

ОБНАРУЖЕНИЕ НАРУШИТЕЛЯ АГЕНТАМИ РОЕВЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

М. М. Гурчинский • Ф. Б. ТЕБУЕВА

Аннотация. В статье представлен обзор исследования роевых робототехнических систем (РРТС), используемых в составе системы охраны периметра объектов с протяженными границами для обнаружения нарушителя. Целью исследования является повышение оперативности обнаружения нарушителя агентами РРТС, используемых в составе системы охраны периметра объектов с протяженными границами, в условиях изменяющегося множества задач в ходе поиска нарушителя и фиксации его местоположения до прибытия группы реагирования на основе роевых методов распределения и планирования выполнения задач с использованием искусственных нейронных сетей и распределенного реестра. Предмет исследования – научно-методический аппарат роевого распределения и планирования выполнения задач агентами роевых робототехнических систем в условиях изменяющегося множества задач в ходе поиска нарушителя и фиксации его местоположения до прибытия группы реагирования. Разрабатывается научно-методический аппарат роевого распределения и планирования выполнения задач агентами РРТС, обеспечивающий повышение оперативности обнаружения нарушителя агентами РРТС, функционирующих в составе системы охраны периметра объектов с протяженными границами, при динамическом множестве задач в рамках поиска нарушителя и фиксации его местоположения до прибытия группы реагирования. Проведена декомпозиция общей задачи и определены частные задачи исследования: 1. Разработать модели описания процесса распределения и планирования выполнения задач между агентами РРТС для повышения оперативности обнаружения нарушителя на территории объекта с протяженными границами. 2. Разработать метод распределения и планирования выполнения динамического множества задач агентами РРТС для повышения оперативности обнаружения нарушителя на территории объекта с протяженными границами. 3. Разработать метод трансферного обучения агентов РРТС для обеспечения масштабируемости по критериям количества агентов и протяженности границ территории охраняемого объекта путем миграции знаний об успешных вариантах распределения и планирования выполнения динамического множества задач. 4. Разработать метод синтеза системы распределения и планирования выполнения динамического множества задач агентами РРТС на основе коллективного принятия решения, обеспечивающего повышение оперативности обнаружения нарушителя на территории объекта с протяженными границами. Для решения этих задач использованы методы системного анализа, оптимизации, математический аппарат искусственных нейронных сетей и технология распределенного реестра. Моделирование и вычислительный эксперимент проведены с использованием языка программирования высокого уровня Python, а также с применением симулятора мульти-агентных робототехнических систем ARGoS.

Ключевые слова: роевые робототехнические системы; распределение и планирование выполнения задач; трансферное обучение агентов роевых робототехнических систем для миграции знаний.

ВВЕДЕНИЕ

С помощью робототехнических средств могут быть эффективно решены задачи охраны и мониторинга транспортных, оборонных, энергетических и химических объектов [1]. Анализ существующих систем охраны периметра показал, что существенная протяженность границ территории охраняемых объектов (например, аэродромы, пограничные зоны, промышленные или военные объекты и т. д.) характеризуется труднодоступностью и опасностью для человека, что делает применение робототехнических средств в составе систем охраны периметра таких объектов целесообразным и экономически обоснованным.

При решении задач охраны периметра объектов с протяженными границами становится актуальным применение мультиагентных робототехнических систем (МРТС). 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). Характерными особенностями систем подобного рода являются: 1) полностью децентрализованная система управления. Ожидаемое поведение агентов РРТС достигается за счет использования принципов самоорганизации агентов; 2) ограниченные возможности вычислительных устройств агентов, а также бортовых датчиков и сенсоров. Однако в настоящее время системы управления робототехническими средствами, используемые в составе систем охраны периметра, имеют преимущественно централизованный характер, что приводит к уменьшению оперативности обнаружения нарушителей при проникновении на территорию охраняемого объекта [2].

Анализ систем управления робототехническими средствами, используемыми в составе существующих систем охраны периметра, показал, что важным фактором, влияющим на эффективность функционирования робототехнических средств, являются процедуры распределения и планирования выполнения задач, которые в централизованной системе управления реализуются на центральном вычислительном устройстве, что не позволяет робототехническим средствам оперативно подстраиваться под изменения или воздействия среды функционирования в процессе выполнения задач.

Исходя из проведенного анализа следует противоречие в практике – существующие системы охраны периметра с использованием робототехнических средств не обеспечивают требуемой оперативности обнаружения нарушителя в условиях недетерминированной среды функционирования. В существующих системах охраны периметра с использованием робототехнических средств среда функционирования является недетерминированной, так как одновременно функционирует множество агентов, а список задач изменяется динамически в процессе их функционирования.

РАЗРАБОТАННОСТЬ ТЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Значительный научный вклад в исследования в области групповой робототехники, в том числе РРТС, внесли такие выдающиеся отечественные и зарубежные исследователи, как Д. А. Поспелов, Е. И. Юревич, И. А. Каляев, Р. А. Мунасыпов, С. Г. Капустян, А. Р. Гайдук, В. Е. Павловский, В. И. Городецкий, В. В. Истомин, В. Э. Карпов, В. И. Меркулов, В. Х. Пшихопов, Г. Е. Веселов, К. Рейнольдс (C.W. Reynolds), М. Дориго (M. Dorigo), М. А. Льюис (M. A. Lewis), Ф. Хиггинс (F. Higgins) и др.

Анализ существующих публикаций в исследуемой предметной области позволил сформулировать противоречие в науке – существующие математическое и алгоритмическое обеспечение, методы и алгоритмы распределения и планирования выполнения задач не позволяют обеспечить требуемую эффективность функционирования РРТС в составе системы охраны периметра по критерию оперативности выполнения задач в условиях недетерминированной среды функционирования.

Объектом данного исследования являются РРТС, используемые в составе системы охраны периметра объектов с протяженными границами для обнаружения нарушителя. Целью исследования является повышение оперативности обнаружения нарушителя агентами РРТС, используемых в составе системы охраны периметра объектов с протяженными границами, в условиях изменяющегося множества задач в ходе поиска нарушителя и фиксации его местоположения до прибытия группы реагирования на основе роевых методов распределения и планирования выполнения задач с использованием искусственных нейронных сетей и распределенного реестра. Предметом исследования является научно-методический аппарат роевого распределения и планирования выполнения задач агентами роевых робототехнических систем в условиях изменяющегося множества задач в ходе поиска нарушителя и фиксации его местоположения до прибытия группы реагирования.

Таким образом, научная задача исследования состоит в разработке научно-методического аппарата роевого распределения и планирования выполнения задач агентами РРТС, обеспечивающих повышение оперативности обнаружения нарушителя агентами РРТС, функционирующих в составе системы охраны периметра объектов с протяженными границами, при динамическом множестве задач в рамках поиска нарушителя и фиксации его местоположения до прибытия группы реагирования. Для решения общей научной задачи проведена ее декомпозиция и определены частные задачи исследований:

1. Разработать модели описания процесса распределения и планирования выполнения задач между агентами РРТС для повышения оперативности обнаружения нарушителя на территории объекта с протяженными границами.

2. Разработать метод распределения и планирования выполнения динамического множества задач агентами РРТС для повышения оперативности обнаружения нарушителя на территории объекта с протяженными границами.

3. Разработать метод трансферного обучения агентов РРТС для обеспечения масштабируемости по критериям количества агентов и протяженности границ территории охраняемого объекта путем миграции знаний об успешных вариантах распределения и планирования выполнения динамического множества задач.

4. Разработать метод синтеза системы распределения и планирования выполнения динамического множества задач агентами РРТС на основе коллективного принятия решения, обеспечивающего повышение оперативности обнаружения нарушителя на территории объекта с протяженными границами.

Данная работа является частью научных исследований, проводимых СКФУ, получила поддержку РФФИ «Аспиранты», проект № 20-37-90026, по теме «Разработка методов и алгоритмов распределения задач в роевых робототехнических системах на основе искусственных нейронных сетей и технологии распределенного реестра».

АНАЛИЗ ОПЕРАТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЕЙ СИСТЕМАМИ ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРА ОБЪЕКТОВ С ПРОТЯЖЕННЫМИ ГРАНИЦАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В результате проведенного системного анализа роли и места РРТС в системе защиты периметра охраняемого объекта, а также анализа факторов, влияющих на оперативность обнаружения нарушителя, установлено, что в существующих системах защиты периметра, используемые в настоящее время робототехнические средства не обеспечивают требуемой оперативности обнаружения нарушителя. Анализ возможных путей достижения практической цели исследования выявил ряд альтернативных способов повышения оперативности обнаружения нарушителя на территории охраняемого объекта, представленных на рис. 1.

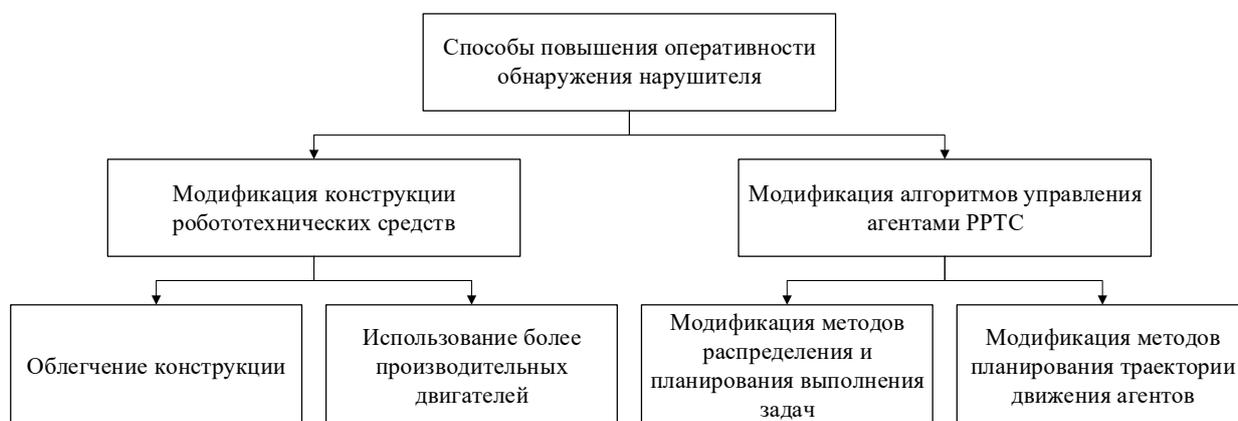


Рис. 1 Способы повышения оперативности обнаружения нарушителя на территории охраняемого объекта.

Анализ и оценка альтернативных путей достижения цели показали целесообразность решения задачи повышения оперативности обнаружения нарушителя на территории охраняемого объекта за счет модификации методов распределения и планирования выполнения задач. Для обеспечения эффективного решения поставленной общей научной задачи целесообразно осуществить ее декомпозицию на частные научные задачи с использованием метода построения «дерева целей», схематическое представление которой дано на рис. 2.



Рис. 2 Дерево целей исследования.

Содержательная формулировка научной задачи исследования состоит в следующем.

Дано: R – РРТС; X – множество входных параметров; Y – множество выходных параметров; Z – множество внутренних параметров системы; E – множество параметров среды и условий функционирования; Q – множество показателей эффективности функционирования системы; q_1, \dots, q_n – контролируемые показатели эффективности функционирования системы.

Требуется: разработать научно-методический аппарат M обеспечения минимизации параметров эффективности функционирования системы q_1, \dots, q_n ($q_i \in Q, i = 1 \dots n$) в диапазоне

значений входных и выходных параметров (X, Y) системы за счет варьирования значений ее внутренних параметров Z и при ограничениях на значения параметров среды $E \subseteq E_{\text{доп}}$.

Для решения общей научной задачи выполнена ее декомпозиция на 4 частные научные задачи, обоснована последовательность решения общей научной задачи и логическая взаимосвязь частных научных задач (см. рис. 2).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПЛАНИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МНОЖЕСТВА ЗАДАЧ АГЕНТАМИ РРТС

Первая частная задача исследования направлена на разработку моделей описания процесса распределения и планирования выполнения задач в РРТС [3]. Модель описания процесса распределения и планирования выполнения задач в РРТС должна включать в себя компоненты: вектор $s \in S$ состояния модели, описывающий состояние внешней среды и РРТС; функция перехода f состояния РРТС и внешней среды в следующий момент времени t' на основе вектора $s(t)$ состояния в текущий момент времени t .

Для решения выявленных недостатков существующих моделей предлагается дополнить модель описания процесса распределения и планирования выполнения задач в РРТС следующим образом.

1. Ввести учет распределения изначально неизвестных задач.
2. Включить в состояние агентов не только технические характеристики (способность выполнять ту или иную задачу, наличие некоторого количественного ресурса, состояние информационной обеспеченности ресурса и др.).
3. Учесть процесс распространения информации. Для этого предложена модель описания киберфизического пространства РРТС.
4. Включить в модель описания как количественные показатели, так и качественные характеристики.

Пусть состояние модели s , однозначно описывающей состояние внешней среды и РРТС, включает в себя состояние внешней среды e и состояние РРТС r :

$$s = (e, r), \tag{1}$$

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} , выполненных и не выполненных, известных и неизвестных. Каждая задача τ_j описывается кортежем:

$$\tau_j = \langle p_{\tau_j}, u_{\tau_j}, d_{\tau_j} \rangle, \tag{2}$$

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

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

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

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

Состояние РРТС r описывается как совокупность состояний агентов РРТС. Каждый агент r_i описывается следующим кортежем:

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

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 .

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

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

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

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.

Предлагается в модели описания переменных состояния помимо критериев оценки эффективности суммарной длины пути q_d , суммарного времени ожидания q_w и количества выполненных задач q_k дополнительно ввести критерии оценки эффективности планирования и распределения задач в РРТС:

1. Доля выполненных задач

$$q_d = \frac{\sum_{j=1, m} d_{\tau_j}}{|\mathcal{T}|}, \quad (7)$$

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

2. Осведомленность РРТС обо всех задачах

$$q_a = \frac{\sum (t_f - t_j)}{|\mathcal{T}| t_f}, \quad (8)$$

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

3. Частота формирования управляющих воздействий.

Полученные модели описания процесса распределения и планирования выполнения задач в РРТС необходимы для работы метода распределения и планирования выполнения динамического множества задач агентами РРТС, а также метода трансферного обучения агентов РРТС, соответствующих второй и третьей частным научным задачам.

Вторая частная задача связана с разработкой метода распределения и планирования выполнения задач агентами РРТС в условиях недетерминированной среды функционирования [4]. Содержательная постановка научной задачи: необходимо разработать метод M распределения и планирования выполнения задач агентами РРТС R по показателям q_1, \dots, q_k в диапазоне значений входных и выходных параметров (T, Y) системы за счет варьирования значений ее внутренних параметров Z и при ограничениях на значения параметров среды $E \subseteq E_{\text{доп}}$ [5].

Каждая задача $o_j \in O, j = \overline{1, m}$ представляет собой вектор $[x_j, y_j, t_j, f_j]$, где x_j, y_j – координаты задачи o_j , t_j – метка времени, к которой задача должна быть выполнена (дедлайн), f_j – коэффициент для расчета штрафа за выполнение задачи после дедлайна. Значение штрафа F_j за невыполнения задачи в срок вычисляется следующим образом:

$$F_j = (c_j - t_j)f_j, \tag{9}$$

где c_j – время завершения выполнения задачи o_j .

В рамках решения настоящей научной задачи вся карта рабочей области охраняемого объекта представляется в виде поля, разбитого на клетки, где совокупность этих клеток представляет собой множество P , содержащее как позиции задач $p_j = x_j, y_j, j = \overline{1, m}$, так и m' позиций перемещения агентов РРТС $p_r = x_r, y_r, r = \overline{m + 1, m'}$ (приведенные координаты x_j, y_j и x_r, y_r являются координатами центров клеток).

Разработанный метод включает в себя две последовательные процедуры: 1) предобработка исходного множества задач, 2) распределение и планирование последовательности выполнения задач агентами РРТС [4].

Процедура предобработки исходного множества задач реализована по аналогии работы со связным списком, то есть текущий элемент списка явно указывает на следующий элемент. Для этого выполняется перестановка элементов множества O в таком порядке, при котором для заданной функции упорядочения S справедливо соотношение

$$S(t_1) \leq S(t_2) \leq \dots \leq S(t_m). \tag{10}$$

В результате выполнения сортировки будет сформирован список L , в самом начале которого расположены ряд задач, которые должны быть выполнены в первую очередь. Обозначим первые n задач списка L как «горящие». Следующим шагом является поиск для каждой задачи o_j списка L ближайшей задачи в геометрическом пространстве и добавление ее в качестве «указателя» o_j^{ptr} к задаче o_j . При этом в качестве указателя o_j^{ptr} могут рассматриваться только задачи, которые располагаются в списке L после задачи o_j :

$$\forall o_j: \min (D(o_j, o_l)) \Rightarrow o_j^{ptr} = o_l; l = \overline{j + 1, m}; j = \overline{1, m}, \tag{11}$$

где $D(o_j, o_l)$ – функция вычисления расстояния между двумя задачами.

Возникновение неизвестной ранее задачи может произойти в любой момент времени [6]. Введём термин «транзитная» задача для любых задач, которые могут быть выполнены «по пути» к выполнению задачи-указателя без получения штрафа агентом. Выбор транзитной задачи осуществляется согласно функции:

$$\min ((c_l + c_j^{ptr}) \leq t_j^{ptr}), l = \overline{1, m}, \tag{12}$$

где $(c_l + c_j^{ptr})$ – время завершения выполнения задачи-указателя после выполнения транзитной задачи.

Процедура распределения и планирования последовательности выполнения задач с использованием вычислительных платформ агентов РРТС реализуется на основе метода мультиагентного обучения с подкреплением [7–9]. Расчет значения потенциального штрафа за нарушение дедлайна при выполнении задачи o_j основывается на формуле (9), при этом отличие состоит в том, что время завершения задачи c_j рассчитывается «грубо» в зависимости от расстояния от позиции завершения выполнения текущей задачи b_c (или позиции агента) до позиции начала выполнения следующей задачи a_n , а также расстояния от позиции начала выполнения текущей задачи a_n до позиции завершения выполнения задачи b_n . Расчет потенциального штрафа z_j за нарушение дедлайна при выполнении задачи o_j имеет вид

$$z_j = \left(\frac{D(b_c, a_n) + D(a_n, b_n)}{v} - t_j \right) p_j, \tag{13}$$

где v – скорость перемещения агентов (представляет собой константу, и это значение одинаково для всех агентов РРТС).

В случае, если задача o_j уже выполнена или выполняется в текущий момент времени другим агентом, то значение потенциального штрафа z_j будет равно нулю.

Разработанный метод распределения и планирования выполнения динамического множества задач агентами РРТС используется для генерации обучающей выборки в рамках работы метода трансферного обучения агентов РРТС, соответствующего третьей частной задаче.

МЕТОДЫ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО МНОЖЕСТВА ЗАДАЧ АГЕНТАМИ РРТС

Третья частная задача исследования направлена на разработку метода трансферного обучения агентов РРТС для миграции знаний об успешных вариантах распределения и планирования выполнения задач [10].

Содержательная постановка научной задачи: необходимо разработать метод M обеспечения требуемых значений $q_1^{\text{TP}}, \dots, q_k^{\text{TP}}$ показателей качества функционирования РРТС $q_1, \dots, q_k, (\forall q_i \geq q_i^{\text{TP}}, q_i \in Q, i = 1, \dots, k)$ в диапазоне значений входных и выходных параметров (R, Y) за счет варьирования значений внутренних параметров Z в условиях изменяющихся параметров среды $e_1, \dots, e_M, (e_j \in E, j = 1, \dots, M)$.

Под условиями изменяющихся параметров среды $e_1, \dots, e_M, (e_j \in E, j = 1, \dots, M)$ понимается результат изменения конфигурации территории охраняемого объекта, вследствие чего возможно увеличение количества задач $m' = m + h$, где h – количество новых задач и соответственно увеличение количества позиций множества $P, N' = N + h$.

В рамках реализации трансферного обучения основная идея состоит в том, чтобы синтезировать такую структуру ИНС, которая объединит энкодер, метод-прототип и декодер. Энкодер предназначен для сжатия данных, которые подаются на вход исходной модели $\mu_{\text{исх}}$, которая осуществляет ранжирование срочности выполнения задач, а декодер выполняет отображение результата ранжирования задач в сжатом виде на текущее множество задач O . При этом входной слой энкодера и выходной слой декодера имеют размерности $m' + 1$ (с учетом позиции агента) и m' соответственно, а слои исходной ИНС $\mu_{\text{исх}}$ без изменений функционируют с размерностью m .

Ввиду того что обучение исходной модели ИНС $\mu_{\text{исх}}$ выполнялось на меньшей размерности задач, для обучения энкодера и декодера необходимо подготовить новый набор данных путем симуляции РРТС в новых условиях среды с использованием аналитической версии метода, разработанного ранее. Пусть $S = S_1, \dots, S_n$ – множество решений, полученных при использовании аналитической версии метода распределения и планирования задач при моделировании n агентов РРТС. Каждый элемент $S_i, i = 1, \dots, n$ представляет собой множество, состоящее из множества результатов выбора агентом r_i задачи для выполнения, то есть $S_i = s_1, \dots, s_{m'}$. В свою очередь, каждый результат выбора задачи агентом r_i будет содержать позицию агента p_{r_i} на момент выбора задачи, значение потенциального штрафа z_j за нарушение дедлайна при выполнении каждой из задач $o_j \in O, j = 1, \dots, m'$, а также индекс задачи, которая была выбрана для выполнения $u \in [1, m']$, то есть $s_j = p_{r_i}, z_1, \dots, z_{m'}, u$. Каждый из результатов выбора задачи $s_j, j = 1, \dots, m'$ будет непосредственно использован для обучения новых слоев ИНС $\mu_{\text{тр}}$. Процесс обучения ИНС полностью соответствует методу-прототипу.

Разработанный метод трансферного обучения агентов РРТС в совокупности с методом распределения и планирования выполнения динамического множества задач агентами РРТС (соответствующим второй частной задаче) лежит в основе метода синтеза системы распределения и планирования выполнения динамического множества задач агентами РРТС, соответствующего четвертой частной научной задаче (см. рис. 2).

Четвертая частная задача направлена на разработку системы распределения и планирования выполнения задач агентами РРТС на основе коллективного принятия решения [11]. Содержательная (вербальная) постановка научной задачи: необходимо синтезировать метод M обеспечения минимизации выходных параметров системы $y_1, \dots, y_N, (y_i \in Y, i = 1, \dots, N)$ в диапазоне значений входных параметров X за счет варьирования значений внутренних параметров Z .

Совокупность разработанных решений может быть представлена в виде системы распределения и планировании выполнения задач (СРПВЗ). Входными данными для СРПВЗ являются как набор задач, который по каналу связи передает оператор, так и те задачи, которые могут быть сформированы оператором системы комплексной безопасности [12].

Интеграция в СРПВЗ процедуры КПР для достижения консенсуса (ДК) в процессе распределения задач предназначена для выбора наилучшего решения, в дальнейшем альтернативы \hat{a}_q , из множества доступных альтернатив a_q агенту r_i . Множество альтернатив A представляет собой множество, содержащее q альтернатив $a_g, A = a_1, \dots, a_q$, элементами которого являются все возможные упорядоченные пары элементов подмножеств O и R :

$$A = O \times R = \left\{ (o_j; r_i) \mid o_j \in O, r_i \in R \right\}. \tag{14}$$

ДК считается успешным, если выполняются 2 условия [13]:

- РРТС достигает консенсуса относительно определенной альтернативы a_g в процессе КПР;
- альтернатива, относительно которой достигнут консенсус, связана с наилучшей альтернативой \hat{a}_q .

Наилучшей альтернативой \hat{a}_q является альтернатива, характеризующаяся наибольшей полезностью P_g . Мера полезности P_g показывает, сколько времени потребуется агенту r_i , чтобы приступить к выполнению задачи o_j , и рассчитывается на основании вычисления расстояния от агента r_i до зоны выполнения задачи относительно как самого агента r_i , так и для соседних агентов в области видимости.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЯ

Совокупность разработанных решений может быть представлена в виде системы распределения и планировании выполнения задач (СРПВЗ), представленной на рис. 3.

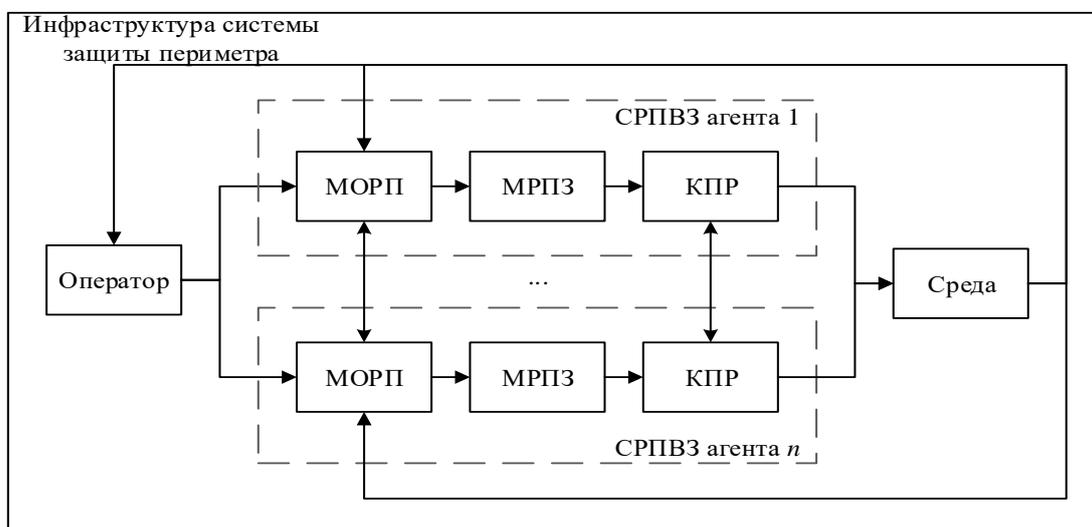


Рис. 3 Схематическое представление СРПВЗ с использованием КПР.

Входными данными для СРПВЗ являются: передаваемый оператором по каналу связи набор задач, сформированные оператором системы комплексной безопасности задачи. Агенты РРТС преобразуют набор входных данных в абстракцию с использованием результатов решения первой частной научной задачи – моделей описания процесса распределения и планирования (МОПП) выполнения задач. Это позволяет применять результат решения второй частной научной задачи – метод распределения и планирования задач (МРПЗ) как при начальном распределении задач, так и при повторном распределении задач в процессе функционирования агентов РРТС. При увеличении численности используемых агентов или изменении рабочей области охраняемого объекта в СРПВЗ необходимо использовать результат решения третьей частной научной задачи – метода трансферного обучения (МТО).

Для оценки эффективности функционирования СРПВЗ с использованием КПП проведено имитационное моделирование с применением симулятора мультиагентных робототехнических систем ARGoS. При имитационном моделировании использовались типовое значение количества агентов (50 шт.) и типовое значение размеров охраняемого объекта (4000×4000 м²). Результаты сравнения с методом-аналогом (МА) приведены в таблице.

Таблица

Показатели качества выполнения задач агентами РРТС

Критерий	МА	СРПВЗ с КПП	Улучшение, %
Оперативность, с	176.2	147.0	16.6
Количество задач, завершенных с нарушением дедлайна, %	32.0	29.7	7.2
Суммарное значение штрафа за нарушение дедлайна, ед.	43.7	43.3	0.9

Согласно результатам, представленным в таблице, использование предложенного решения позволяет повысить оперативность обнаружения нарушителя в среднем на 16.6% (176.2 с против 147.0 с) по сравнению с системой-аналогом. Помимо этого, наблюдается уменьшение количества задач, завершенных с нарушением дедлайна, полученная разница составила 7.2% (32.0% против 29.7%). А суммарное значение штрафа за нарушение дедлайна имеет сопоставимый результат, разница составила 0.9% (43.7 ед. против 43.3 ед.) в пользу СРПВЗ с использованием КПП. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что СРПВЗ с процедурой КПП обеспечивает повышение оперативности обнаружения нарушителя агентами РРТС в составе системы охраны периметра объектов с протяженными границами в условиях изменяющегося множества задач за счет применения разработанных решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью разработанных моделей описания процесса распределения и планирования выполнения задач удалось повысить долю выполненных задач на 38.8%. Применение разработанного метода распределения и планирования выполнения динамического множества задач агентами РРТС позволило повысить оперативность обнаружения нарушителя на территории охраняемого объекта с протяженными границами на 12.1% по сравнению с методом-аналогом. Применение разработанного метода трансферного обучения агентов РРТС путем миграции знаний об успешных вариантах распределения и планирования выполнения динамического множества задач обеспечивает повышение оперативности обнаружения нарушителя при изменении размеров территории охраняемого объекта и количества агентов РРТС на величину до 4.5%. Применение разработанного метода синтеза системы распределения и планирования выполнения динамического множества задач агентами РРТС на основе коллективного принятия решения позволило обеспечить повышение оперативности обнаружения нарушителя на территории охраняемого объекта с протяженными границами на 16.6% по сравнению с аналогом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Миронов К. В. Transport-by-Throwing – робототехнический способ перемещения предметов перебросом: обсуждение научно-технической задачи // СИИТ. 2024. Т. 6. № 1(16). С. 43-58. EDN QGFZBW. [[Mironov K. V. "Transport-by-Throwing – a robotic method of moving objects by throwing discussion of the scientific and technical problem" // SIIT. 2024. Vol. 6, No. 1(16), pp. 43-58. EDN QGFZBW. (In Russian).]]
2. Муслимов Т. З. Методы и алгоритмы группового управления беспилотными летательными аппаратами самолетного типа // СИИТ. 2024. Т. 6. № 1(16). С. 3-15. EDN HOTUZU. [[Muslimov T. Z. "Methods and algorithms for group control of aircraft-type unmanned aerial vehicles" // SIIT. 2024. Vol. 6, No. 1(16), pp. 3–15. EDN HOTUZU. (In Russian).]]
3. 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. EDN HYMDLU. [[Petrenko V. I., Tebueva F. B., Pavlov A. S., Gurchinsky M. M. "Models for describing and criteria for assessing the efficiency of task distribution and planning in swarm robotic systems" // Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2022. No. 5(109), pp. 58-72. DOI 10.35330/1991-6639-2022-5-109-58-72. EDN HYMDLU. (In Russian).]]
4. Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Павлов А. С., Гурчинский М. М. Метод распределения и планирования выполнения задач агентами роевых робототехнических систем в условиях недетерминированной среды // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 3(59). С. 25-43. DOI 10.54398/20741707_2022_3_25. EDN AFNZHE. [[Petrenko V. I., Tebueva F. B., Pavlov A. S., Gurchinsky M. M. "Method of distribution and planning of tasks execution by agents of swarm robotic systems in conditions of non-deterministic environment" // Caspian Journal: Management and High Technologies. 2022. No. 3(59), pp. 25-43. DOI 10.54398/20741707_2022_3_25. EDN AFNZHE. (In Russian).]]
5. Ryabtsev S., Gurchinskiy M., Tebueva F., Struchkov I., Petrenko V., Makarenko S. Feature importance evaluation method for multi-agent deep reinforcement learning in advanced robotics task allocation // Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics: 27th. Virtual. Online. January 20–23, 2022. Virtual. Online. 2022. P. 695-698. EDN OYEVIV.
6. Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Гурчинский М. М., Павлов А. С. Алгоритм планирования последовательности выполнения задач агентами роевых робототехнических систем в условиях неполноты информации // Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов: Сб. мат-лов V Международной научно-практической конференции, Москва, 23 сентября 2022 г. СПб.: Печатный цех, 2022. С. 160-169. EDN ZGUMDI. [[Petrenko V. I., Tebueva F. B., Gurchinsky M. M., Pavlov A. S. "Algorithm for planning the sequence of task execution by agents of swarm robotic systems in conditions of incomplete information" // Development of Modern Science and Technology in the Context of Transformation Processes: Collection of materials of the V International scientific and practical conference, Moscow, September 23, 2022. St. Petersburg: Printing Shop, 2022, pp. 160-169. EDN ZGUMDI. (In Russian).]]
7. Petrenko V., Gurchinskiy M. Multi-agent deep reinforcement learning concept for mobile cyber-physical systems control // E3S Web of Conferences. Almaty. May 20–21, 2021. Almaty, 2021. DOI 10.1051/e3sconf/202127001036. EDN CHMBYU.
8. Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Гурчинский М. М., Антонов В. О. Метод управления робототехническим комплексом на основе глубокого обучения с подкреплением рекуррентных нейронных сетей для автоматического сбора тепличных культур // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITTDS'2020): Труды VIII Всероссийской научной конференции (с приглашением зарубежных ученых). В 2-х тт. Уфа, 06-09 октября 2020 г. Т. 2. Уфа: УГАТУ, 2020. С. 78-85. EDN MSGHTL. [[Etenko V. I., Tebueva F. B., Gurchinsky M. M., Antonov V. O. "Method of controlling a robotic complex based on deep learning with reinforcement of recurrent neural networks for automatic harvesting of greenhouse crops" // Information Technologies for Intelligent Decision Support (ITTDS'2020): Proceedings of the VIII All-Russian scientific conference (with invitation of foreign scientists). In 2 volumes., Ufa, October 06–09, 2020. Volume 2. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2020. Pp. 78–85. EDN MSGHTL. (In Russian).]]
9. Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Гурчинский М. М., Свистунов Н. Ю., Павлов А. С. Алгоритм машинного обучения системы управления антропоморфными манипуляторами // СИИТ. 2021. Т. 3. № 2(6). С. 35-43. DOI 10.54708/26585014_2021_32635. EDN USZJSM. [[Petrenko V. I., Tebueva F. B., Gurchinsky M. M., Svistunov N. Yu., Pavlov A. S. "Machine learning algorithm for the control system of anthropomorphic manipulators" // SIIT. 2021. Vol. 3, No. 2(6). P. 35-43. DOI 10.54708/26585014_2021_32635. EDN USZJSM. (In Russian).]]
10. Гурчинский М. М. Метод трансферного обучения агентов роевых робототехнических систем для миграции знаний об успешных вариантах распределения и планирования выполнения задач // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2022. № 5. С. 78-91. EDN NTJHAT. [[Gurchinsky M. M. "Method of transfer learning of agents of swarm robotic systems for migration of knowledge about successful options for distribution and planning of tasks" // Electronic network polythematic journal "Scientific Works of KubSTU". 2022. No. 5, pp. 78-91. EDN NTJHAT. (In Russian).]]
11. Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Павлов А. С., Рябцев С. С., Гурчинский М. М. Система распределения и планирования выполнения задач агентами роевых робототехнических систем на основе коллективного принятия решения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2023. № 1. С. 114-127. DOI 10.17308/sait/1995-5499/2023/1/114-127. EDN MJVQSO. [[Petrenko V. I., Tebueva F. B., Pavlov A. S., Ryabtsev S. S., Gurchinsky M. M. "System of distribution and planning of tasks execution by agents of swarm robotic systems based on collective decision making" // Bulletin of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies. 2023. No. 1, pp. 114-127. DOI 10.17308/sait/1995-5499/2023/1/114-127. EDN MJVQSO. (In Russian).]]
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668454 Российская Федерация. Программа для распределения задач в группе роботов в условиях информационной недостаточности: № 2021666869: Заявл. 27.10.2021: опубл. 16.11.2021 / В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, М. М. Гурчинский, В. О. Антонов, А. С. Павлов, С. С. Рябцев; заявитель Северо-Кавказский федеральный университет. EDN RUYQUL. [[Certificate of state registration of computer program No. 2021668454 Russian Federation. Program for distributing tasks in a group of robots under conditions of information deficiency:

No. 2021666869: declared. 27.10.2021: published. 16.11.2021 / V. I. Petrenko, F. B. Tebueva, M. M. Gurchinsky, V. O. Antonov, A. S. Pavlov, S. S. Ryabtsev; applicant North Caucasian Federal University. EDN RUYQUL. (In Russian).]]

13. 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. Krasnoyarsk, Russia. July 31, 2020. Vol. 919. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. Pp. 42025. DOI 10.1088/1757-899X/919/4/042025. EDN VBOFRJ.

Поступила в редакцию 8 мая 2024 г.

МЕТАДАННЫЕ / METADATA

Title: Detection of an intruder by agents of swarm robotic systems in a non-deterministic operating environment.

Abstract: The article provides an overview of the study of swarm robotic systems (SRTS) used as part of a perimeter security system for objects with extended boundaries to detect an intruder. The purpose of the study is to increase the efficiency of detecting an intruder by RRTS agents used as part of a system for protecting the perimeter of objects with extended boundaries, in the conditions of a changing set of tasks during the search for an intruder and fixing his location before the arrival of the response team based on swarm methods of distribution and planning of tasks with using artificial neural networks and a distributed registry. The subject of the study is the scientific and methodological apparatus of swarm distribution and planning of task execution by agents of swarm robotic systems in the conditions of a changing set of tasks during the search for an intruder and fixing his location before the arrival of the response team. A scientific and methodological apparatus for swarm distribution and planning of task execution by RRTS agents is being developed, ensuring an increase in the efficiency of detecting an intruder by RRTS agents operating as part of a perimeter security system for objects with extended borders, with a dynamic set of tasks within the framework of searching for an intruder and fixing his location. until the response team arrives. A decomposition of the general task was carried out and specific research tasks were identified: 1. Develop models for describing the process of distribution and planning of tasks between RRTS agents to increase the efficiency of detecting an intruder on the territory of an object with extended borders. 2. Develop a method for distributing and planning the execution of a dynamic set of tasks by RRTS agents to increase the efficiency of detecting an intruder on the territory of an object with long boundaries. 3. Develop a method for transfer training of RRTS agents to ensure scalability based on the criteria of the number of agents and the length of the boundaries of the territory of the protected object by migrating knowledge about successful options for distributing and planning the execution of a dynamic set of tasks. 4. Develop a method for synthesizing a system for distributing and planning the execution of a dynamic set of tasks by RRTS agents based on collective decision-making, ensuring increased efficiency in detecting an intruder on the territory of an object with extended borders. To solve these problems, methods of system analysis, optimization, the mathematical apparatus of artificial neural networks and distributed registry technology were used. The simulation and computational experiment were carried out using the high-level programming language Python, as well as using the simulator of multi-agent robotic systems ARGoS.

Key words: Swarm robotics systems; task allocation and scheduling; transfer learning of swarm robotics agents for knowledge migration.

Язык статьи / Language: Русский / Russian.

Об авторах / About the authors:

ГУРЧИНСКИЙ Михаил Михайлович

ООО «Тинькофф Центр Разработки», Россия.
Программист.

E-mail: gurcmikhail@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1739-2624>

GURCHINSKIY Mikhail Mikhaylovich

Tinkoff Development Center LLC, Russia.
Programmer.

E-mail: gurcmikhail@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1739-2624>

ТЕБУЕВА Фариза Биляловна

Северо-Кавказский федеральный университет, Россия.

Зав. кафедрой компьютерной безопасности. Дипл. математик (Кабардино-Балкарск. гос. ун-т, 1995). Д-р физ.-мат. наук по мат. моделир., числ. методам и комплексам программ (Юж. федер. ун-т, 2014). Иссл-я в обл. методов и алгоритмов для управления киберфизическими системами, информационной безопасности киберфизических систем.

E-mail: ftebueva@ncfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7373-4692>

TEBUEVA Fariza Bilyalovna

North Caucasus Federal University, Russia.

Head of the Department of Computer Security. Dipl. mathematician (Kabardino-Balkarian State University, 1995). Dr of Physics and Mathematics sciences in mathematics modeling, numerical methods and software packages (Southern Federal University, 2014). Research in the field of methods and algorithms for managing cyber-physical systems, information security.

E-mail: ftebueva@ncfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7373-4692>