

УДК: 62-50

DOI: 10.53816/23061456_2022_7-8_61

**МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО СЕКТОРАМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕРЕЛЯЦИОННЫХ БАЗ ДАННЫХ
НА ОСНОВЕ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**METHODOLOGY OF OPTIMAL DISTRIBUTION OF UNMANNED AERIAL
VEHICLES BY SECTORS USING NON-RELATIONAL DATABASES BASED
ON A NETWORK-CENTRIC CONTROL SYSTEM**

Канд. техн. наук С.В. Иванов¹, канд. техн. наук Е.М. Хорольский², Д.И. Ржевский³

Ph.D. S.V. Ivanov, Ph.D. E.M. Khorolskiy, D.I. Rzhhevsky

¹Краснодарское высшее военное училище им. С.М. Штеменко,

²Филиал МГТУ ГА (г. Ростов), ³Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил РФ

В условиях современных проводимых мероприятий актуализируется проблема повышения эффективности функционирования беспилотных летательных аппаратов (БЛА) за счет их группового применения. Решение специфических задач посредством применения БЛА обуславливает наличие ограничений на временные показатели и своевременное выполнение задач по предназначению в условиях внезапно меняющейся обстановки в районе проведения поисковых действий. Использование сетевых принципов информационного взаимодействия между БЛА группы и внедрение в систему их взаимодействия нереляционных баз данных позволят существенно расширить круг решаемых задач с использованием БЛА. Целью работы является решение задачи распределения областей сканирования между группами БЛА, объединенными каналами связи с наземными пунктами управления в условиях информационно-технических воздействий.

Ключевые слова: группа беспилотных летательных аппаратов, распределение областей сканирования, нереляционные базы данных, маршрутизация, базы данных «ключ-значение».

In the conditions of modern military conflicts, the problem of increasing the efficiency of the functioning of unmanned aerial vehicles (UAVs) due to their group use is being actualized. The solution of specific tasks through the use of UAVs causes the presence of restrictions on time indicators and timely fulfillment of tasks for their intended purpose in the conditions of a suddenly changing situation in the area of reconnaissance and strike operations. The use of network-centric principles of information interaction between the UAVs of the group and the introduction of non-relational databases into the system of their interaction will significantly expand the range of tasks solved using UAVs. The aim of the work is to solve the problem of distributing targets (scanning areas) between groups of UAVs connected by communication channels with ground control points in the conditions of information and technical impacts.

Keywords: group of unmanned aerial vehicles, distribution of scanning area, non-relational databases, routing, key-value databases.

Введение

Современные силовые ведомства должны правильно комбинировать и применять тактические приемы, методы и способы ведения поисковых действий, стандартные оперативные подходы и технологии для того, чтобы успешно выполнять задачи в современном, быстроменяющемся сетцентрическом пространстве.

Самое сильное влияние на формы и способы ведения поисковых действий всегда оказывала информация как о своих силах, так о силах противоборствующей стороны и о местности, где проводятся эти поисковые действия, однако в настоящее время информационные технологии меняют не только подходы к разработке военной техники и вооружения, но все чаще затрагивают вопросы изменения принципов организации системы управления в целом и организационно-штатных изменений в структуре формирования специальных подразделений и их тактике действий.

Результатом прорыва в информационных технологиях стало создание концепции управления, в которой объединились системы управления, связи и безопасности в единую сеть. Данная концепция получила название «сетцентрической». Сетцентрические системы управления предполагают обеспечение, сбор и интеграцию различных средств, работающих на различных физических принципах, в единую интегрированную базу данных. В то же время в научно-методическом плане не существует отработанных, проверенных на практике и достаточно эффективных методов и способов идентификации областей сканирования, объединения и отождествления разнородных данных, обеспечивающих как высокую вероятность обнаружения каждой области, так и низкие вероятности ложной тревоги и пропуска реальных областей сканирования.

В условиях современных конфликтов повышается использование автономных робототехнических систем, которыми являются беспилотные летательные аппараты (БЛА) [6–8]. Основными задачами, решаемыми БЛА, являются: обзор территорий, обнаружение опасных объектов, их локализация, составление карт местности и т.п. Решение специфических задач по средствам применения БЛА обуславливает наличие

ограничений на временные показатели и своевременное выполнение задач по предназначению в условиях внезапно меняющейся обстановки в районе проведения поисковых действий. Эффективность решения перечисленных выше задач можно осуществить путем одновременного использования некоторого множества (группы) БЛА, которые могут осуществлять «параллельное» и независимое решение задач в различных областях исследуемой зоны [1–5]. При этом если таких областей исследуемой зоны несколько, то возникает задача оптимального или близкого к оптимальному распределения этих областей между БЛА группы. Именно решению данной задачи посвящена настоящая статья.

В работах Каляева И.А., Гайдука А.Р., Капустяна С.Г. [1], Юревича Е.И., Халимова Н.Р., Мефедова А.В. [15], Вербы В.С., Меркулова В.И. [13], Евдокименкова В.Н., Красильщикова М.Н., Себрякова Г.Г. [14] анализируются и предлагаются современные подходы к построению распределенных систем управления группами БЛА. Однако в данных работах недостаточно внимания уделено вопросам целераспределения группы БЛА в автономном режиме в случае использования распределенной сетцентрической системы управления группой БЛА при координированной атаке нескольких стационарных объектов в автономном режиме. Поэтому предметная область исследования, касающаяся распределенной сетцентрической системы децентрализованного управления автономных БЛА, является актуальной и предполагает глубокую проработку этих вопросов с проведением более детальных исследований.

Постановка задачи

Рассматриваемая задача сформулирована следующим образом.

Пусть имеется R — количество БЛА с заданными координатами в прямоугольной системе координат.

Известны:

1. Местоположение БЛА с координатами (x_j, y_j) ;
2. Q_j — логический параметр, определяющий: 1 — в работе, 0 — свободен;
3. ϑ_j — средняя скорость движения БЛА, обеспечивающая выполнение задачи;

4. S — средняя площадная характеристика, показывающая, какую полосу обзора охватывает БЛА.

Имеется зона, содержащая m областей выполнения задач, $m > R$, каждая из которых имеет вид прямоугольника.

Каждая область содержит следующие данные:

- а) координаты левого верхнего (x_{ilvu}, y_{ilvu}) и правого нижнего (x_{ipnu}, y_{ipnu}) углов;
- б) координаты центра области (x_0, y_0) ;
- в) геометрические параметры области:

– длина $l_i = x_{ipnu} - x_{ilvu}$;

– высота $h_i = y_{ipnu} - y_{ilvu}$;

5. Количество свободных секторов z_i ;

6. Количество секторов n , на которые разбиваются области, эквивалентно максимальному числу БЛА, необходимых для выполнения задачи в данной области

$$n = \frac{h_i}{S},$$

где h_i — высота области.

Ограничение и допущения:

ϑ_j — средняя скорость движения БЛА, обеспечивающая выполнение задачи, $\vartheta_j = \text{const}$;

S — средняя площадная характеристика, показывающая, какую полосу обзора охватывает БЛА, $S = \text{const}$.

Если во время выполнения задачи произошел отказ (ошибка) в работе БЛА и задача была выполнена не полностью, то данному сектору присваивается статус сектора F_i «0» (свободен) и он снова участвует в распределении между свободными БЛА.

В работе рассматриваются только легкие БЛА с малым и средним радиусом действия.

Для решения задачи оптимального по быстродействию распределения группы БЛА по секторам и областям требуется сформировать такой алгоритм распределения БЛА по секторам, который бы удовлетворял требованию минимума времени полета группировки БЛА ($t_{\text{раб}j}$) при максимальном количестве секторов и имеющихся БЛА (N).

Решение задачи

В связи с тем, что данная работа посвящена решению задачи распределения группировки

БЛА по секторам в условиях ведения современных конфликтов, то целесообразно в основу положить модифицированный метод решения задачи распределения целей на всех участников информационного взаимодействия в группе БЛА, используя сетцентрическую систему управления [1] с нереляционной базой данных (база данных «ключ-значение»).

В отличие от реляционных, в нереляционных базах данных схема данных является динамической и может меняться в любой момент времени. Такие системы управления базами данных (СУБД) отличаются производительностью и скоростью. Физические объекты в NoSQL (от англ. not only SQL — не только SQL) обычно можно хранить непосредственно в том виде, в котором с ними впоследствии будет работать приложение.

Базы данных NoSQL [9] подходят для хранения больших объемов неструктурированной информации, а также пригодны для хранения и обработки большого количества информации. В них можно хранить данные любого типа и добавлять новые в процессе работы.

Одним из основных свойств нереляционных баз данных является масштабируемость. Базы данных NoSQL имеют распределенную архитектуру, поэтому при горизонтальном масштабировании они отличаются высокой производительностью. Технологии NoSQL могут автоматически распределять данные по разным БЛА, что повышает скорость чтения данных в распределенной среде.

Существует четыре вида нереляционных БД [9]:

- документоориентированные базы данных;
- базы данных «ключ-значение»;
- графовые базы данных;
- колоночные СУБД.

Для решения задачи субоптимального распределения секторов по элементам группировки БЛА наиболее оптимальным с точки зрения быстродействия является использование базы данных «ключ-значение». Каждая запись имеет ключ и значение. Такие базы данных в основном используются в тех случаях, когда данные имеют невысокую размерность и скорость обработки информации является приоритетом. Такой подход хранения данных о конфигурации БЛА, секторах, областях и зонах сканирования является целесообразным. Сохраненным данным не назначается

никакой схемы, а сама база данных обеспечивает повышенные скоростные качества по сравнению с реляционной.

В условиях ограничений, накладываемых на возможности БЛА и возможный вариант работы сетцентрической системы управления [2, 3], разработан модернизированный алгоритм, решающий задачи за минимальное время, который представлен на рис. 1.

Методика решения задачи субоптимального распределения секторов по элементам группировки БЛА может быть представлена в виде следующих шагов.

Шаг 1. Составляется нереляционная база данных секторов «ключ-значение», в которой имеются следующие данные:

– координаты центра сектора $(x_{0c}; y_{0c})_i$, вычисляемые по формулам:

$$x_{0c} = \frac{l_i}{2};$$

$$y_{0c} = y_{pmi} + (2k + 1) \cdot \frac{S}{2};$$

– статус сектора F_i (0 — свободен, 1 — в процессе выполнения задачи, 2 — обработан).

Шаг 2. Вычисляется расстояние от первого (произвольно выбранного) БЛА до каждой области, у которой имеется хотя бы один свободный сектор (рис. 2) в соответствии со следующим соотношением:

$$R_{li} = \sqrt{\left((x_1 - x_{0i})^2 + (y_1 - y_{0i})^2\right)}.$$

Шаг 3. Определяется ближайшая к первому БЛА область и вычисляется расстояние от каждого свободного сектора (статус сектора $F_i = 0$) этой области до БЛА (рис. 3) в соответствии со следующим соотношением:

$$r_{li} = \sqrt{\left((x_1 - x_{0ci})^2 + (y_1 - y_{0ci})^2\right)}.$$

Шаг 4. Отправляется БЛА в выбранный (ближайший) сектор для выполнения поставленной задачи, при этом заменяется статус сектора F_i с «0» на «1» (в процессе выполнения задачи), для БЛА логический параметр Q_i меняется с «0»

на «1» (в работе) и присваиваются координаты центра сектора, у области выбранного (ближайшего) сектора уменьшается параметр z_i (количество свободных секторов) на 1.

Шаг 5. Вычисляется время работы БЛА в выбранном на шаге 2 секторе в соответствии со следующим соотношением:

$$t_{рабj} = \frac{l_i}{g_j}.$$

Шаг 6. Повторяются шаги 1–4 для всех оставшихся (свободных) БЛА.

Шаг 7. По окончании выполнения задачи БЛА в секторе, присваивается данному сектору статус F_i «2» (обработан), при этом для БЛА логический параметр Q_i изменяется с «1» на «0» (свободен) и далее повторяются шаги 1–4 (рис. 4).

Шаг 8. После успешного выполнения всеми БЛА задач в данной зоне группа БЛА отправляется в другую ближайшую зону для выполнения задачи, и повторяются шаги 1–7 (рис. 5).

Пример. Приведем пример решения задачи по разработанному алгоритму, примем 10 условных единиц за 1 км. Число БЛА зададим равным $R = 5$ — БЛА со следующими параметрами, представленными в табл. 1.

Имеется некоторая зона дислокации группировки объекта L , содержащая $m = 10$ областей выполнения задач ($m > R$) со следующими данными, представленными в табл. 2.

Исходя из имеющихся данных в табл. 2, вычисляем параметры для каждой области, представленные в табл. 3.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что выбранный для решения задачи распределения группировки БЛА по секторам в условиях проводимых мероприятий, модифицированный метод решения задачи распределения целей на всех участников информационного взаимодействия в группе БЛА, используя сетцентрическую систему управления с нереляционной базой данных (база данных «ключ-значение») является эффективным с точки зрения вычислительных затрат и позволяет реализовать представленные алгоритмы на борту БЛА существующими спецвычислителями [10–12].

Применение модифицированного метода распределения БЛА по секторам позволило

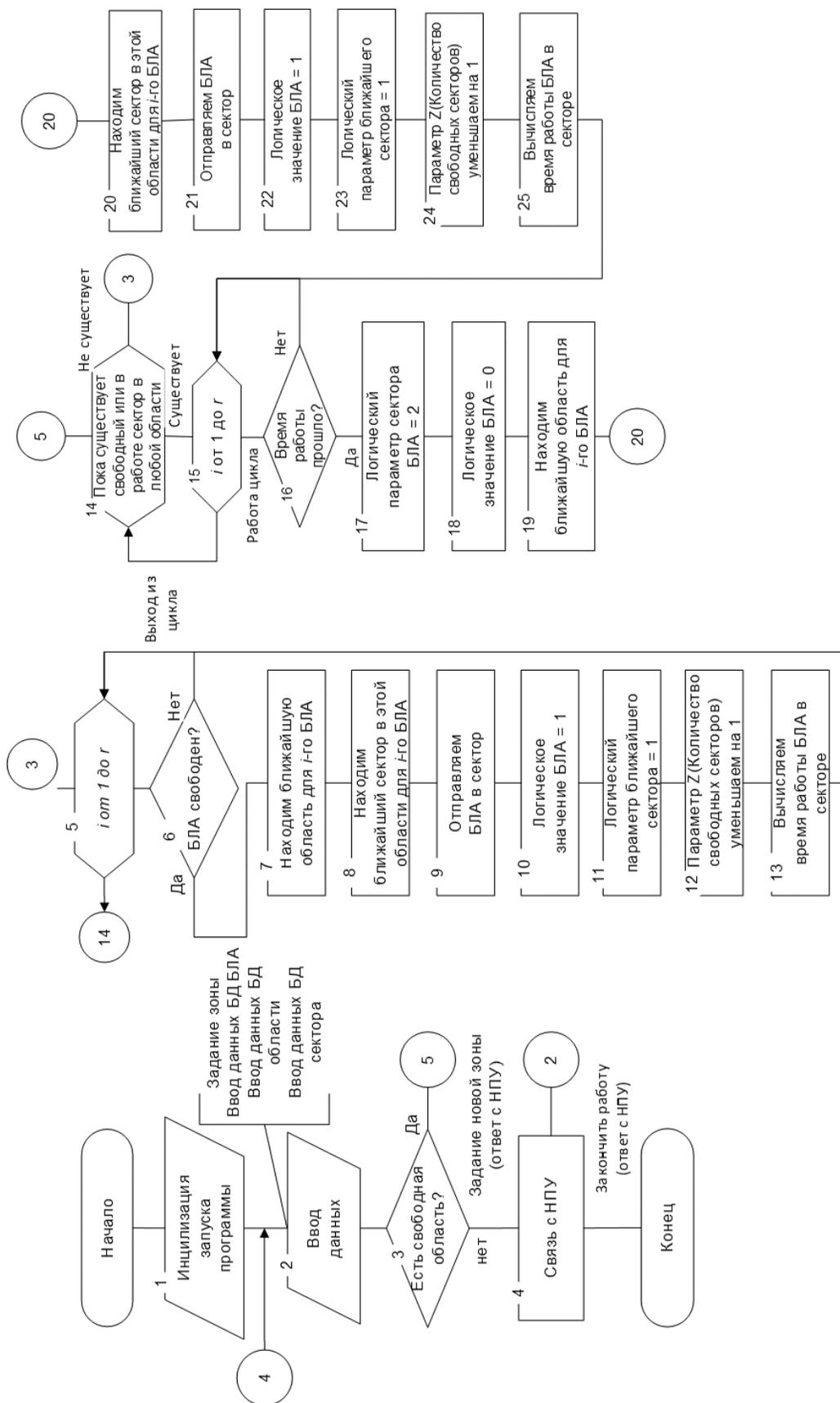


Рис. 1. Блок-схема алгоритма решения задачи субоптимального распределения секторов (целей) по элементам группировки БЛА

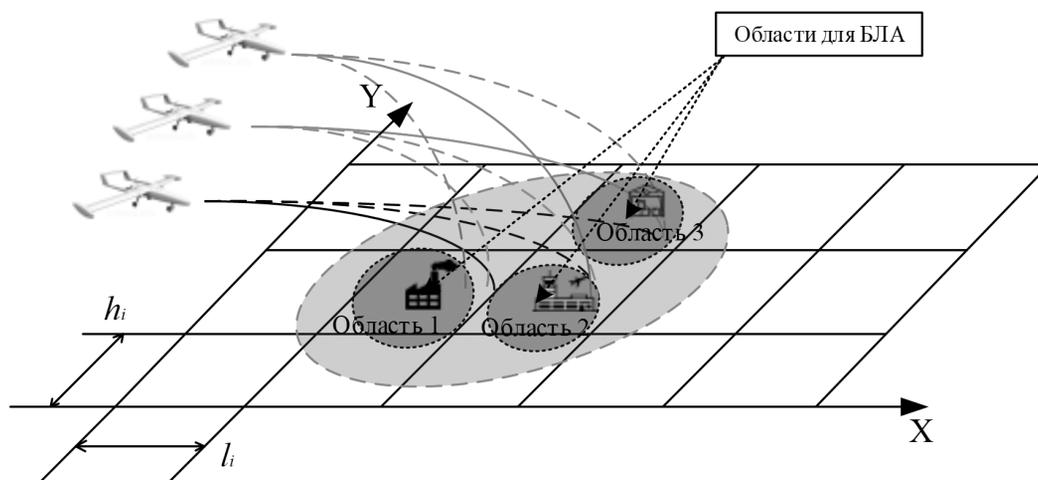


Рис. 2. Геометрическая иллюстрация задачи распределения

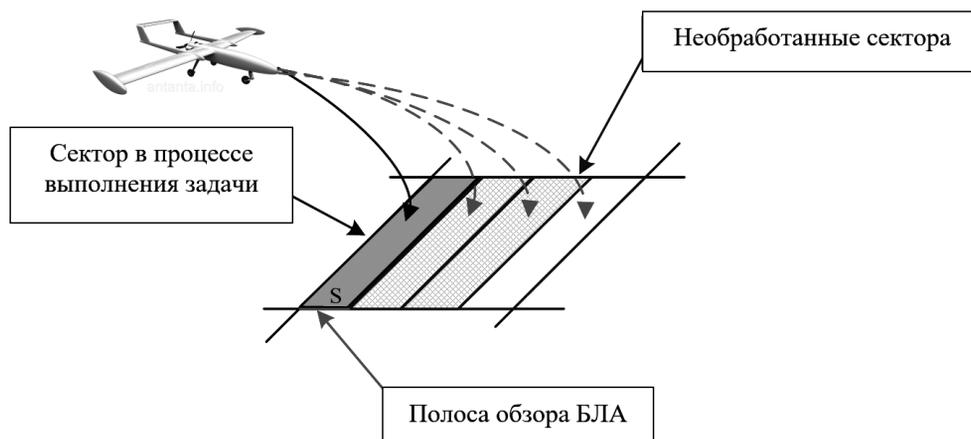


Рис. 3. Работа с выделенным сектором

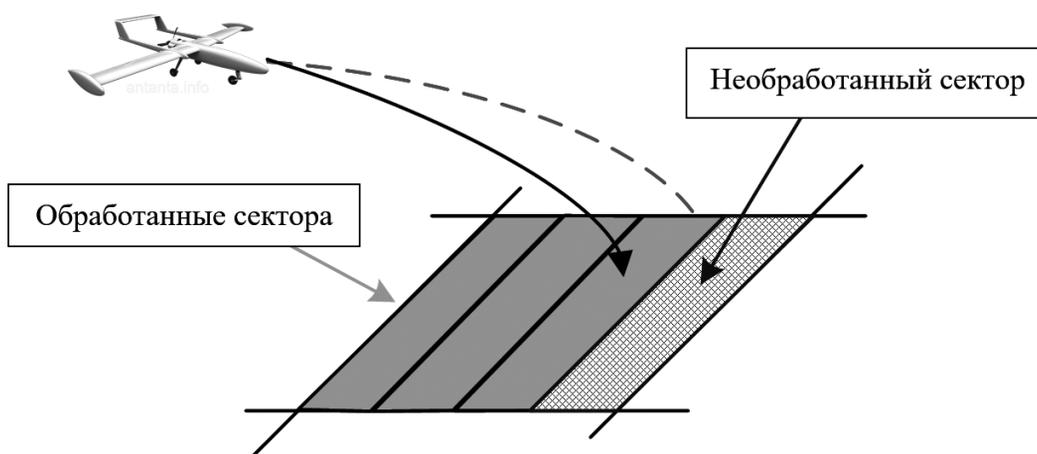


Рис. 4. Геометрическая иллюстрация обработанного сектора

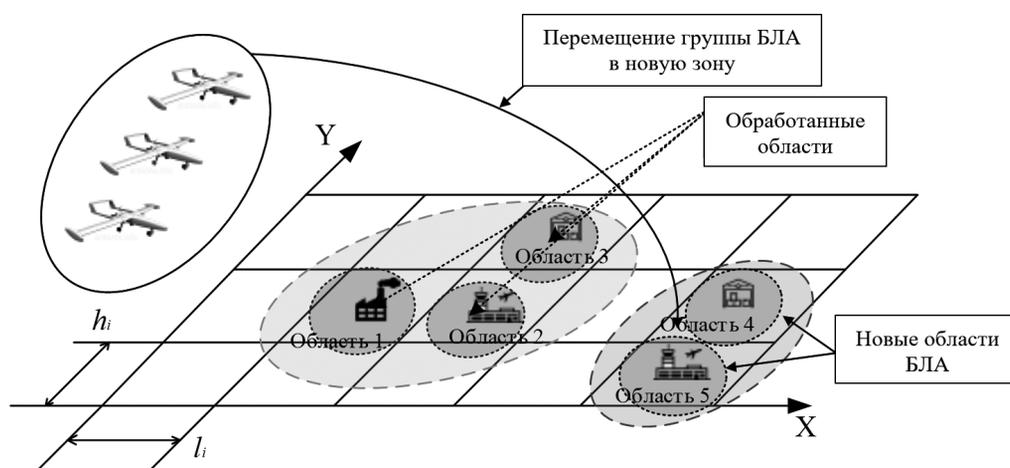


Рис. 5. Геометрическая иллюстрация новой задачи распределения БЛА по секторам

Таблица 1

Исходные параметры БЛА

Параметр Название	Координаты, (x_j, y_j)	Средняя скорость движения, ϑ_j	Средняя площадная характеристика, S
БЛА1	(120, 430)	300 км/ч	2,5 км
БЛА2	(360, 180)	375 км/ч	
БЛА3	(690, 740)	100 км/ч	
БЛА4	(450, 960)	215 км/ч	
БЛА5	(100, 400)	275 км/ч	

Таблица 2

Исходные данные областей выполнения задач

Данные № п/п	Координаты левого верхнего угла, (x_{ilvu}, y_{ilvu})	Координаты правого нижнего угла, (x_{ipnu}, y_{ipnu})
1	(40, 960)	(90, 900)
2	(170, 840)	(230, 780)
3	(30, 700)	(110, 620)
4	(710, 930)	(825, 855)
5	(700, 710)	(800, 650)
6	(280, 440)	(320, 270)
7	(90, 260)	(160, 175)
8	(620, 450)	(720, 360)
9	(810, 370)	(880, 300)
10	(700, 200)	(740, 60)

Параметры областей выполнения задач

№ п/п	Данные	Координаты центра области, (x_0, y_0)	Геометрические параметры области		Количество секторов, $n = \frac{h_i}{S}$	Количество свободных секторов, z_i
			длина, $l_i = x_{pни} - x_{lvii}$	высота, $h_i = y_{pни} - y_{lvii}$		
1		(65, 930)	50	60	3	3
2		(200, 810)	60	60	3	3
3		(70, 660)	80	80	4	4
4		(767, 92)	115	75	3	3
5		(750, 680)	100	60	3	3
6		(300, 335)	40	170	7	7
7		(125, 217)	70	85	4	4
8		(670, 405)	100	90	4	4
9		(845, 335)	70	70	3	3
10		(720, 130)	40	140	6	6

распределить все имеющиеся БЛА по областям сканирования таким образом, что выполнение поисковых задач стало возможным проводить автоматически на борту БЛА без участия человека-оператора.

Литература

1. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. — М.: Физматлит, 2009. 280 с.
2. Подлипьян П.Е., Максимов Н.А. Многоэтапный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24769>
3. Абросимов В.К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. — М.: «ИД Наука», 2013. 168 с.
4. Пшихопов В.Х. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 305 с.
5. Щербатов И.А., Проталинский И.О., Проталинский О.М. Управление группой роботов: компонентный подход // Информатика и системы управления. 2015. № 1 (43). С. 93–104.
6. Соколов В.Б., Теряев Е.Д. Беспилотные летательные аппараты: некоторые вопросы развития и применения (обзор по материалам пу-

бликаций в Интернете) // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 2. С. 12–23.

7. Божко Н.А., Баховчук А.М., Мытько Л.Р. Применение беспилотных летательных аппаратов при проектировании и содержании автомобильных дорог // Наука — образованию, производству, экономике: Материалы 13-й Международной научно-технической конференции. 2015. № 3. 60 с.
8. Полтавский А.В., Жумабаева А.С., Бикеев Р.Р. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов: Развитие в системе вооружения // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1 (13). С. 39–46.
9. Шарипова Н.Н. Об использовании NoSQL-хранилищ данных // Восточно-европейский научный журнал. 2016. С. 74–76.
10. Иванов С.В., Белоножко Д.Г., Петрова О.В. и др. Методика оптимального поиска неравноценных объектов противника на основе решения задачи коммивояжера // Стратегическая стабильность. 2020. № 4 (93). С. 68–74.
11. Петрова О.В., Иванов С.В., Королев И.Д. и др. Математическая модель оценки вероятности безотказной работы системы обработки информации мультиагентного робототехнического комплекса в условиях неопределенности // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2019. Т. 15. № 3. С. 7–15.
12. Иванов С.В., Белоножко Д.Г., Стадник А.Н. и др. Разработка автоматизированной

информационной системы поддержки принятия решения группой беспилотных летательных аппаратов на основе самообучающейся нейронной сети / С.В. Иванов // Стратегическая стабильность. 2020. № 3 (92). С. 15–21.

13. Верба В.С., Меркулов В.И. Авиационные системы радиоуправления. Монография. — М.: Радиотехника, 2014. 376 с.

14. Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. Распределенная интеллектуальная система управления группой беспилотных летательных аппаратов: архитектура и программно-математическое обеспечение // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 29–44.

15. 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.

References

1. Kalyaev I.A., Gajduk A.R., Kapustyan S.G. Models and algorithms of collective management in groups of robots. — М.: Fizmatlit, 2009. 280 p.

2. Podlip'yan P.E., Maksimov N.A. Multi-stage algorithm for solving the problem of flight planning of a group of unmanned aerial vehicles // Proceedings of the MAI. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24769>

3. Abrosimov V.K. Group movement of intelligent aircraft in an antagonistic environment. — М.: «ИД Наука», 2013. 168 p.

4. Pshihopov V.H. Group management of mobile objects in uncertain environments. — М.: FIZMATLIT, 2015. 305 p.

5. Shcherbatov I.A., Protalinskij I.O., Protalinskij O.M. Managing a group of robots: a component approach // Informatics and control systems. 2015 № 1 (43). P. 93–104.

6. Sokolov V.B., Teryaev E.D. Drones: some questions of development and application (review of the published materials on the Internet) // Mechatronics, automation, control. 2008. № 2. P. 12–23.

7. Bozhko N.A., Bakhovchuk A.M., Myt'ko L.R. The use of unmanned aerial vehicles in the design and maintenance of roads // Science — education, production, economy: Materials of 13th International scientific and technical conference. 2015. № 3. 60 p.

8. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Bi-keev R.R. Multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles, the Development of weapons systems // Reliability and quality of complex systems. 2016. № 1 (13). P. 39–46.

9. Sharipova N.N. About using NOSQL-storages of data // East European Scientific Magazine. 2016. P. 74–76.

10. Ivanov S.V., Belonozhko D.G., Petrova O.V. et al. The method of optimal search for unequal enemy objects based on the solution of the traveling salesman problem // Strategic stability. 2020. № 4 (93). Pp. 68–74.

11. Petrova O.V., Ivanov S.V., Korolev I.D. et al. A mathematical model for estimating the probability of trouble-free operation of an information processing system of a multi-agent robotic complex under conditions of uncertainty // Bulletin of the Voronezh State Technical University. un-ta. 2019. T. 15. № 3. P. 7–15.

12. Ivanov S.V., Belonozhko D.G., Stadnik A.N. et al. Development of an automated information system to support decision-making by a group of unmanned aerial vehicles based on a self-learning neural network / S.V. Ivanov // Strategic stability. 2020. № 3 (92). P. 15–21.

13. Verba V.S., Merkulov V.I. Aviation radio control systems. — Moscow: Radiotekhnika Publ., 2014. 376 p.

14. Evdokimenkov V.N., Krasil'shchikov M.N., Sebriakov G.G. Distributed intellectual control system for the group of unmanned aerial vehicles: architecture and software and mathematical support // Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2016. Vol. 174. № 1. P. 29–44.

15. Halimov N.R., Mefedov A.V. The distributed network-centric control system of an attacking unmanned aerial vehicles group // Systems of Control, Communication and Security. 2019. № 3. P. 1–13.