

Модели описания и критерии оценки эффективности распределения и планирования задач в роевых робототехнических системах*

В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, А. С. Павлов, М. М. Гурчинский

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Кавказский федеральный университет»
355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1

Аннотация. Применение роевых робототехнических систем (РРТС) в условиях неопределенности актуализирует вопросы разработки соответствующих моделей описания и критериев оценки эффективности распределения и планирования задач. Под условиями неопределенности понимается неполнота информационного обеспечения агентов РРТС о работоспособности других агентов и статусе выполнения назначенных им задач. Цель исследования: разработка моделей описания и критериев оценки эффективности распределения и планирования задач в РРТС в условиях неопределенности с учетом ограниченных возможностей агентов РРТС и специфики децентрализованного управления. Для достижения цели были использованы методы системного анализа, теории графов, теории распределенного реестра. Методы: в работе предложены следующие новые критерии оценки эффективности: критерий доли решенных задач, критерий осведомленности РРТС обо всех задачах, критерий частоты формирования управляющих воздействий. Элементом новизны представленных моделей описания и критериев оценки эффективности является учет общего киберфизического пространства РРТС в процессе принятия решения о выборе той или иной задачи для дальнейшего выполнения в условиях неопределенности. Результаты: предложенные модели описания и критерии оценки эффективности распределения и планирования задач в РРТС на основе общего киберфизического пространства обеспечивают более точную оценку эффективности выполнения глобальной задачи при функционировании в условиях неопределенности по сравнению с существующими решениями.

Ключевые слова: роевые робототехнические системы, киберфизические системы, распределение задач, планирование задач, распределенный реестр

Поступила 26.08.2022, одобрена после рецензирования 19.09.2022, принята к публикации 22.09.2022

Для цитирования. Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Павлов А. С., Гурчинский М. М. Модели описания и критерии оценки эффективности распределения и планирования задач в роевых робототехнических системах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 5 (109). С. 58–72. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-58-72

MSC: 68T05

Original article

Description models and criteria for evaluating the efficiency of task allocation and planning in swarm robotic systems*

V.I. Petrenko, F.B. Tebueva, A.S. Pavlov, M.M. Gurchinskiy

Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education
"North-Caucasus Federal University"
355017, Russia, Stavropol, 1 Pushkin street

© Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Павлов А. С., Гурчинский М. М., 2022

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90026

* The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-37-90026

Annotation. The use of swarm robotic systems (SRS) in conditions of uncertainty actualizes the development of appropriate description models and criteria for evaluating the effectiveness of the task allocation and planning. Uncertainty conditions are understood as incompleteness of information support for SRS agents about the performance of other agents and the status of the tasks assigned to them. Purpose of the research: develop models for describing and criteria for evaluating the effectiveness of the task allocation and planning in the SRS in conditions of uncertainty, taking into account the limited capabilities of SRS agents and the specifics of decentralized management. To achieve the goal, the methods of system analysis, graph theory, and distributed ledger theory were used. Methods: the paper proposes the following new criteria for assessing the effectiveness: the criterion for the proportion of solved tasks, the criterion for the SRS all tasks awareness, the criterion for the formation of control actions frequency. An element of novelty of the presented models of description and criteria for evaluating efficiency is taking into account the general cyber-physical space of the SRS in the process of making a decision on the choice of a particular task for further execution under conditions of uncertainty. Results: the proposed description models and criteria for assessing the effectiveness of the task allocation and planning in the SRS on the basis of a common cyber-physical space provide a more accurate assessment of the effectiveness of a global task when operating under uncertainty conditions in comparison with existing solutions.

Key words: swarm robotic systems, cyber-physical systems, task allocation, task planning, distributed ledger

Submitted 26.08.2022,

approved after reviewing 19.09.2022,

accepted for publication 22.09.2022

For citation. Petrenko V.I., Tebueva F.B., Pavlov A.S., Gurchinskiy M.M. Description models and criteria for evaluating the efficiency of task allocation and planning in swarm robotic systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 5 (109). Pp. 58–72. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-58-72

ВВЕДЕНИЕ

Робототехнические системы (РТС) применяются для эффективного решения множества сложных задач, например, сборочное производство электронных приборов, автомобилей, исследование опасных объектов и местности, обезвреживание взрывоопасных предметов, разминирование местности, охрана и мониторинг транспортных, оборонных, энергетических и химических объектов [1] и др. При решении подобных задач становится актуальным применение мультиагентных РТС (МРТС). При этом важными проблемами, подлежащими решению для обеспечения функционирования МРТС, являются: определение состава и структуры МРТС, а также синтез системы управления [2], эффективное распределение задач между агентами МРТС и последующее планирование последовательности их выполнения [3–5], обеспечение группового движения [6], достижение консенсуса [7], обеспечение надежности [8] и кибербезопасности [9].

Агенты МРТС могут различаться по структурному исполнению (габаритные размеры, наличие нескольких вычислительных платформ и т.д.) и функциональному назначению (наличие на борту агентов МРТС специализированных исполнительных устройств, датчиков и сенсоров). В этом случае МРТС следует рассматривать как гетерогенные [10]. Гетерогенные МРТС применяются для решения сложных задач, которые могут быть декомпозированы на ряд более простых специфических подзадач.

Частным случаем гомогенной МРТС является роевая РТС (РРТС) [11]. Характерными особенностями систем подобного рода являются [12]:

- полностью децентрализованная система управления. Ожидаемое поведение агентов РРТС достигается за счет использования принципов самоорганизации агентов;
- ограниченные возможности вычислительных устройств агентов, а также бортовых датчиков и сенсоров.

Предметом данной статьи является процесс распределения и планирования задач в РРТС.

СТРАТЕГИИ ПЛАНИРОВАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ

Актуальными областями применения МРТС являются: мониторинг лесных массивов [13–15], нефте- и газопроводов [16], распознавание людей при проведении поисково- и аварийно-спасательных работ [17] и др. При решении перечисленных задач МРТС зачастую приходится функционировать в условиях неопределенности, в непредсказуемой и недетерминированной среде [18]. Данные факторы актуализируют реализацию МРТС в виде РРТС. Для РРТС [19] децентрализованное распределение задач – единственно возможный вариант осуществления распределения задач. Особенностью децентрализованной стратегии является сложность математического моделирования процесса распределения задач в процессе функционирования РРТС в условиях неопределенности с учетом всех вышеперечисленных факторов.

Приведенные в работах [20–25] существующие модели описания распределения и планирования задач обладают следующими недостатками при их применении к РРТС:

1. Не учитывается распределенный и неполный характер информации. Предположим, что новые задачи возникают/обнаруживаются в процессе функционирования РРТС. Информация о таких новых задачах становится доступной только агентам, которые их обнаружили. При принятии решений о выполнении каких-либо задач агенты не обладают информацией о статусе завершенности других задач и состоянии агентов, за исключением тех задач и агентов, которые находятся в поле видимости. В процессе функционирования РРТС у части агентов может произойти отказ в работе, что приведет к необходимости выполнения назначенных им задач другими агентами. Таким образом, централизованные алгоритмы планирования неэффективны для применения в таких системах. Также РРТС обладает свойством расширяемости, что позволяет ввести новых агентов и за счет этого выполнить перепланировку/перераспределение задач.

2. Время ожидания перед выполнением задачи (процесс принятия решения) W [12]: необходимо рассматривать более детально с учетом времени на коммуникацию агентов, в том числе в условиях ограниченной дальности связи. Использование в этом случае распределенного реестра (РР) позволит уменьшить время принятия решения за счет уменьшения объема информационных потоков между агентами. При этом вырастет нагрузка на каналы связи, т.к. необходима постоянная синхронизация для получения новых данных из РР в реальном масштабе времени.

Данные недостатки актуализируют задачу разработки новых моделей описания и критериев оценки эффективности распределения и планирования задач в РРТС, учитывающих специфику децентрализованного управления, ограниченные возможности агентов РРТС, возможность возникновения новых задач, неизвестность статуса выполнения задач и состояния других агентов РРТС. Новые модели описания и критерии оценки эффективности потенциально позволят повысить эффективность разрабатываемых методов распределения и планирования задач в РРТС.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ

Модель описания распределения и планирования задач в РРТС должна включать в себя следующие компоненты:

- вектор $s \in S$ состояния модели, однозначно описывающий состояние внешней среды и РРТС, где S – множество возможных значений вектора состояния;
- функцию перехода f , позволяющую определить вектор $s'(t')$ состояния РРТС и внешней среды в следующий момент времени t' на основе вектора $s(t)$ состояния в текущий момент времени t .

Для решения выявленных проблем существующих моделей описания предлагается дополнить модель описания распределения и планирования задач в РРТС следующим образом:

1. Ввести учет распределения изначально неизвестных задач (рис. 1). На рисунке 1 крестиками обозначены агенты, белыми кружками задачи, о которых известно хотя бы одному агенту, черными кружками – задачи, о которых не известно ни одному агенту. Окружностями с пунктирными линиями обозначены области видимости агентов. На приведенном рисунке задачи 2 и 4 попадают в области видимости агентов, поэтому предполагается, что о них априорно известно агентам РРТС. Несмотря на то, что задача 1 не попадает в области видимости ни одного из агентов, о ней может быть известно изначально, либо она была обнаружена в процессе движения одним из агентов. Задачи 3 и 5 окрашены в черный цвет, потому что о них пока не известно ни одному из агентов.

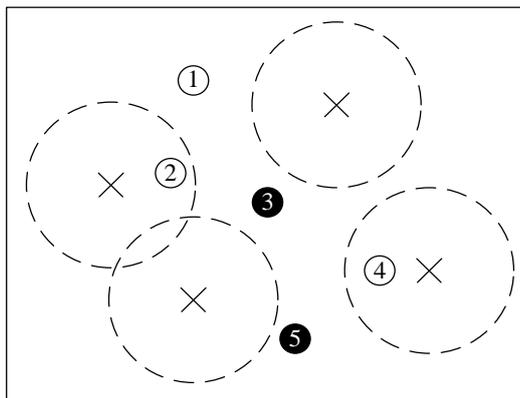


Рис. 1. Известные и неизвестные задачи

Fig. 1. Known and unknown tasks

2. Включить в состояние агентов не только их физические характеристики, такие как способность выполнять ту или иную задачу или наличие некоторого количественного ресурса, но также и состояние их информационной обеспеченности.

3. Учесть процесс распространения информации, ограниченный свойствами динамически изменяющейся топологии и пропускной способности каналов связи. Для этого в работе предложена модель описания киберфизического пространства РРТС.

4. Включить в модель описания не только количественные показатели, описывающие наличие некоторых ресурсов у агентов РРТС, но также и качественные характеристики, описывающие возможность выполнения агентами РРТС некоторых операций, зависящих от наличия/исправности необходимого бортового оборудования.

МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАДАЧ В РРТС

Для учета данных особенностей предлагается следующая модель. Пусть состояние модели s , однозначно описывающей состояние внешней среды и РРТС, включает в себя состояние внешней среды e (англ. «environment») и состояние РРТС r :

$$s = (e, r), \quad (1)$$

где $e \in \mathcal{E}$, \mathcal{E} – множество возможных состояний внешней среды; $r \in \mathcal{R}$, \mathcal{R} – множество возможных состояний РРТС.

Обозначим множество всех задач \mathcal{T} (англ. «task»), выполненных и не выполненных, известных и неизвестных, аналогично формуле (2) работы [12].

Каждая задача τ_j может быть описана следующим кортежем:

$$\tau_j = \langle p_{\tau_j}, u_{\tau_j}, d_{\tau_j} \rangle, \quad (2)$$

где p_{τ_j} – позиция задачи τ_j в геометрическом пространстве; u_{τ_j} – вектор параметров, характеризующих особенности выполнения задачи τ_j ; d_{τ_j} – статус завершенности задачи τ_j .

Позиция j -й задачи p_{τ_j} представляет собой двух- или трехмерный вектор в зависимости от размерности d задачи моделирования: $p_{\tau_j} \in \mathbb{R}^d, d \in \{2; 3\}$.

Вектор u_{τ_j} параметров, характеризующих особенности выполнения задачи τ_j , может включать в себя компоненты, описывающие качественные или количественные характеристики агентов, необходимые для выполнения задачи τ_j . Например, наличие определенного бортового оборудования, необходимый запас энергии батареи, необходимая точность позиционирования рабочего органа и т. п.

Статус d_{τ_j} завершенности задачи τ_j является переменной логического типа: $d_{\tau_j} \in \{0; 1\}$.

Состояние внешней среды e включает в себя множество всех задач \mathcal{T} и набор физических характеристик среды ϕ_e :

$$e = (\mathcal{T}, \phi_e). \quad (3)$$

Набор физических характеристик среды может включать в себя такие характеристики, как рельеф местности, карта воздушных потоков (для БПЛА), карты характеристик поверхности (для наземных мобильных РТС) и др.

Состояние РРТС r может быть описано как совокупность состояний агентов РРТС аналогично формуле (1).

Дополнительно:

- каждый агент РРТС r_i оснащен бортовым устройством управления и средством связи;
- каждый агент РРТС r_i имеет ограниченную область видимости v_i , которую можно представить в виде окружности заданного радиуса r_v с центром, совпадающим с позицией агента РРТС $x_i(t), y_i(t)$ в текущий момент времени t ;
- бортовые средства связи позволяют каждому агенту r_i получить данные о состоянии других агентов, попадающих в его область видимости, ограниченную радиусом r_v области видимости v_i ;
- каждый агент r_i ограничен информацией только о подмножестве задач $\mathcal{T}_{v_i} \subseteq \mathcal{T}$, находящихся в области видимости агента v_i .

Каждый агент r_i может быть описан следующим кортежем:

$$r_i = \langle p_{ri}, \dot{p}_{ri}, \ddot{p}_{ri}, \phi_{ri}, \rho_{ri} \rangle, \quad (4)$$

где $p_{ri}, \dot{p}_{ri}, \ddot{p}_{ri}$ – позиция, скорость и ускорение агента r_i в геометрическом пространстве; ϕ_{ri} – вектор параметров физического состояния агента r_i ; ρ_{ri} – вектор состояния информационного обеспечения агента r_i .

Аналогично с позицией задачи в геометрическом пространстве, $p_{ri}, \dot{p}_{ri}, \ddot{p}_{ri} \in \mathbb{R}^d, d \in \{2; 3\}$.

Вектор ϕ_{ai} параметров физического состояния агента a_i может включать в себя как качественные, так и количественные параметры. Примерами качественных параметров могут являться наличие и работоспособность необходимого бортового оборудования. Примерами количественных параметров являются заряд батареи, точность позиционирования рабочего органа, разрешающая способность визуального наблюдения, грузоподъемность и пр.

В рамках предлагаемой модели описания процесса распределения и планирования задач в РРТС вектор ρ_{ri} состояния информационного обеспечения агента r_i может быть описан следующим кортежем:

$$\rho_{ri} = \langle \mathcal{J}_i, r^{(i)}, S_i, \pi_i \rangle, \quad (5)$$

где \mathcal{J}_i – подмножество задач, о которых известно агенту r_i , $\mathcal{J}_i \subseteq \mathcal{J}$; $r^{(i)}$ – совокупность состояний агентов, о которых известно агенту r_i , $r^{(i)} \subseteq r$; S_i – множество элементарных участков внешней среды, которые считаются исследованными согласно представлениям агента r_i ; π_i – план агента r_i , представляющий собой последовательность задач, которые собирается выполнить агент.

Второй необходимой составляющей модели описания распределения и планирования задач в РРТС является функция перехода между состояниями модели. Пусть поведение каждого агента РРТС определяется управляющим алгоритмом c , который на основе вектора параметров физического состояния ϕ_{ri} и вектора состояния информационного обеспечения ρ_{ri} формирует предпринимаемое агентом r_i действие $a_i(t) \in \mathcal{A}$:

$$c: \Phi \times P \rightarrow \mathcal{A}, \quad (6)$$

где Φ – множество возможных значений вектора параметров физического состояния; P – множество возможных значений вектора состояния информационного обеспечения; \mathcal{A} – множество возможных действий агентов РРТС.

Введем обозначение a для совокупного действия всех агентов РРТС:

$$a = (a_i | i = \overline{1, n}). \quad (7)$$

На основе предпринятого совокупного действия a согласно некоторой функции перехода f осуществляется преобразование текущего состояния модели $s(t)$ и совокупности действий агентов РРТС в следующее состояние модели $s(t')$:

$$f(a(t), s(t)) = s(t'). \quad (8)$$

Путем подстановки выражения (1) в выражение (8) получаем следующее выражение:

$$f(a(t), e(t), r(t)) = (e(t'), r(t')). \quad (9)$$

Функция перехода f может быть разделена на две функции – закон f_e функционирования внешней среды и закон f_r функционирования РРТС:

$$f_e(a(t), e(t), r(t)) = e(t'), \quad (10)$$

$$f_r(a(t), e(t), r(t)) = r(t'). \quad (11)$$

Состояние внешней среды в следующий момент времени t' непосредственно зависит только от совокупного действия $a(t)$ всех агентов РРТС. При этом выбор совокупного действия $a(t)$ осуществляется исходя из текущего состояния РРТС $r(t)$, что обуславливает лишь косвенное влияние состояния РРТС на изменение состояния внешней среды. Исходя из этих рассуждений выражение (10) может быть переписано в виде:

$$f_e(a(t), e(t)) = e(t'). \quad (12)$$

Закон f_e функционирования внешней среды сильно зависит от контекста задачи: типа движения агентов, а также модели их функционирования. По данным причинам моделирование изменения вектора состояния внешней среды выходит за рамки предлагаемой модели описания распределения и планирования задач в РРТС. В рамках предлагаемой модели описания рассматривается только статус завершенности d_{τ_j} задачи τ_j . Значение статуса завершенности d_{τ_j} в следующий момент времени t' определяется наличием рядом i -го агента, обладающего подходящим значением вектора ϕ_{ri} параметров физического состояния агента и расстоянием не более некоторого порогового значения. Следующее состояние статуса d_{τ_j} завершенности задачи τ_j может быть описано функцией f_d :

$$f_d: \langle \tau_j, r_i \rangle \rightarrow \{0; 1\}, \quad (13)$$

где ноль соответствует статусу незавершенной задачи, а единица соответствует статусу завершенной задачи.

Путем подстановки выражения (4) в (11) получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} f_r(a(t), e(t), p(t), \dot{p}(t), \ddot{p}(t), \phi(t), \rho(t)) &= \\ &= (p(t'), \dot{p}(t'), \ddot{p}(t'), \phi(t'), \rho(t')), \end{aligned} \quad (14)$$

где p , \dot{p} и \ddot{p} – совокупности позиций, скоростей и ускорений агентов РРТС:

$$p = (p_{ri} | r_i \in r), \quad (15)$$

$$\dot{p} = (\dot{p}_{ri} | r_i \in r), \quad (16)$$

$$\ddot{p} = (\ddot{p}_{ri} | r_i \in r). \quad (17)$$

Аналогичным образом могут быть получены выражения для законов изменения позиций, скоростей и ускорений агентов, а также вектора параметров физического и информационного состояния агентов:

$$f_p(a(t), e(t), p(t), \dot{p}(t), \ddot{p}(t), \phi(t), \rho(t)) = (p(t'), \dot{p}(t'), \ddot{p}(t')), \quad (18)$$

$$f_\phi(a(t), e(t), p(t), \dot{p}(t), \ddot{p}(t), \phi(t), \rho(t)) = \phi(t'), \quad (19)$$

$$f_\rho(a(t), e(t), p(t), \dot{p}(t), \ddot{p}(t), \phi(t), \rho(t)) = \rho(t'). \quad (20)$$

Закон f_p изменения позиций, скоростей и ускорений агентов может быть смоделирован системой дифференциальных уравнений движения. Закон f_ϕ изменения вектора параметров физического состояния, как и закон f_e изменения вектора состояния внешней среды, сильно зависит от контекста моделирования. К данному закону могут быть отнесены зависимость заряда батареи от тяги двигателей или затраты любых других ресурсов. С точки зрения данной работы интерес представляет моделирование функции f_ρ перехода вектора ρ состояния информационного обеспечения агентов.

МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА РРТС

С одной стороны, наличие алгоритмов управления и обмена информацией между агентами РРТС не позволяет описать поведение РРТС системой уравнений динамики, что делает невозможным рассмотрение ее как исключительно физической системы. С другой стороны, обусловленность процессов накопления и распространения информации в РРТС

состоянием физической среды (расстояние между агентами и возможность контакта с ранее неизвестными задачами) не позволяет рассматривать РРТС как исключительно кибер-систему. Присутствие в кортеже r_i , описывающего состояние i -го агента, как вектора параметров физического состояния ϕ_{r_i} , так и вектора состояния информационного обеспечения ρ_{r_i} , обуславливает необходимость рассмотрения РРТС как киберфизической системы. Для моделирования функции f_ρ перехода вектора ρ состояния информационного обеспечения агентов в работе предлагается модель описания киберфизического пространства РРТС.

В предлагаемой модели учитываются следующие особенности процесса функционирования РРТС:

1. Каждый компонент физического и информационного состояния агентов и задач является зависимым от времени. Информационное обеспечение агентов устаревает с течением времени. Информация об одних и тех же объектах (задачах и агентах РРТС) у различных агентов может отличаться. В данном случае необходимо использовать информацию, имеющую более позднюю метку времени.

2. Все агенты РРТС обмениваются информацией при любой возможности.

3. Функция f_ρ перехода должна учитывать возможность обнаружения новых задач.

4. Возможность появления новых задач, выхода из строя или добавления новых агентов РРТС требует актуализации результатов распределения и планирования задач.

5. Устаревание информационного обеспечения агентов требует повторного распределения и планирования задач при наступлении некоторых событий-триггеров.

В рамках предлагаемой модели информация о задачах и агентах РРТС обладает следующими особенностями:

- отсутствует централизованное хранилище актуальной, полной и достоверной информации;

- вся информация распределенно хранится в одноранговой сети агентов РРТС, обладающей неполной связностью;

- при каждой возможности агенты связываются друг с другом для взаимной актуализации информации, которой они обладают;

- необходимо наличие алгоритмов слияния информации и достижения консенсуса о наиболее полной информации.

Перечисленные особенности обуславливают неприменимость классической модели с централизованным хранением информации и необходимость использования модели распределенного реестра (РР). Общим ресурсом является информация о решаемых задачах [16]. Дополнительным фактором, указывающим на перспективность использования РР в РРТС, является сходство базовых принципов организации РРТС с принципами построения распределенных систем хранения и обработки данных: децентрализация, одноранговость, масштабируемость [17]. Информационное обеспечение каждого агента может быть представлено как набор реестров. При централизованном запуске агенты обладают идентичными копиями данных реестров. Отличием РРТС от классического РР на основе интернет-технологий является отсутствие постоянной и общей сети. В процессе функционирования за счет ограниченных областей видимости и связи реестры агентов накапливают отличия. Для распространения информации используется следующая модель. Агенты перемещаются в соответствии с выбранной траекторией, по пути связываясь со всеми доступными агентами. При движении агенты собирают информацию во все реестры. При распространении информации агенты распространяют информацию и метаданные о количестве дубликатов и пр.

При выполнении некоторых условий, например попадании ранее неизвестной агенту задачи τ_j в зону видимости v_i агента r_i , задача τ_j включается в список известных агенту задач:

$$\mathcal{T}_i(t') = \mathcal{T}_i(t) \cup \{\tau_j\}. \quad (21)$$

В дальнейшем данная задача τ_j может попасть в списки известных задач других агентов при обмене информацией с агентом r_i , обнаружившим ее.

Предполагается, что после завершения задачи τ_j ее статус не может вновь измениться на «не выполнена». Поэтому при информационном обмене i -го и k -го агентов актуализация информации о состоянии задач может быть выполнена согласно следующему выражению:

$$d_i(t') = d_k(t') = d_i(t) \vee d_k(t). \quad (22)$$

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для учета введенных в моделях описания переменных состояния помимо таких критериев оценки эффективности, как суммарная длина пути q_d , суммарное время ожидания q_w и количество выполненных задач q_k , также могут дополнительно использоваться следующие критерии оценки эффективности планирования и распределения задач в РРТС:

1. Доля выполненных задач:

$$q_d = \frac{\sum_{j=1, m} d_{\tau_j}}{|\mathcal{T}|}, \quad (23)$$

где $d_{\tau_j} \in \{0; 1\}$ – статус завершенности задачи τ_j ; \mathcal{T} – множество всех задач.

Данный критерий рассчитывается в момент, когда РРТС полагает цель достигнутой и прекращает работу.

2. Осведомленность РРТС обо всех задачах. В качестве метрики данного критерия может использоваться следующее выражение:

$$q_a = \frac{\sum(t_f - t_j)}{|\mathcal{T}|t_f}, \quad (24)$$

где t_j – время обнаружения j -й задачи; t_f – общее время функционирования РРТС; \mathcal{T} – множество всех задач.

3. Частота формирования управляющих воздействий. Данный критерий косвенно учитывает вычислительную сложность работы метода управления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки предложенных моделей описания и критериев оценки эффективности распределения и планирования задач в РРТС была выполнена компьютерная симуляция. Для проведения эксперимента был разработан симулятор на языке Python. Визуализация положения задач и РРТС во внешней среде выполнена с помощью библиотеки Matplotlib. При проведении симуляции был использован компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Core i7-8550U с тактовой частотой 1,8 ГГц, 8 ГБ оперативной памяти.

В ходе симуляции в виртуальную внешнюю среду помещались n агентов РРТС, m_1 известных задач и m_2 неизвестных задач. Пример визуализации начального состояния симулятора приведен на рисунке 2.

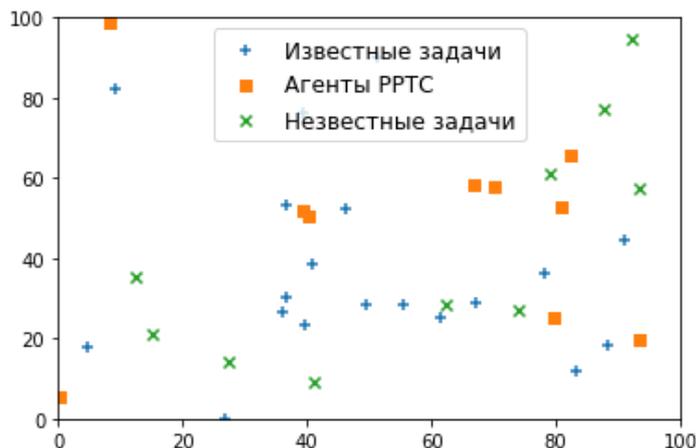


Рис. 2. Визуализация работы симулятора

Fig. 2. Visualization of the simulator work

Для выполнения распределения и планирования задач использовался метод на основе жадного алгоритма, согласно которому каждый агент РРТС выбирает задачу, ближайшую к нему. После движения и выполнения выбранной задачи или в случае ее завершения другим агентом рассматриваемый агент РРТС переходит к следующей ближайшей задаче и т.д.

В ходе экспериментального исследования была выполнена симуляция процесса распределения и планирования задач в РРТС с использованием предложенных моделей описания, а также модели-аналога [21]. Так как в модели-аналоге не подразумевается существование неизвестных задач, при симуляции с ее использованием на вход жадного алгоритма подавалась информация только об известных задачах. При симуляции с использованием предложенных моделей на вход жадного алгоритма подавалась информация об изначально известных задачах, а также об изначально неизвестных задачах, обнаруженных агентами РРТС в процессе движения к известным задачам. В ходе симуляции принималось, что изначально неизвестная задача становится известной, если попадает в окрестность агента РРТС радиуса l_r . При обнаружении новых задач агентами РРТС алгоритм распределения и планирования задач выполнялся повторно. Для получения статистически достоверных результатов симуляция была проведена k раз для каждой модели описания. Значения параметров проведения симуляции приведены в таблице 1.

Таблица 1. Условия проведения симуляции

Table 1. Simulation Conditions

Наименование параметра	Значение
Размер внешней среды l , м	100
Количество агентов РРТС n , ед.	10
Количество известных задач m_1 , ед.	20
Количество неизвестных задач m_2 , ед.	10
Радиус области видимости агентов РРТС l_r , м	2
Количество экспериментальных запусков k , ед.	1000

После каждого экспериментального запуска была выполнена оценка эффективности распределения и планирования задач в РРТС с помощью существующих и предложенных критериев. Усредненные по всем экспериментальным запускам результаты оценки эффективности приведены в таблице 2. Вследствие малой вычислительной сложности

используемых моделей описания время выполнения эксперимента и затраты памяти незначительны.

Таблица 2. Результаты эксперимента

Table 2. Experiment results

Критерий	Модель-аналог	Предложенные модели описания
Пройденная дистанция, м (существующий критерий)	624,8	662,3
Время выполнения глобальной задачи, с (существующий критерий)	136,7	151,3
Доля выполненных задач, ед. (предложенный критерий)	0,67	0,93
Осведомленность РРТС, ед. (предложенный критерий)	0,67	0,84

Как следует из результатов эксперимента, при использовании предложенных моделей описания достигается более высокое значение доли выполненных задач и осведомленности РРТС обо всех задачах. Для условий проведения симуляции, приведенных в таблице 1, при использовании предложенных моделей достигнуто повышение доли выполненных задач на 38,8 % (0,93 против 0,67) и осведомленности РРТС обо всех задачах на 25,4 % (0,84 против 0,67) по сравнению с существующими моделями описания при использовании одного и того же алгоритма распределения и планирования задач. Таким образом, результаты эксперимента демонстрируют полезность предложенных моделей описания и критериев оценки эффективности с точки зрения более детального анализа существующих методов и алгоритмов распределения и планирования задач в РРТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие модели описания и критерии оценки эффективности распределения и планирования задач в РРТС не учитывают следующие особенности функционирования РРТС в недетерминированной среде:

- переменное количество агентов РРТС вследствие возможности выхода из строя части агентов или введения дополнительных агентов для повышения результативности выполнения глобальной задачи РРТС;
- помимо полного выхода из строя какого-либо агента, возможен также отказ только части его бортовых систем;
- переменное количество задач вследствие динамически изменяющихся обстоятельств и неполноты информации в начале выполнения глобальной задачи;
- ограниченная коммуникация между агентами РРТС обуславливает невозможность получения полной информации об актуальном состоянии всех задач и агентов РРТС при распределении и планировании задач;
- ограниченные вычислительные ресурсы агентов РРТС могут не позволить хранить и обрабатывать всю доступную информацию о задачах и агентах РРТС.

Неполнота и распределенный характер информации требуют рассматривать информационное поле РРТС как киберфизическое пространство, а РРТС – как частную реализацию распределенного реестра. На основе данной идеи в работе предложены модели описания и критерии оценки эффективности распределения и планирования задач в РРТС, которые включают в себя следующие особенности:

- распределения изначально неизвестных задач;
- необходимость включения в набор переменных состояния РРТС не только физических характеристик ее агентов, но также и состояния их информационной обеспеченности;
- необходимость моделирования процесса распространения информации, ограниченного свойствами динамически изменяющейся топологии и пропускной способности каналов связи.

На основе предложенных моделей и критериев оценки эффективности эффективность существующих методов распределения и планирования задач в РПТС может быть оценена с помощью численных статистических методов, таких как метод Монте-Карло. Ожидается, что предложенные модели описания и критерии оценки эффективности будут полезны исследователям при разработке соответствующих методов распределения и планирования задач в РПТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cho J., Lim G., Biobaku T., Kim S., Parsaei H.* Safety and Security Management with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in Oil and Gas Industry // *Procedia Manufacturing*. 2015. Vol. 3. Pp. 1343–1349.
2. *Васильев И. А., Половко С. А., Смирнова Е. Ю.* Организация группового управления мобильными роботами для задач специальной робототехники // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2013. № 1(164). С. 119–123.
3. *Dai W., Lu H., Xiao J., Zeng Z., Zheng Z.* Multi-Robot Dynamic Task Allocation for Exploration and Destruction // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020. Vol. 98. No. 5. Pp. 455–479. DOI: 10.1007/s10846-019-01081-3.
4. *Ismail Z. H., Mohd G.M. H.* Systematic Literature Review of Swarm Robotics Strategies Applied to Target Search Problem with Environment Constraints // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 5. Pp. 1–6.
5. *Khamis A., Hussein A., Elmogy A.* Multi-robot Task Allocation: A Review of the State-of-the-Art // *Cooperative Robots and Sensor Networks*. 2015. P. 31–51.
6. *Пушхонов В. Х., Медведев М. Ю.* Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // *Труды СПИИРАН*. 2018. Т. 60. № 5. С. 39–63.
7. *Petrenko V. I., Tebueva F. B., Ryabtsev S. S., Gurchinsky M. M., Struchkov I. V.* Consensus achievement method for a robotic swarm about the most frequently feature of an environment // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 919. No. 4. Pp. 1–6.
8. *Yusupova N., Rizvanov D., Andrushko D.* Cyber-Physical Systems and Reliability Issues // *Proceedings of the 8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020)*. Atlantis Press, 2020. Pp. 133–137.
9. *Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Гурчинский М. М., Рябцев С. С.* Анализ технологий обеспечения информационной безопасности мультиагентных робототехнических систем с роевым интеллектом // *Наука и бизнес: пути развития*. 2020. № 4(106). С. 96–99.
10. *Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. Москва: Физматлит, 2009. 280 с.
11. *Mahmoud Zadeh S., Powers D.M. W., Bairam Zadeh R.* State-of-the-Art in UAVs' Autonomous Mission Planning and Task Managing Approach // *Autonomy and Unmanned Vehicles: Augmented Reactive Mission and Motion Planning Architecture*. Singapore: Springer Singapore. 2019. Pp. 17–30.
12. *Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Павлов А. С., Стручков И. В.* Анализ рисков нарушения информационной безопасности в роевых робототехнических системах при масштабировании численности агентов // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2022. № 2. С. 92–109.
13. *Sujit P.B., Kingston D., Beard R.* Cooperative forest fire monitoring using multiple UAVs // *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. 2007. Pp. 4875–4880.
14. *Kalyaev I., Kapustyan S., Ivanov D., Korovin I., Usachev L., Schaefer G.* A novel method for distribution of goals among UAVs for oil field monitoring // *2017 6th International Conference*

on Informatics, Electronics and Vision and 2017 7th International Symposium in Computational Medical and Health Technology, ICIEV-ISCMT 2017. 2017. Pp. 1–4.

15. *Chen X., Zhang P., Li F., Du G.* A cluster first strategy for distributed multi-robot task allocation problem with time constraints // 2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA). 2018. Pp. 102–107.

16. *Пилюхов В. Х.* Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах. Москва: Физматлит, 2015. 305 с.

17. *Еськов С. С.* Специальное математическое и программное обеспечение взаимного информационного согласования в системах распределенного реестра: дис. ... канд. техн. наук. Воронежский государственный технический университет. Воронеж, 2020. 120 с.

18. *Запечников С. В.* Системы распределенного реестра как инструмент обеспечения доверия между участниками бизнес-процессов // Безопасность информационных технологий. 2019. Т. 26. № 4. С. 37–53.

19. *Сырямкин В. И.* Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения / под ред. В. И. Сырямкина. Томск: STT, 2018. 140 с.

20. *Жуков А. О., Куликов А. К., Суворцева И. В.* Распределение задач в группе гетерогенных роботов на основе принципа «аукциона Викри» // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 4(21). С. 36–40.

21. *Motes J., Sandström R., Lee H., Thomas S., Amato N.M.* Multi-Robot Task and Motion Planning With Subtask Dependencies // IEEE Robotics and Automation Letters. 2020. Vol. 5. No. 2. Pp. 3338–3345.

22. *Schneider E., Sklar E.I., Parsons S.* Mechanism selection for multi-robot task allocation // Annual Conference Towards Autonomous Robotic Systems. 2017. Pp. 421–435.

23. *Luo L., Chakraborty N., Sycara K.* Distributed algorithms for multirobot task assignment with task deadline constraints // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2015. Vol. 12. No. 3. Pp. 876–888.

24. *Seenu N., Kuppan Chetty R.M., Ramya M.M., Janardhanan M.N.* Review on state-of-the-art dynamic task allocation strategies for multiple-robot systems // Industrial Robot. 2020. Vol. 47. No. 6. Pp. 929–942.

25. *Безумнов Д. Н., Воронова Л. И.* О распределении задач в групповой робототехнике. Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования: монография. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 155–170.

Информация об авторах

Петренко Вячеслав Иванович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой организации и технологии защиты информации, Северо-Кавказский федеральный университет;

355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1;

vip.petrenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4293-7013>

Тебуева Фариза Биляловна, д-р физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой компьютерной безопасности, Северо-Кавказский федеральный университет;

355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1;

fbtebueva@ncfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7373-4692>

Павлов Андрей Сергеевич, ст. преподаватель кафедры компьютерной безопасности, Северо-Кавказский федеральный университет;

355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1;

iosde5530@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8413-8706>

Гурчинский Михаил Михайлович, программист учебно-научной лаборатории «Робототехнические системы», Северо-Кавказский федеральный университет;

355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1;

gurcmikhail@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1739-2624>

REFERENCES

1. Cho J., Lim G., Biobaku T., Kim S., Parsaei H. Safety and Security Management with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in Oil and Gas Industry. *Procedia Manufacturing*. 2015. Vol. 3. Pp. 1343–1349.
2. Vasilyev I.A., Polovko S.A., Smirnova E.Yu. A Group of Mobile Robot Organization for Special Robotics Problems. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie* [Scientific and technical bulletin of SPbSPU. Computer science. Telecommunications. Control]. 2013. No. 1(164). Pp. 119–123. (In Russian)
3. Dai W., Lu H., Xiao J., Zeng Z., Zheng Z. Multi-Robot Dynamic Task Allocation for Exploration and Destruction. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020. Vol. 98. No. 5. Pp. 455–479.
4. Ismail Z.H., Mohd G.M.H. Systematic Literature Review of Swarm Robotics Strategies Applied to Target Search Problem with Environment Constraints. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 5. Pp. 1–6.
5. Khamis A., Hussein A., Elmogy A. Multi-robot Task Allocation: A Review of the State-of-the-Art. *Cooperative Robots and Sensor Networks*. 2015. Pp. 31–51.
6. Pshihopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Group Control of Autonomous Robots Motion in Uncertain Environment via Unstable Modes. *Robotics, Automation and Control Systems*. 2018. Vol. 60. No. 5. Pp. 39–63. (In Russian)
7. Petrenko V.I., Tebueva F.B., Ryabtsev S.S., Gurchinsky M.M., Struchkov I.V. Consensus achievement method for a robotic swarm about the most frequently feature of an environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 919. No. 4. Pp. 1–6.
8. Yusupova N., Rizvanov D., Andrushko D. Cyber-Physical Systems and Reliability Issues. *Proceedings of the 8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020)*. Atlantis Press, 2020. Pp. 133–137.
9. Petrenko V.I., Tebueva F.B., Gurchinsky M.M., Ryabtsev S.S. Analysis of Information Security Technologies for Multi-Agent Robotic Systems with Swarm Intelligence. *Science and Business: Development Ways*. 2020. No. 4(106). Pp. 96–99. (In Russian)
10. Kaljaev I.A., Gajduk A.R., Kapustjan S.G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravlenija v gruppah robotov* [Collective control models and algorithms in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009. 280 p. (In Russian)
11. Mahmoud Zadeh S., Powers D.M.W., Bairam Zadeh R. State-of-the-Art in UAVs' Autonomous Mission Planning and Task Managing Approach. *Autonomy and Unmanned Vehicles: Augmented Reactive Mission and Motion Planning Architecture*. Singapore: Springer Singapore. 2019. Pp. 17–30.
12. Petrenko V.I., Tebueva F.B., Pavlov A.S., Struchkov I.V. Analysis of risks of information security breach in swarm robotic devices when scaling the number of agents. *Caspian Journal of Management and High Technologies*. 2022. Vol. 2. Pp. 92–109. (In Russian)
13. Sujit P.B., Kingston D., Beard R. Cooperative forest fire monitoring using multiple UAVs. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. 2007. Pp. 4875–4880.
14. Kalyaev I., Kapustyan S., Ivanov D., Korovin I., Usachev L., Schaefer G. A novel method for distribution of goals among UAVs for oil field monitoring. *2017 6th International Conference on Informatics, Electronics and Vision and 2017 7th International Symposium in Computational Medical and Health Technology, ICIEV-ISCMHT 2017*. 2018. Pp. 1–4.
15. Chen X., Zhang P., Li F., Du G. A cluster first strategy for distributed multi-robot task allocation problem with time constraints. *2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA)*. 2018. Pp. 102–107.
16. Pshihopov V. Kh. *Gruppovoye upravleniye podvizhnymi ob'yektami v neopredelennykh sredakh* [Group control of mobile objects in indefinite environments]. Moscow: Fizmatlit, 2015. 305 p. (In Russian)

17. Eskov S.S. Special mathematical and software support for mutual information coordination in distributed ledger systems: Ph.D. Thesis. *Voronezh State Technical University*. Voronezh, 2020. 120 p. (In Russian)
18. Zapechnikov S.V. Distributed ledger systems as a tool for ensuring trust between participants in business processes. *Security of Information Technologies*. 2019. Vol. 26. No. 4. Pp. 37–53. (In Russian)
19. Syryamkin V.I. *Kollektivy intellektual'nyh robotov. Sfery primeneniya* [Collectives of intelligent robots. Spheres of application]. Tomsk: STT, 2018. 140 p. (In Russian)
20. Zhukov A.O., Kulikov A.K., Surovtceva I.V. Task distribution in a group of heterogeneous robots based on Vickrey auction principle. *Robotics and technical cybernetics*. 2018. Vol. 4. No. 21. Pp. 36–40. (In Russian)
21. Motes J., Sandström R., Lee H., Thomas S., Amato N. M. Multi-Robot Task and Motion Planning With Subtask Dependencies. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020. Vol. 5. No. 2. Pp. 3338–3345.
22. Schneider E., Sklar E.I., Parsons S. Mechanism selection for multi-robot task allocation. *Annual Conference Towards Autonomous Robotic Systems*. 2017. Pp. 421–435.
23. Luo L., Chakraborty N., Sycara K. Distributed algorithms for multirobot task assignment with task deadline constraints. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2015. Vol. 12. No. 3. Pp. 876–888.
24. Seenu N., Kuppan Chetty R.M., Ramya M.M., Janardhanan M.N. Review on state-of-the-art dynamic task allocation strategies for multiple-robot systems. *Industrial Robot*. 2020. Vol. 47. No. 6. Pp. 929–942.
25. Bezumnov D.N., Voronova L.I. *O raspredelenii zadach v gruppovoj robototekhnike* [On task distribution in group robotics]. *Innovacionnoe razvitie: potencial nauki i sovremennogo obrazovaniya: monografija*. Penza: Nauka i Prosveshhenie, 2021. Pp. 155–170. (In Russian)

Information about the authors

- Petrenko Vyacheslav Ivanovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Organization and Technology of Information Security, North-Caucasus Federal University; 355017, Russia, Stavropol, 1 Pushkin street; vip.petrenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4293-7013>
- Tebueva Fariza Bilyalovna**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Security, North-Caucasus Federal University; 355017, Russia, Stavropol, 1 Pushkin street; ftebueva@ncfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7373-4692>
- Pavlov Andrey Sergeevich**, Senior Lecturer, Department of Computer Security, North-Caucasus Federal University; 355017, Russia, Stavropol, 1 Pushkin street; losde5530@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8413-8706>
- Gurchinsky Mikhail Mikhailovich**, Programmer of the educational and scientific laboratory "Robotic Systems", North-Caucasus Federal University; 355017, Russia, Stavropol, 1 Pushkin street; gurmikhail@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1739-2624>