

УДК 681.5.865.8
DOI: 10.7868/S25000640210207

МЕТОД РОБАСТНО УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С «ЛИДЕРОМ» ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ И БЕРЕГОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

© 2021 г. С.Г. Капустян¹, М.В. Орда-Жигулина¹, Д.В. Орда-Жигулина¹

Аннотация. В настоящее время актуальным является вопрос разработки научных основ применения технологий цифровой экономики для систем мониторинга и прогнозирования опасных процессов и обеспечения безопасности населения и береговой инфраструктуры и воплощение теоретических принципов мониторинга для водных экосистем, которые бы включали как классические натурные наблюдения, так и новые технологии бесконтактного мониторинга. Для решения указанного вопроса в части улучшения характеристик надежности и «открытости» систем разработана структура децентрализованной распределенной системы без иерархической подчиненности, а также методы и алгоритмы функционирования распределенной сети датчиков и мобильного робототехнического комплекса (МРК), которые являются частью данной системы. МРК позволяет осуществлять сбор данных о состоянии окружающей среды средствами бортовых сенсорных подсистем и сбор данных, накопленных телекоммуникационно изолированными фрагментами распределенной сети интеллектуальных датчиков в удаленных и труднодоступных местах, использующих распределенные вычисления и элементы концепции туманных вычислений.

Эффективность предложенной модели МРК, методов и алгоритмов достигается за счет применения системы управления, многомерное цифровое устройство управления которой имеет достаточно высокий порядок. Алгоритмы вычисления значений управляющих воздействий получены с применением декомпозирующего управления и метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям. Свойство робастности к отклонениям неопределенных запаздываний в каналах связи каждого МРК с «лидером» достигается за счет использования свойства предложенных полиномиальных уравнений управления.

Предложенные методы и алгоритмы могут применяться при создании цифровых систем управления как одномерными, так и многомерными объектами, в частности мультиробототехническими комплексами, которые могут применяться для размещения датчиков систем мониторинга и диагностики.

Ключевые слова: мониторинг и диагностика, технологии интеллектуального анализа данных, мобильные роботы, мультиробототехнические комплексы, децентрализованные системы поддержки принятия решений, блокчейн.

METHOD OF ROBUSTLY STABLE MOTION CONTROL OF A GROUP OF MOBILE ROBOTS WITH A LEADER FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS SYSTEMS AND ENSURING THE SAFETY OF THE POPULATION AND COASTAL INFRASTRUCTURE

S.G. Kapustyan¹, M.V. Orda-Zhigulina¹, D.V. Orda-Zhigulina¹

Abstract. The developing scientific foundations issue is relevant and topical today for the application of digital economy technologies for monitoring and forecasting hazardous processes and ensuring the safety

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: kap56@mail.ru, jigulina@mail.ru, dinazhigulina@mail.ru

of the population and coastal infrastructure. Especially it is topical to the implementation of the theoretical principles of monitoring for aquatic ecosystems which would include both classical, field observations and new technologies of contactless monitoring. The goal of this study is to solve this issue in terms of improving the characteristics of reliability and “openness” of systems. The authors of this article have developed the structure of a decentralized distributed system without hierarchical subordination as well as methods and algorithms for the functioning of a distributed network of sensors and a mobile robotic complex. MRC is the part of this system. MRC allows collecting data on the state of the environment by means of on-board sensor subsystems and collecting data accumulated by telecommunication isolated fragments of a distributed network of smart sensors in remote and hard-to-reach places using distributed computing and elements of fog computing.

The effectiveness of the proposed model and method is achieved through the use of a control system, the multidimensional digital control device of which has a sufficiently high order. Algorithms of calculating the values of control actions are obtained by using decomposing control and the method of analytical synthesis of systems with output and action control. The robustness property to deviations of uncertain delays in the communication channels of each MR with the leader is achieved by using the properties of the proposed polynomial control equations.

The proposed approach can be used to create digital control systems for both one-dimensional and multidimensional objects (multirobotic complex) which can be used to place sensors for monitoring and diagnostic systems in various fields of application.

Keywords: monitoring and diagnostics, data mining technologies, mobile robots, multi-robotic complexes, decentralized decision support systems, blockchain.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальным является вопрос разработки научных основ применения технологий цифровой экономики (технологий распределенного реестра данных, робототехники, обработки больших объемов данных, туманных вычислений) при построении новых методов и средств систем мониторинга и прогнозирования опасных процессов и обеспечения безопасности населения и береговой инфраструктуры. Поэтому авторами статьи были разработаны прототипы компонентов системы мониторинга и прогнозирования, включая определение номенклатуры и разработку алгоритмов работы для реализации разработанных методов с учетом перспективных методов мониторинга и прогнозирования опасных явлений. Были проведены следующие работы: предложена структура системы [1], номенклатура и алгоритмы работы ее компонентов. Данные результаты были получены на базе разработанных на первом этапе работы методов организации систем мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов и обеспечения безопасности населения и береговой инфраструктуры [2; 3], которые позволяют за счет применения технологий «цифровой экономики» собирать и учитывать обширный перечень параметров о состоянии гидросистем. Согласно номенклатуре и на базе алгоритмов разработаны прототипы компонентов системы мониторинга

и прогнозирования опасных процессов на основе анализа современного состояния популяций макрозообентоса и других гидрологических, гидрохимических параметров [4].

Для оптимизации и повышения эффективности сбора исходных данных в системах мониторинга и диагностики различных областей применения были разработаны модель мультиробототехнического комплекса и новый метод синтеза управления, который представляет собой метод робастно устойчивого управления движением группы мобильных роботов (МР) с «лидером» при решении задач мониторинга мультиробототехническими комплексами (МПК) при наличии неопределенного ограниченного запаздывания по времени в каналах связи МР-«лидера» с другими МР-группы, возникающего при обмене информацией, в том числе и через распределенный реестр данных.

Мобильные робототехнические комплексы могут применяться для:

- мониторинга состояния эрозии береговой линии;
- мониторинга цветения водорослей;
- сбора данных с удаленных распределенных сетей датчиков;
- сбора данных о состоянии окружающей среды.

При одновременном использовании нескольких мобильных роботов осуществляется их групповое

взаимодействие. Для этого предлагается использовать децентрализованные стратегии управления роботами группы. Это позволит снизить нагрузку на канал связи между устройством управления и группой роботов. Также предлагается осуществлять предварительную обработку данных, полученных от сенсорных устройств, и в первую очередь от бортовых видеокамер, за счет использования бортовых вычислительных устройств.

Эффективность предложенных модели и метода достигается за счет применения системы управления, многомерное цифровое устройство управления которой имеет достаточно высокий порядок. Алгоритмы вычисления значений управляющих воздействий получены с применением декомпозирующего управления и метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям. Свойство робастности к отклонениям неопределенных запаздываний в каналах связи каждого МР с «лидером» достигается за счет использования свойства предложенных полиномиальных уравнений управления.

Работа предложенного метода показывается на примере функционирования МРК на базе гетерогенной группы беспилотных летательных аппаратов. Предложенный подход может применяться в различных областях при создании цифровых систем управления как одномерными, так и многомерными объектами, в частности:

- мультиробототехническими комплексами с неопределенным запаздыванием в каналах связи между системами управления роботов;
- мультиробототехническими комплексами для размещения датчиков систем мониторинга и диагностики.

МУЛЬТИРОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ

Основу мультиробототехнического комплекса как компонента системы мониторинга и диагностики (СМД) составляет группа автономных мобильных роботов, предназначенная для измерения характеристик среды и сбора данных на обширных территориях (в лесных массивах, в морских и океанских акваториях, на крупных технических и других объектах). Также в состав МРК помимо группы МР входит и другое оборудование: хранилища данных, пункты обработки информации и управления, средства обеспечения (пополнение энергоресурса, ремонта, технического обслуживания).

Группы роботов по составу можно разделить на гомогенные [5], то есть состоящие из одинаковых по конструкции и функциональному назначению МР, и гетерогенные [6], то есть состоящие из различных по конструкции, функциональному назначению, а также по среде функционирования (наземные, воздушные, надводные и подводные) МР.

Как показали исследования, для решения задач мониторинга наиболее эффективно применение гетерогенных групп МР [7].

Обобщенная структура МРК представлена на рисунке 1.

Задачи мониторинга могут решаться отдельными многофункциональными МР, но для этого они должны обладать высоким уровнем автономности и, следовательно, достаточным запасом энергоресурсов на борту для перемещения на значительные расстояния, высокой надежностью и большой грузоподъемностью, чтобы нести на борту большое количество полезной нагрузки, в частности датчиковые системы для измерения параметров контролируемой среды, вычислительные средства для обработки данных о состоянии среды и средства связи для передачи информации в центр мониторинга.

Для решения задач мониторинга удаленных обширных территорий и объектов наиболее целесообразным представляется использование МРК на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) мультикоптерного типа – БПЛА-мультикоптеров. Далее в настоящем отчете будут рассматриваться МРК на базе БПЛА.

Рассмотрим некоторые типовые задачи мониторинга с использованием МРК на базе БПЛА.

Пусть на некоторой контролируемой территории имеется несколько различных областей, мониторинг (сканирование) которых может осуществляться только с помощью БПЛА. Мониторинг может быть периодическим и постоянным. В первом случае группа БПЛА в определенное время пролетает над заданными областями и осуществляет их мониторинг (проводит фотовидеосъемку и/или измерение различных параметров состояния среды в этих областях) с использованием бортовых датчиков БПЛА с различными физическими принципами работы. Далее полученная информация в оцифрованном и сжатом виде передается на обработку в подсистему сбора, хранения и первичной обработки данных СМД.

Как правило, малоразмерные БПЛА имеют ограниченный радиус действия подсистем свя-

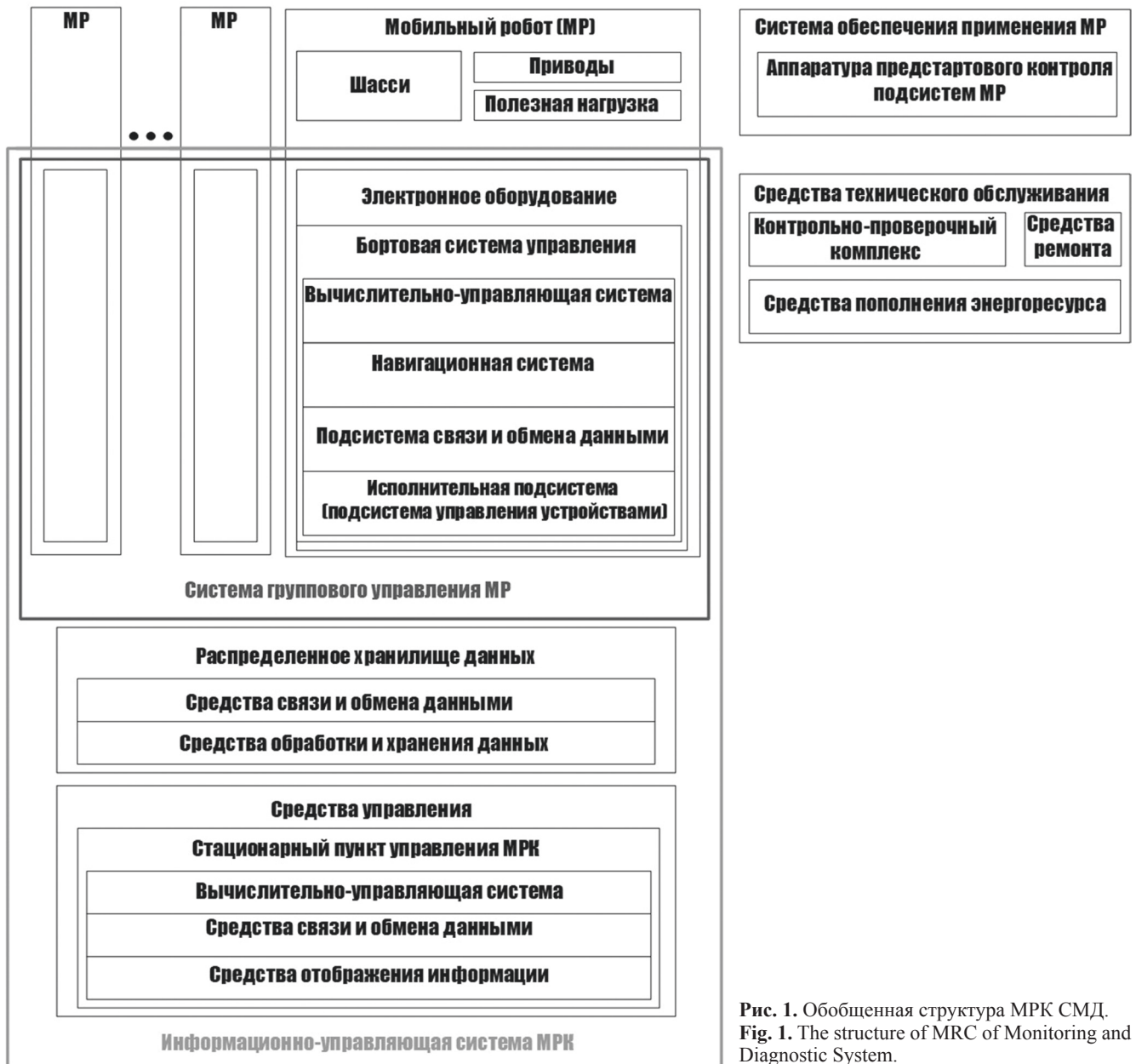


Рис. 1. Обобщенная структура МРК СМД.
Fig. 1. The structure of MRC of Monitoring and Diagnostic System.

зи и обмена данными (ПСОД). Поэтому в состав МРК должны входить БПЛА, осуществляющие ретрансляцию данных от БПЛА, выполняющих сканирование, в подсистему сбора, хранения и первичной обработки СМД. Если позволяют бортовые вычислительные средства, то такие БПЛА могут выполнять обработку данных, их комплексование, хранение и последующую передачу в наземные информационные центры, а также могут реализовывать функции «лидера», управляющего действиями подгруппы БПЛА, осуществляющей мониторинг данной области, как показано на рисунке 2. Эти же БПЛА могут использоваться

для хранения навигационной и другой информации, необходимой для функционирования БПЛА в составе групп. То есть на базе таких БПЛА может строиться распределенное хранилище данных (распределенный реестр) системы группового управления БПЛА МРК [7].

Во втором случае для постоянного мониторинга отдельных областей используются стационарные датчики или мультидатчиковые системы [8], которые осуществляют измерение параметров среды, накопление данных и их передачу в сжатом виде на периодически пролетающие над данной областью БПЛА МРК. Данная задача проиллюстрирована ри-

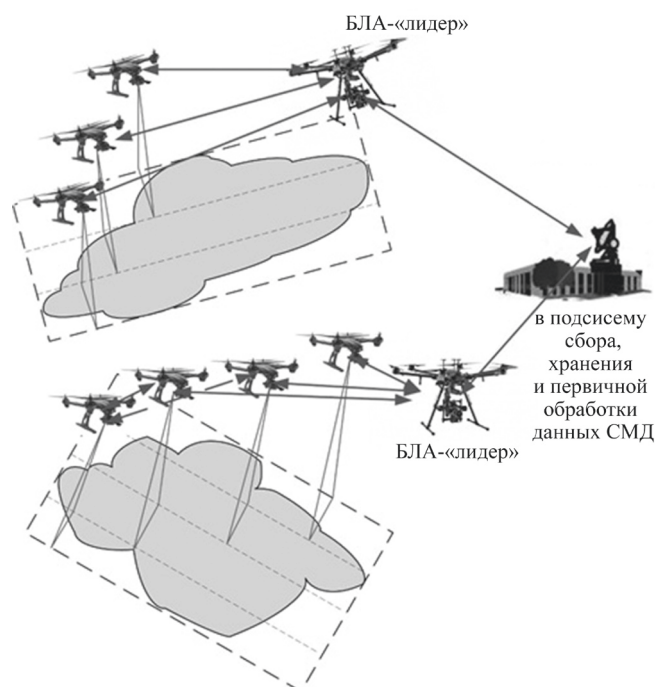


Рис. 2. Сканирование областей группами БПЛА.
Fig. 2. Scanning areas by UAV groups.

сунками 2 и 3. Передачу данных инициируют бортовые ПСОД БПЛА.

Датчиковая система помимо одного или нескольких датчиков разных типов имеет микроконтроллер, который осуществляет оцифровку, предварительную обработку и хранение данных, устройство ПСОД и обмена данными, осуществляющее сжатие и передачу полученной от датчиков информации на

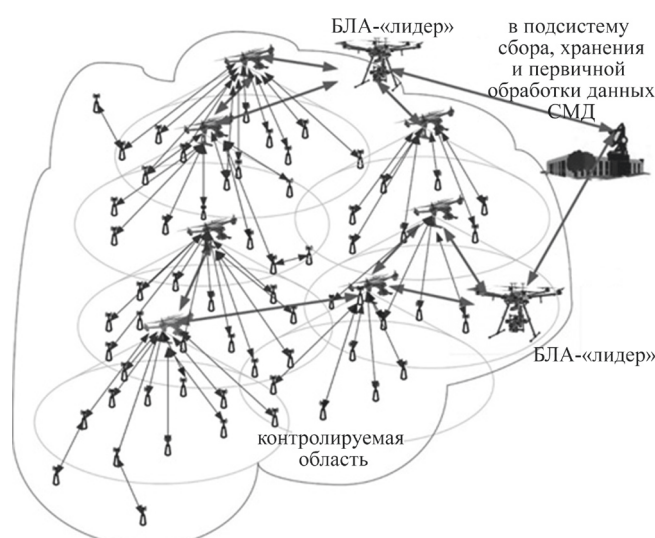


Рис. 3. Мониторинг областей с использованием стационарных датчиковых систем и БПЛА.
Fig. 3. Monitoring areas using stationary sensor systems and UAV's.

БПЛА, а при необходимости и ретрансляцию данных от соседних датчиковых систем для последующей передачи на БПЛА (рис. 3, 4). Если координаты установки датчиковой системы неизвестны при установке, то датчиковая система может включать приемник сигналов глобальной системы позиционирования – ГЛОНАСС или GPS.

Объемы информации, которую получают БПЛА от датчиков состояния среды и информации для управления их функционированием, могут быть такими большими, что бортовых ресурсов не хватает. Выходом является использование распределенного реестра и одного из его видов – блокчейна – децентрализованной системы хранения данных и вычислений [9; 10].

Кроме того, технологии распределенного реестра могут использоваться и для управления группами мобильных роботов, в том числе и БПЛА. Для этого бортовые устройства управления (БУУ) роботов и ресурсы распределенного хранилища данных должны быть связаны коммуникационной сетью.

Организацию группы МР, точнее, организацию системы группового управления на базе коммуникационной сети называют сетевцентрической [11]. При этом подразумевается, что каждый робот, входящий в группу, имеет БУУ. Координация действий МР-группы при выполнении группового задания осуществляется за счет информационного взаимодействия через каналы связи. Сетевцентрическая организация лежит в основе децентрализованного управления группой роботов, что, в свою очередь, обеспечивает: во-первых, высокую отказоустойчивость системы, поскольку в ней отсутствует «узкое горло» в виде центрального устройства управления, а выход из строя любого из роботов не приводит к выходу из строя всей группы в целом; во-вторых, возможность масштабирования, то есть увеличения числа роботов в группе путем их простого подключения к каналу связи, и в-третьих, снижение вычислительной нагрузки на устройство управления отдельного робота, поскольку на него возлагается задача управления данным роботом, а не всей группировкой в целом, что, в свою очередь, снижает технические требования к БУУ и обеспечивает возможности управления в реальном времени.

Кроме того, у малоразмерных МР, как правило, БУУ и ПСОД имеют весьма ограниченные возможности, что не позволяет осуществлять полностью децентрализованное управление группой. Поэтому в рамках сетевцентрической организации может быть реализовано иерархическое управление груп-

пой роботов. В этом случае группа роботов должна быть гетерогенной, то есть состоящей из роботов различного функционального назначения, как, например, группа БПЛА, описанная выше. Также в этом случае группа роботов определенным образом разбивается на подгруппы. В состав каждой подгруппы входят малоразмерные роботы, непосредственно решающие целевую задачу, и робот-«лидер», осуществляющий координацию действий роботов своей подгруппы. При этом целевая задача разбивается на несколько подзадач, каждая из которых должна решаться одной или несколькими подгруппами роботов.

Как показывает анализ информационных источников, исследования в области сетевидного управления гетерогенными группами робототехнических систем проводятся по нескольким направлениям в рамках концепции «цифровой экономики», в частности использования технологий облачных вычислений, Интернета вещей, эволюционных вычислений, мультиагентных систем. Объединяя результаты, полученные в рамках исследований по данным направлениям, можно получить синергетический эффект при решении задач управления гетерогенными группами МР различного назначения, в том числе решающими задачи мониторинга.

АЛГОРИТМ РАБОТЫ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СГУ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА ТЕРРИТОРИЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППОЙ БПЛА

Был разработан алгоритм работы сетевидной СГУ на примере задачи мониторинга территорий гетерогенной группой БПЛА. Данный алгоритм является развитием подхода, описанного в работе [12].

Пусть необходимо осуществить сканирование (мониторинг) множества областей $\{M\}$ с помощью группы БПЛА. Причем каждая такая область $P_i (i = \overline{1, M})$, M – количество областей) определяется некоторым прямоугольником, для которого известны координаты $\langle x_i^c, y_i^c \rangle$ его центра, H_i – ширина, F_i – длина и ϕ_i – угол ориентации. Эти данные размещаются оператором с использованием специального сервиса вычислительной сети, например в распределенном реестре.

Будем считать, что сканирование областей осуществляется с использованием малоразмерных БПЛА, вычислительные подсистемы и подсистемы связи которых, как отмечалось выше, имеют ограниченные возможности. Это обуславливает

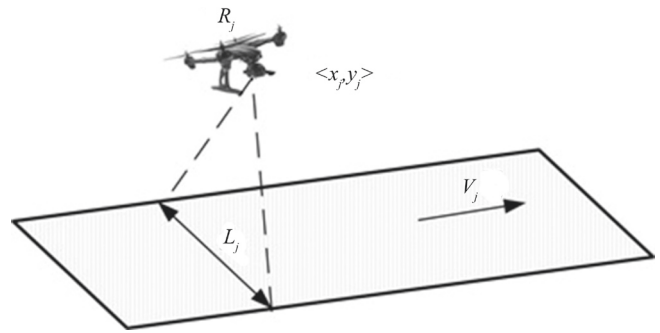


Рис. 4. Параметры БПЛА $R_j (j = \overline{1, N})$.

Fig. 4. UAV parameters $R_j (j = \overline{1, N})$.

необходимость использования БПЛА-ретрансляторов, которые могут выполнять функции «лидера» и хранилища данных. Пусть в состав гетерогенной группы входят N БПЛА $R_j (j = \overline{1, N})$, способных осуществлять сканирование, и к БПЛА-«лидеров» $RL_k (k = \overline{1, K})$. Причем каждый из БПЛА $R_j (j = \overline{1, N})$ имеет следующие параметры, учитываемые при решении задачи распределения областей сканирования между БПЛА группы и представленные на рисунке 4:

- L_j – ширина полосы сканирования;
- V_j – скорость сканирования (или, иначе, скорость движения БПЛА при сканировании);
- $\langle x_j, y_j \rangle$ – координаты его текущего положения в пространстве.

Для простоты дальнейших построений считаем, что все БПЛА $R_j (j = \overline{1, N})$, входящие в группу, одинаковы и, соответственно, имеют одинаковые значения параметров $L_j (j = \overline{1, N}) = L$ и $V_j (j = \overline{1, N}) = V$.

Основными параметрами БПЛА-«лидеров» $RL_k (k = \overline{1, K})$ являются дальность действия подсистемы связи и обмена данными $D_k (k = \overline{1, K})$ и скорость движения V_k , как показано на рисунке 5. Будем считать, что скорость движения у всех БПЛА $RL_k (k = \overline{1, K})$ одинаковая и равна V . Также дальность действия подсистемы связи и обмена данными одинаковая и равна D .

Задача состоит в распределении БПЛА $R_j (j = \overline{1, N})$ и БПЛА-«лидеров» $RL_k (k = \overline{1, K})$ группы по областям $P_i (i = \overline{1, M})$ таким образом, чтобы решить задачу сканирования множества областей $\{M\}$ за время, не превышающее заданное t_3 .

При этом будем считать, что количество N БПЛА $R_j (j = \overline{1, N})$ достаточно для сканирования M об-

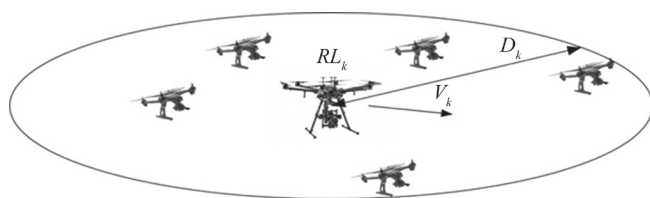


Рис. 5. Параметры БПЛА-«лидера» RL_k ($k = \overline{1, K}$).

Fig. 5. UAV Leader Parameters RL_k ($k = \overline{1, K}$).

ластей. Решение сформулированной выше задачи было осуществлено в несколько этапов.

На первом этапе определяется количество подгрупп БПЛА, которое необходимо для сканирования M областей. Причем для сканирования одной и той же области может потребоваться несколько подгрупп в зависимости от размеров этой области. Для этого каждая область разбивается на части, и каждая подгруппа должна сканировать свою часть области (подобласть).

На втором этапе подобласти сканирования распределяются между подгруппами БПЛА.

На третьем этапе в каждой подобласти выделяются полосы сканирования шириной L и определяется численность подгрупп БПЛА, а также осуществляется распределение БПЛА R_j ($j = \overline{1, M}$) по подгруппам.

На четвертом этапе необходимо определить конкретные полосы (траектории) сканирования для каждого БПЛА подгруппы.

ВЫВОДЫ

При разработке научных основ применения технологий цифровой экономики для систем мониторинга и прогнозирования опасных процессов и обеспечения безопасности населения и береговой инфраструктуры для улучшения характеристик надежности и «открытости» таких систем авторами данной статьи была разработана структура децентрализованной распределенной системы без иерархической подчиненности, а также методы и алгорит-

мы функционирования распределенной сети датчиков и модель мобильного робототехнического комплекса, которые являются частью данной системы.

Мультиробототехнический комплекс и метод робастно устойчивого управления движением группы мобильных роботов с «лидером» разработаны для решения задач мониторинга мультиробототехническими комплексами при наличии неопределенного ограниченного запаздывания по времени в каналах связи МР-«лидера» с другими МР-группы, возникающего при обмене информацией, в том числе и через распределенный реестр данных.

Эффективность предложенных модели и метода достигается за счет применения системы управления, многомерное цифровое устройство управления которой имеет достаточно высокий порядок. Алгоритмы вычисления значений управляющих воздействий получены с применением декомпозирующего управления и метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям. Свойство робастности к отклонениям неопределенных запаздываний в каналах связи каждого МР с «лидером» достигается за счет использования свойства предложенных полиномиальных уравнений управления.

Работа предложенных модели и метода показана на примере функционирования МРК на базе гетерогенной группы беспилотных летательных аппаратов. Предложенный подход может применяться в различных областях при создании цифровых систем управления как одномерными, так и многомерными объектами, в частности мультиробототехническими комплексами с неопределенным запаздыванием в каналах связи между системами управления роботов, которые могут являться частью подсистем сбора, хранения и первичной обработки данных систем мониторинга и диагностики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ГЗ № АААА-А19-119011190173-6 и РФФИ 18-05-80092 и 18-58-00051.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orda-Zhigulina M.V., Melnik E.V., Ivanov D.Ya., Rodina A.A., Orda-Zhigulina D.V. 2019. Combined Method of Monitoring and Predicting of Hazardous Phenomena. In: *Software Engineering Methods in Intelligent Algorithms. CSOC 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 984*. Cham, Springer: 55–61. doi: 10.1007/978-3-030-19807-7_6
2. Orda-Zhigulina D.V., Orda-Zhigulina M.V., Rodina A.A. 2020. Cognitive Model for Monitoring and Predicting Dangerous Natural Processes for Hydro Ecosystem Analysis. In: *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1294*. Cham, Springer: 688–695. doi: 10.1007/978-3-030-63322-6_58
3. Мельник Э.В., Орда-Жигулина М.В., Орда-Жигулина Д.В., Родина А.А. 2020. Метод повышения надежности за счет

- реконфигурации ресурсов в системах мониторинга и диагностики опасных природных явлений. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2: 18–26.
4. Melnik E.V., Bulysheva N.I., Orda-Zhigulina M.V., Orda-Zhigulina D.V. 2020. Component of Decision Support Subsystem for Monitoring and Predicting of Hazardous Processes at the Base of Analysis of Macro Zoobenthos Communities of Azov Sea. In: *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1294. Cham, Springer: 676–687. doi: 10.1007/978-3-030-63322-6_57
 5. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. 2009. *Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов*. М., ФИЗМАТЛИТ: 280 с.
 6. Попов С.Г., Крашенинников А.С., Чуватов М.В. 2019. Исследование алгоритма обследования местности гетерогенной группой автономных мобильных роботов. *Робототехника и техническая кибернетика*. 7(4): 278–290.
 7. Valentini G., Brambilla D., Hamann H., Dorigo M. 2016. Collective perception of environmental features in a robot swarm. In: *Swarm Intelligence. ANTS 2016. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9882. Cham, Springer: 65–76. doi: 10.1007/978-3-319-44427-7_6
 8. Тиллисон Д. 2012. Концепции построения беспроводных датчиковых сетей. *Электронные компоненты*. 5: 102–105.
 9. Strobel V., Dorigo M. 2018. *Blockchain technology for robot swarms: A shared knowledge and reputation management system for collective estimation*. IRIDIA – Technical Report Series Technical Report No. TR/IRIDIA/2018-009. Bruxelles, IRIDIA, Institut de Recherches Interdisciplinaires et de D'evloppements en Intelligence Artificielle, Universite Libre de Bruxelles: 12 p.
 10. Castelló Ferrer E., Rudovic O., Hardjono Th., Pentland A. 2018. RoboChain: a secure data-sharing framework for human-robot interaction. In: *eTELEMED 2018. The Tenth International Conference on eHealth, Telemedicine, and Social Medicine (March 25–29, 2018 - Rome, Italy)*: 124–130.
 11. Каляев И.А., Капустян С.Г., Усачев Л.Ж. 2016. Метод решения задачи распределения целей в группе БЛА сетечно-центрической системой управления. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 12(185): 55–70. doi: 10.18522/2311-3103-2016-12-5570
 12. Трифонов А.Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения. *Экспонента*. URL: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/index.php (дата обращения: 09.04.2021).
 2. Orda-Zhigulina D.V., Orda-Zhigulina M.V., Rodina A.A. 2020. Cognitive Model for Monitoring and Predicting Dangerous Natural Processes for Hydro Ecosystem Analysis. In: *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1294. Cham, Springer: 688–695. doi: 10.1007/978-3-030-63322-6_58
 3. Melnik E.V., Orda-Zhigulina M.V., Orda-Zhigulina D.V., Rodina A.A. 2020. [Reliability method by reconfiguration resources in monitoring and diagnostic systems of hazardous phenomena]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2: 18–26. (In Russian).
 4. Melnik E.V., Bulysheva N.I., Orda-Zhigulina M.V., Orda-Zhigulina D.V. 2020. Component of Decision Support Subsystem for Monitoring and Predicting of Hazardous Processes at the Base of Analysis of Macro Zoobenthos Communities of Azov Sea. In: *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1294. Cham, Springer: 676–687. doi: 10.1007/978-3-030-63322-6_57
 5. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. 2009. *Modeli i algoritmy kolektivnogo upravleniya v gruppakh robotov. [Collective control models and algorithms in groups of robots]*. Moscow, FIZMATLIT: 280 p. (In Russian).
 6. Popov S.G., Krasheninnikov A.S., Chuvатов M.V. 2019. [Study of the area survey algorithm for the heterogeneous group of autonomous mobile robots]. *Robotics and Technical Cybernetics*. 7(4): 278–290. (In Russian).
 7. Valentini G., Brambilla D., Hamann H., Dorigo M. 2016. Collective perception of environmental features in a robot swarm. In: *Swarm Intelligence. ANTS 2016. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9882. Cham, Springer: 65–76. doi: 10.1007/978-3-319-44427-7_6
 8. Tillison D. 2012. [Concepts for building wireless sensor networks]. *Elektronnyye komponenty*. 5: 102–105. (In Russian).
 9. Strobel V., Dorigo M. 2018. *Blockchain technology for robot swarms: A shared knowledge and reputation management system for collective estimation*. IRIDIA – Technical Report Series Technical Report No. TR/IRIDIA/2018-009. Bruxelles, IRIDIA, Institut de Recherches Interdisciplinaires et de D'evloppements en Intelligence Artificielle, Universite Libre de Bruxelles: 12 p.
 10. Castelló Ferrer E., Rudovic O., Hardjono Th., Pentland A. 2018. RoboChain: a secure data-sharing framework for human-robot interaction. In: *eTELEMED 2018. The Tenth International Conference on eHealth, Telemedicine, and Social Medicine (March 25–29, 2018 - Rome, Italy)*: 124–130.
 11. Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Usachev L.Z. 2016. [The method of solving the problem of the distribution of goals in the group of UAVS by network-centric control system]. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 12(185): 55–70. (In Russian). doi: 10.18522/2311-3103-2016-12-5570
 12. Trifonov A.G. [Statement of the optimization problem and numerical methods for its solution]. *Ekspontenta*. Available at: matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/index.php (accessed 9 April 2021). (In Russian).

REFERENCES

Поступила 14.04.2021