н. Р., Мефедов А. В. Распределенная сетевая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 1–13.
5. Меркулов В. И., Харьков В. П., Шамаров Н. Н. Оптимизация коллективного управления группой беспилотных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10, № 7.
6. Grishko A., Danilova E., Goryachev N. [et al.]. Multicriteria selection of the optimal variant of a complex system based on the interval analysis of fuzzy input data // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings: 1. Vol. 2018-March. – Moscow, 2018. P. 1–7. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337237
7. Полтавский А. В., Тюгашев А. А., Юрков Н. К. Оптимизация информационно-измерительной системы беспилотного воздушного судна // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4 (36). С. 44–55.
8. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Способы и средства противодействия беспилотным летательным аппаратам // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4 (32). С. 131–138.

### References

1. Goryachev N.V., Ergaliev D.S., Poltavskiy A.V. et al. *Bespilotnye letatel'nye apparaty. Problemy proektirovaniya i ekspluatatsii: monografiya = Unmanned aerial vehicles. Problems of design and operation : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:322. (In Russ.)
2. Kutakhov V.P., Meshcheryakov R.V. Management of group behavior of unmanned aerial vehicles: setting the task of applying artificial intelligence technology. *Problemy upravleniya = Problems of management*. 2022;(1):67–74. (In Russ.)
3. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K. Selection of operators of automated workplaces for multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(1):70–76. (In Russ.)
4. Khalimov N.R., Mefedov A.V. Distributed network-centric control system for a group of attack unmanned aerial vehicles. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control systems, communications and security*. 2019;(3):1–13. (In Russ.)
5. Merkulov V.I., Khar'kov V.P., Shamarov N.N. Optimization of collective management of a group of unmanned aerial vehicles. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information measuring and control systems*. 2012;10(7). (In Russ.)
6. Grishko A., Danilova E., Goryachev N. et al. Multicriteria selection of the optimal variant of a complex system based on the interval analysis of fuzzy input data. *Moscow Workshop on Electronic and Networking*

*Technologies, MWENT 2018 – Proceedings: 1. Vol. 2018-March. Moscow, 2018:1–7. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337237*

7. Poltavskiy A.V., Tyugashev A.A., Yurkov N.K. Optimization of the information and measurement system of an unmanned aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):44–55. (In Russ.)
8. Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Methods and means of countering unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):131–138. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

##### **Аскар Гадылшиевич Избасов**

заместитель начальника военного института,  
Военный институт сил воздушной обороны  
(Республика Казахстан, г. Актобе,  
ул. Алии Молдагуловой, 39 А)  
E-mail: iag1973@mail.ru

##### **Askar G. Izbasov**

Deputy head of the Military Institute,  
Military Institute of the Air Defense Forces of Aktobe  
(39 A Aliya Moldagulova street, Aktobe,  
Republic of Kazakhstan)

##### **Павел Дмитриевич Головин**

ведущий инженер кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: GPD75@yandex.ru

##### **Pavel D. Golovin**

Senior engineer of the sub-department  
of radio design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

##### **Николай Кондратьевич Юрков**

доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
заведующий кафедрой конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: yurkov\_NK@mail.ru

##### **Nikolay K. Yurkov**

Doctor of technical sciences, professor,  
honored scientist of the Russian Federation,  
head of the sub-department  
of radio design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

##### **Николай Владимирович Горячев**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: ra4foc@yandex.ru

##### **Nikolay V. Goryachev**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of radio design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

##### **Игорь Иванович Кочегаров**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: kipra@mail.ru

##### **Igor I. Kochegarov**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 13.05.2024**

**Поступила после рецензирования / Revised 15.06.2024**

**Принята к публикации / Accepted 08.07.2024**