

На правах рукописи

Чжай Мэйсинь

**МНОГОАГЕНТНАЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
СПАСЕНИЯ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ**

Специальность 05.02.05

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чжай Мэйсинь

МОСКВА – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Назарова Анаид Вартановна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Робототехнические системы и
мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

Ермолов Иван Леонидович,
Доктор технических наук, профессор РАН,
заместитель директора по научной работе,
«Институт проблем механики им. А. Ю.
Ишлинского РАН»

Манько Сергей Викторович,
Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры Проблемы управления
«МИРЭА - Российского технологического
университета»

Ведущая организация:

Федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М.В.
Келдыша Российской академии наук»
(ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

Защита состоится 03.03.2020 года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Отзывы и замечания на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «____» 20__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.141.02
кандидат технических наук, доцент



Муратов И. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время работы различного назначения и многоагентные робототехнические системы (МРТС) находят широкое применение в отраслях, связанных с риском для человека, например, при ликвидации последствий природных и техногенных катастроф, в химической и атомной промышленности и т.д. Преимущества применения многоагентных робототехнических систем очевидны: увеличение радиуса действия, расширение набора решаемых задач и повышение вероятности их успешного выполнения, что достигается за счет возможности перераспределения задач между агентами в случае изменения числа роботов в группе (например, при выходе из строя отдельных агентов-роботов).

Землетрясение – одна из наиболее опасных катастроф, которая представляет серьезную угрозу для жизни людей. Существующие в настоящее время методики организации спасательных мероприятий не обладают необходимой степенью эффективности и часто приводят к потерям среди спасателей. В связи с этим целесообразно использовать коллективы взаимодействующих агентов-роботов различной специализации, образующих спасательную команду.

Таким образом, научная тема «Многоагентная робототехническая система спасения при землетрясениях» является актуальной. Решение данной проблемы направлено на практическую реализацию применения МРТС, что позволит существенно снизить потери среди пострадавших, а также риск для жизни и здоровья спасателей при работе в неблагоприятных или опасных условиях.

Разработки робототехнических систем спасения при землетрясениях ведутся в Китае, России, США и странах Европы. Сегодня в России проблемами многоагентного управления занимаются такие известные ученые, как проф. В.И. Городецкий, проф. А.В. Тимофеев, проф. С.В. Манько, проф. В.М. Лохин, а также член-корр. РАН И.А. Каляев и проф. С.Г. Капустян. За рубежом наиболее известны работы В. Лессера, К. Декера и Ф. Коэна.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является разработка методики организации многоагентной робототехнической системы и планирования процессов спасения пострадавших в результате землетрясений. Для достижения этой цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Формирование этапов спасения, создание спасательной команды и определение количественного состава групп роботов.
2. Выбор принципа построения МРТС, формирование структуры и состава системы управления.
3. Исследование способов реализации поисковых операций группой роботов с учетом особенностей поисковой зоны и характеристик датчиков.
4. Разработка и применение методов распределения задач между роботами в МРТС с использованием централизованных и децентрализованных алгоритмов.
5. Моделирование работы МРТС с учетом взаимодействия различных групп роботов.

Методы исследования. В работе использованы методы теории вероятности и динамического программирования, бионические алгоритмы, принципы рыночной экономики, элементы теории игр, а также математическое и имитационное моделирование.

Научная новизна. Разработана методика формирования коллектива роботов, предназначенного для спасения людей при землетрясениях. Предложена и реализована методика планирования этапов процесса спасения с учетом конкретных характеристик катастрофы. Разработаны процедуры поиска пострадавших с использованием группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), включающие различные стратегии обнаружения людей, разбиения поискового района на подрайоны и планирования траекторий движения отдельных роботов. Для оптимизации процесса спасения в условиях ограниченного времени использованы методы глобального и локального распределения задач в группе беспилотных наземных аппаратов (БПНА) на основе алгоритма роя частиц и с использованием элементов теории игр.

Практическая значимость. Методика формирования МРТС и ее системы управления учитывает реальные размеры бедствия и возможное число пострадавших, которым необходимо оказать помощь в ограниченное время. Предложенный подход к формированию этапов процесса спасения позволяет оценить необходимое количество БПЛА и БПНА для практического применения в ситуациях, опасных для жизни человека. Разработанные процедуры поиска могут использоваться для обнаружения потерянных целей, например, кораблей, самолетов и т.д. Использование предложенных методов и алгоритмов позволяет минимизировать время поиска и спасения пострадавших.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика планирования этапов процесса спасения и формирования количественного состава групп БПЛА и БПНА, совместно выполняющих спасательные операции.
2. Модульный подход к построению системы управления МРТС.
3. Алгоритмы поиска пострадавших, основанные на методах теории вероятности.
4. Применение методов распределения задач в группе БПНА для оптимизации процесса спасения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на следующих научных форумах: Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2-3 ноября 2017 г.); III Международной научно-практической конференции: «Word Science» (Чехия, Карловы Вары - Россия, Москва, 28-29 сентября 2018 г.); Научной конференции для студентов, молодых ученых и аспирантов МГТУ им. Н. Э. Баумана, посвященной 105-летию академика РАН Е. П. Попова (Москва, 27-28 марта 2019 г.); Первом всероссийском семинаре с международным участием «Искусственный интеллект, когнитивное моделирование и интеллектуальная робототехника» (Дубна, 13-17 мая 2019 г.).

Публикации. Основное содержание работы отражено в 8 публикациях, из них 4 статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка, включающего 83 наименования, и приложений. Работа изложена на 151 листах машинописного текста, содержит 78 рисунков и 29 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, представлена структура диссертации, приведены защищаемые положения.

В первой главе рассмотрены землетрясения последнего десятилетия и процессы спасения пострадавших. Приведены примеры использования роботов при выполнении поисково-спасательных операций, а также представлено описание основных этапов спасения при землетрясениях. Кроме того, проведен обзор существующих методов обнаружения целей группой агентов и алгоритмов распределения задач между агентами-роботами. Заканчивается глава конкретизацией задач исследования.

В диссертации проведен анализ землетрясений, произошедших в период с 2000 по 2015 год. Изучена организация процессов спасения. После землетрясения помочь пострадавшим необходимо в течение 72 часов, иначе вероятность их выживания снижается до 36.7%. Современные спасательные подразделения не всегда могут быстро отреагировать на такие бедствия из-за отсутствия систематизированных подходов к планированию и реализации спасательных операций с учетом размера пострадавшей территории, степени разрушений и возможного числа пострадавших.

Главным критерием успешного выполнения операций спасения является минимизация времени оказания помощи. Выполнение этих условий потребовало разработки специальных методов решения задач, возникающих в ходе выполнения поисково-спасательных операций (планирование этапов спасательной операции, поиск выживших, распределение целей (пострадавших) между роботами).

Вторая глава посвящена методике планирования и реализации спасательных операций. Получив задание, управляющий центр должен выработать этапы спасательной операции, сформировать спасательную команду, определив необходимое число роботов каждого типа в соответствии с перечнем решаемых задач, синтезировать структуру МРТС, а также организовать коммуникационную систему.

На основе анализа реальных спасательных операций сформированы этапы процесса спасения (Рис. 1).

Этап 1 – исследование зоны бедствия и создание точной карты пострадавшей территории, содержащей такие данные, как площадь рабочей зоны, уровень разрушений и возможное число жертв среди населения. На основе

полученной информации формируется спасательная команда.

Этап 2 – организация системы воздушной связи для обеспечения коммуникации между роботами и/или людьми (спасателями и пострадавшими).

Этап 3 – определение координат выживших (выполняется не позже, чем через два часа после начала спасательной операции).

Этап 4 – выяснение состояния выживших: возможность перемещаться самостоятельно, нахождение на поверхности или под завалами и т.д.

Этап 5 – оказание скорой помощи, доставка воды, пищи и медикаментов.

Этап 6 – эвакуация пострадавших в безопасную зону.

Эффективное время выполнения этапов 3 – 6 составляет не более 72 часов. Работы продолжают работать и дальше, но вероятность обнаружения живых через 72 часа после начала спасательной операции слишком мала.

После сбора всей необходимой информации и на основе статистики произошедших землетрясений формируется качественный и количественный состав спасательной команды с учетом характеристик существующих роботов и уровня бедствия – количества пострадавших и площади поражения.

Прогнозирование уровня бедствий основывается на статистике произошедших землетрясений в Китае:

$$\log RD = 9.0D_P^{0.1} - 10.07$$

$$ND = f_\rho f_t RD \times M$$

где RD – смертность населения, ND – оценочное количество погибших, D_P – коэффициент разрушения домов при железобетонных конструкциях, f_ρ – коэффициент плотности населения, f_t – коэффициент времени – время начала землетрясения (допустимым поправочным коэффициентом времени f_t в дневное время является 1), M – общая численность населения пострадавшей области.

Процесс формирования спасательной команды, а также требования к роботам, предъявляемые на каждом этапе спасательной операции, представлены на Рис. 1.



Рис. 1. Процесс создания спасательной команды
БПЛА и БПНА необходимо оснастить наборами датчиков. БПЛА содержит

GPS, гироскоп, стереокамеру и лазерный датчик для создания 3D карты и обеспечения навигации и локализации, а также тепловизор и радар-детектор для определения состояния пострадавших. На борту БПНА установлены тепловизор, видеокамера, а также диктофон для обеспечения взаимодействия между роботами и людьми.

Количественный состав каждой группы определяется соотношениями:

$$\begin{aligned} N_1 &= S/(T_1 \cdot V_1 \cdot W_1), \quad t_1 \geq T_1 & N_2 &= S/s_2, \quad t_2 \geq T_2 & N_3 &= \frac{S}{T_3 \cdot V_3 \cdot W_3} + \frac{M t_3'}{T_3}, \quad t_3 \geq T_3 \\ N_4 &= M t_4' / T_4, \quad t_4 \geq T_4 & N_5 &= M t_5' / T_5, \quad t_5 \geq T_5 & N_6 &= M t_6' / T_6, \quad t_6 \geq T_6, \end{aligned}$$

где S – площадь зоны поражения, s_2 – площадь зоны покрытия агентом, M – количество пострадавших, N_i – количество агентов для выполнения i -ой задачи ($i=1, 2, \dots, 6$), T_i – время выполнения i -ой задачи, t_i – максимальное рабочее время агента i , t_i' – среднее время выполнения i -ой задачи, V_i – скорость агента при выполнении i -ой задачи, W_i – ширина зоны сканирования агента (датчика) при выполнении i -ой задачи.

В диссертации сформирован состав многоагентной робототехнической системы, включающей управляемый центр (УЦ) и группы БПЛА и БПНА. Разработана многоуровневая структура системы управления МРТС (Рис. 2), построенная по модульному принципу, что позволяет использовать ее в различных приложениях путем замены или модификации отдельных специализированных модулей.

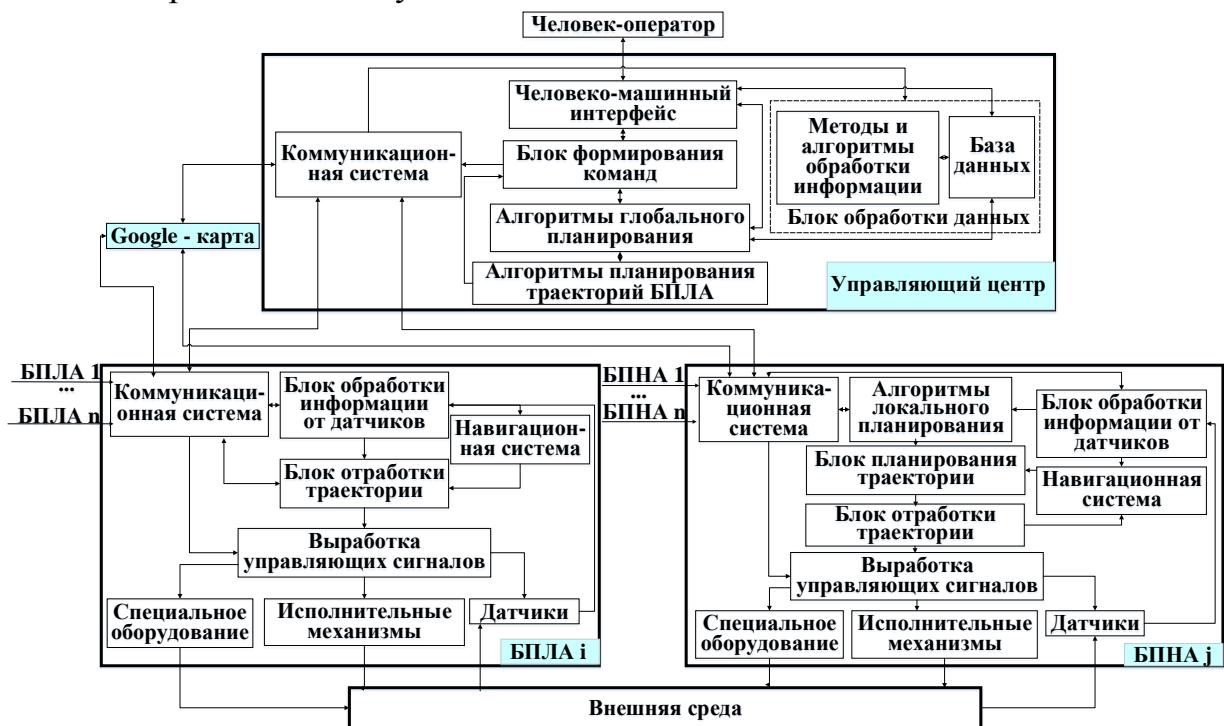


Рис. 2. Структура системы управления МРТС

Каждая группа оборудования имеет собственную систему управления (СУ), обеспечивающую ее функционирование и взаимодействие с верхним уровнем и СУ других групп. УЦ анализирует задание и формирует последовательность команд, в зависимости от указаний оператора и текущего состояния системы, а также передает команды управления и исходные данные роботам. Группы БПЛА отвечают за обследование зоны поражения, создание карты и станций воздушной

связи, обеспечивающих передачу информации управляющему центру и другим агентам в режиме реального времени. Кроме этого, БПЛА обнаруживают пострадавших, определяют их координаты и фиксируют эти данные на карте. Группы спасательных роботов (БПНА) отвечают за выяснение состояния обнаруженных выживших, оказание скорой помощи, а также транспортировку раненых в безопасную зону.

Коммуникационная система МРТС предусматривает глобальный обменом данными и локальные переговоры между агентами. Глобальная коммуникация обеспечивается привязными БПЛА, образующими воздушные станции беспроводной связи. Локальный информационный обмен осуществляется с помощью распределенной сети Ad Hoc, связанной с глобальной беспроводной сетью через шлюз.

Третья глава посвящена решению задач поиска пострадавших с использованием аппарата теории вероятности. Вначале рассмотрены типы существующих датчиков для обнаружения выживших – акустические, радиолокационного зондирования и другие, каждый из которых имеет свои преимущества. При землетрясениях подходящими устройствами являются радар-детектор и тепловизор, благодаря их дальности обнаружения. На основе этих датчиков созданы модели и стратегии поиска. Исследованы процессы дискретного и непрерывного поиска одним агентом, а также решен ряд задач совместного выполнения поисковой операции группой агентов.

На первом этапе поставлены задачи поиска с учетом ограниченного времени и созданы модели поиска. Известны две вероятностных модели – модель датчика и модель карты.

Модель датчика: при поиске цели роботами, оснащенными датчиками, возможно, как непрерывное, так и дискретное наблюдение. В случае непрерывного поиска каждый просмотр занимает малое время Δt , при этом условная вероятность обнаружения цели s зависит от типа датчика и среднего расстояния между датчиками и целью, $s = \alpha \Delta t$, $[\alpha] = 1/\text{сек}$ (Рис. 3). При дискретном поиске вероятность обнаружения цели, если она находится в области видимости датчика при одном просмотре – s .

$$s = \begin{cases} P_D & (l_k < l_{in}) \\ P_D - \frac{(P_D - P_F)(l_k - l_{in})}{l_{out} - l_{in}} & (l_{out} \leq l_k \leq l_{in}) \\ P_F & (l_k > l_{out}) \end{cases}$$

где l_k – расстояние между датчиками и целями, $P_D \in [0, 1]$ – вероятность обнаружения цели

датчиком (учитываются неопределённости наблюдения), $P_F \in [0, 1]$ – вероятность ложного срабатывания датчика, l_{in} – наибольшее расстояние, с которого датчик наблюдает цель с вероятностью P_D , l_{out} – наименьшее расстояние, начиная с которого датчик не может обнаружить цель, но сообщает, что она существует с вероятностью P_F . Дискретное наблюдение имеет подобную функцию.

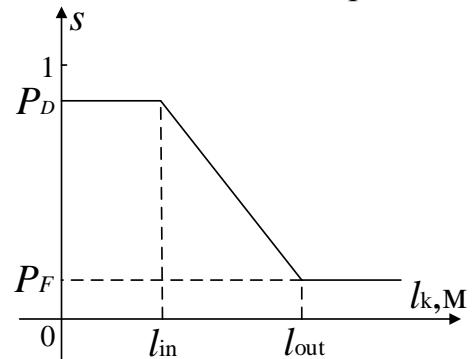


Рис. 3. Условная вероятность

Модель карты: имеется карта $L_x \times L_y$, априорная информация о плотности распределения вероятности цели в точке $\rho(x, y)$, суммарная вероятность – $\iint \rho(x, y) dx dy \leq 1$. Дискретизируем непрерывную карту в виде сетки размером $M \times N$, тогда $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c(m, n) \leq 1$, где $c(m, n)$ – вероятность нахождения цели в ячейке (m, n) .

На втором этапе исследованы различные стратегии поиска, получены соотношения между вероятностью обнаружения цели, временем поиска и другими параметрами. Пусть T – время, отпущенное на поиск, P_T – вероятность обнаружения цели за время T . На основе знания P_T необходимо проанализировать процедуру и параметры поиска.

Агент исследует одну ячейку. Пусть датчик осуществляет n просмотров одной ячейки, тогда рекуррентные соотношения для вероятности обнаружения цели при дискретном наблюдении:

$$P_{i+1} = (1 - s)P_i + c \cdot s, P_0 = 0, i = 0, 1, 2, \dots, n,$$

при непрерывном наблюдении:

$$P_t = c(1 - e^{-\alpha t}),$$

где P_t – вероятность обнаружения цели за время t (Рис. 4).

При переменной вероятности нахождения цели в ячейке вероятности обнаружения цели имеют вид

$$P_{n+1} = P_n + (1 - s)^n s c_{n+1}, P_0 = 0 \text{ и}$$

$$P_t = \alpha \int_0^t c_\tau e^{-\alpha \tau} d\tau.$$

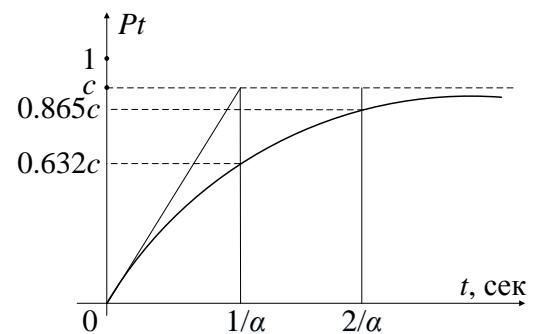
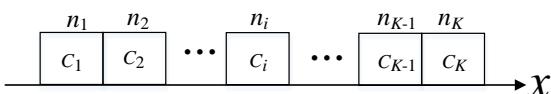


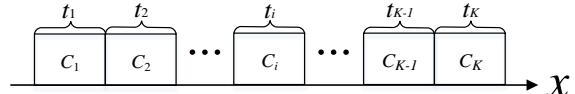
Рис. 4. Функция зависимости вероятности обнаружения цели от времени

Агент исследует несколько ячеек. Датчик осматривает K ячеек, в одной из которых может находиться цель. При дискретном исследовании каждая ячейка просматривается датчиком n_i раз за n просмотров (Рис. 5, а), при непрерывном – ячейка i просматривается датчиком в течение времени t_i за время T (Рис. 5, б), где $\sum_{i=1}^K n_i = n$, $\sum_{i=1}^K t_i = T$, $i=1, 2, \dots, K$. Тогда вероятность обнаружения цели P_K^n после n просмотров K ячеек и вероятность обнаружения цели P_K^T за время T имеют вид

$$P_K^n = \sum_{i=1}^K c_i (1 - (1 - s)^{n_i}) \quad \text{и} \quad P_K^T = \sum_{i=1}^K c_i (1 - e^{-\alpha t_i}).$$



Дискретное наблюдение (а)



Непрерывное наблюдение (б)

Рис. 5. Модель обнаружения цели

Задача заключается в том, чтобы при заданном времени обследования всей рабочей области T найти интервалы времени наблюдения каждой ячейки t_i , максимизирующие P_K^T при условии $T = \sum_{i=1}^K t_i$. При использовании метода множителей Лагранжа получаем: $t_i = T/K - (1/\alpha K) \sum_{j=1}^K \ln(c_j/c_i)$, $c_i > 0$, $i=1, 2, \dots, K$, при этом возможен результат $t_i \leq 0$. Поэтому для получения численного решения в работе использован метод динамического программирования.

Агент исследует при непрерывном наблюдении несколько ячеек вдоль оси x за один просмотр. Агент движется вдоль оси x , осматривая несколько ячеек, в

которых может располагаться цель (Рис. 6).

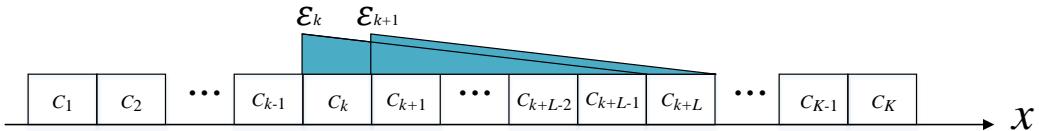


Рис. 6. Модель обнаружения цели вдоль прямой линии

Тогда рекуррентные соотношения для вероятности обнаружения цели в дискретном случае P_{k+1} и в непрерывном случае $P_{t+\varepsilon_t}$ имеют вид:

$$P_{k+1} = P_k + (1 - P_k) \sum_{i=k+1}^{k+L} c_i (1 - e^{-\alpha \varepsilon_{k+1}}), \quad P_0 = 0 \quad \text{и}$$

$$P_{t+\varepsilon_t} = P_t + (1 - P_t) \int_{D_{x_t}} \rho(w) \alpha \varepsilon_t dw,$$

где P_k – вероятность того, что в ячейке k цель будет найдена, k – номер ячейки, ε_k – время нахождения над ячейкой k , P_t – вероятность обнаружения цели за время t , ε_t – малое время нахождения над ячейкой k , w – положение исследуемой точки на оси x , x_t – положение датчика (дрона) на оси x в момент времени t , L – число ячеек, обследуемых за один просмотр, D_{x_t} – область видимости датчика за один просмотр.

Тогда вероятность обнаружения цели имеет вид

$$P_t = 1 - e^{- \int_0^t \iint_{D_\tau} \rho(w) \alpha dw d\tau}.$$

Агент ищет цель на плоскости. Агент осматривает зону вдоль кривой $r_t = (x_t \ y_t)^T$. Поисковая задача может выполняться как наземным мобильным агентом (Рис. 7, а), так и дроном (Рис. 7, б). Тогда

$$P_t = 1 - e^{- \int_0^t \iint_{D_\tau} \alpha(l) \rho(w) dw d\tau}.$$

Обозначим, $F = \int_0^t \iint_{D_\tau} \alpha(l) \rho(w) dw d\tau$,

где w – положение исследуемой точки в области видимости датчика, $\rho(w)$ – плотность распределения вероятности нахождения цели, D_τ – область видимости датчика, l – расстояние между датчиком и исследуемой точкой, $l=|w-r_\tau|$, $\alpha(l)$ зависит от расстояния между датчиками БПНА и целью, в случае выполнения поиска БПЛА $\alpha=const$, r_τ – положение датчика. Тогда, максимизируя функционал F , получаем r_τ , при котором вероятность обнаружения цели достигает максимума.

Моделирование одноагентной системы. Пусть плоскость разбита на $M \times N$ дискретных ячеек, в одной из которых может находиться цель. Вероятность того, что цель находится в определенной ячейке, равна c_i , $i=1, 2, \dots, M \times N$ и $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_i = 1$, время поиска T . Для нахождения оптимального распределения времени поиска цели в каждой ячейке используются соотношения, полученные в проведенных выше исследованиях. Результаты моделирования при $M=N=20$, $T=400$ сек, $\alpha=0.5$ показаны на Рис. 8 и 9.

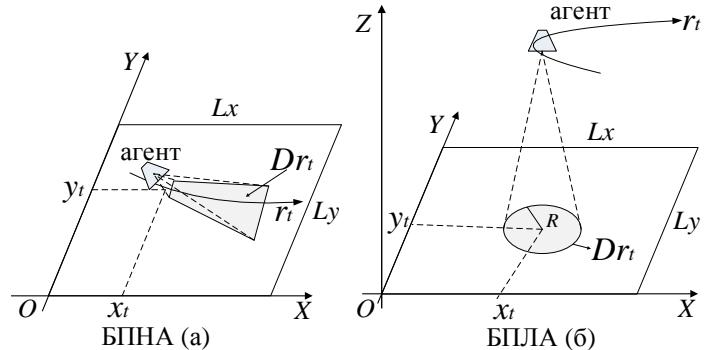


Рис. 7. Модель обнаружения цели

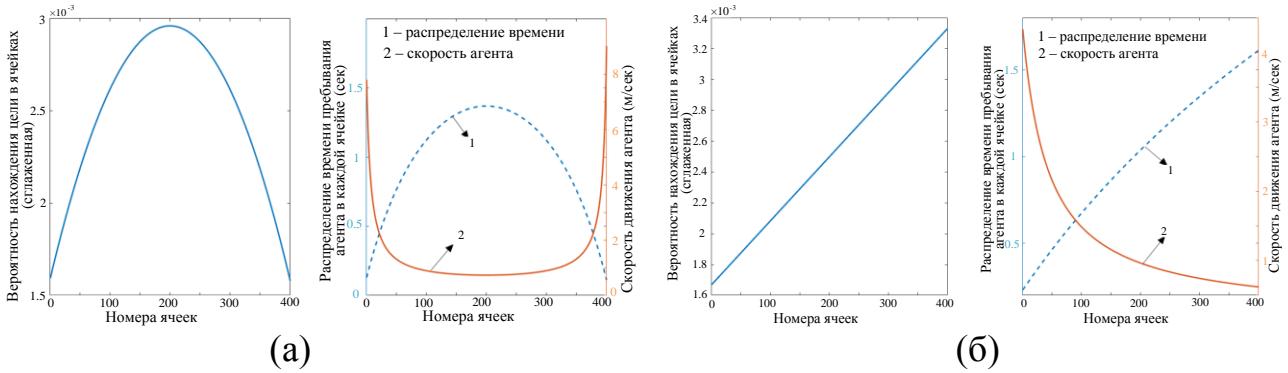


Рис. 8. Результаты моделирования при разных вероятностях c_i

Таким образом, чем больше вероятность нахождения цели в ячейке и чем меньше скорость движения агента, тем большее вероятность обнаружения цели (Рис. 8). При некоторых значениях параметров поиска относительная разница в вероятностях обнаружения цели при равномерном и оптимальном распределении времени достигает 75.3% (Рис. 9).

На третьем этапе проведено исследование выполнения поисковой задачи группой агентов, включающее анализ методов поиска, способов разбиения района поиска и траекторий движения агентов в процессе поиска.

Анализ методов поиска. В диссертации предложено четыре стратегии поиска с использованием дискретной модели (Рис. 10).

1. Один агент осматривает $2K$ ячеек, каждую в течение времени t_i^a , $\sum_{i=1}^{2K} t_i^a = T$ (Рис. 10, а). Вероятность обнаружения цели – $(P_{2K}^T)^a = \sum_{i=1}^{2K} c_i (1 - e^{-\alpha t_i^a})$.

2. Два агента одновременно осматривают $2K$ ячеек, каждый из них осматривает свои ячейки в течение времени t_i^b и t_j^b соответственно (Рис. 10, б). Тогда вероятность обнаружения цели по крайней мере в одной из ячеек за время $\sum_{i=1}^K t_i^b = T$, $\sum_{j=K+1}^{2K} t_j^b = T$ имеет вид $(P_{2K}^T)^b = 1 - (\sum_{i=1}^K c_i e^{-\alpha t_i^b} + \sum_{j=K+1}^{2K} c_j e^{-\alpha t_j^b})$.

3. Два агента «друг за другом» осматривают $2K$ ячеек. Первый осматривает каждую за время t_i^c . Через $T/2$ второй начинает осматривать те же ячейки в течение t_j^c (Рис. 10, в). Тогда вероятность обнаружения цели по крайней мере в одной из ячеек за время $\sum_{i=1}^{2K} t_i^c = T/2$, $\sum_{i=1}^{2K} t_i^c = T/2$ имеет вид $(P_{2K}^T)^c = 1 - \sum_{i=1}^{2K} c_i e^{-\alpha(t_i^c + t_j^c)}$.

4. Два агента одновременно осматривают $2K$ ячеек. Каждый из них осматривает ячейку за время t_i^d и t_j^d (Рис. 10, г). Вероятность обнаружения цели по крайней мере в одной из ячеек за время $\sum_{i=1}^{2K} t_i^d = T$, $\sum_{j=1}^{2K} t_j^d = T$ имеет вид $(P_{2K}^T)^d = 1 - \sum_{i=1}^{2K} c_i e^{-\alpha(t_i^d + t_j^d)}$.

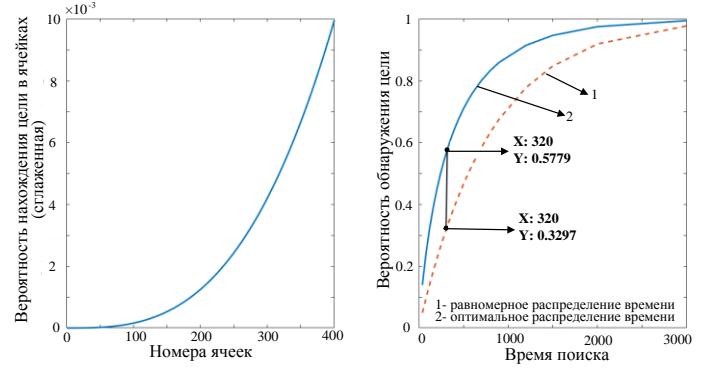


Рис. 9. Результаты моделирования при разном времени поиска T

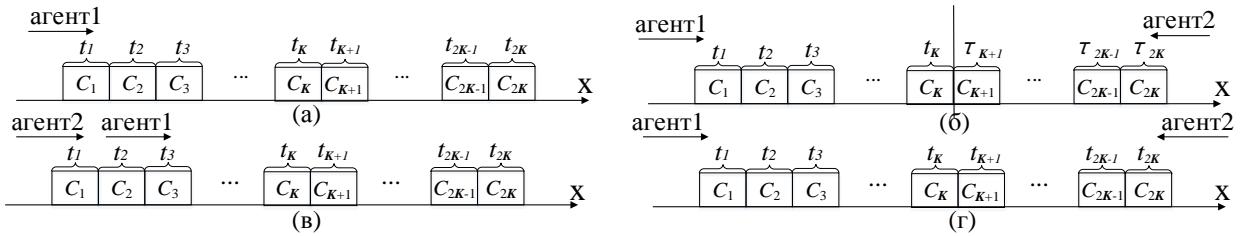


Рис. 10. Стратегии поиска

Если вероятности c_i распределены симметрично, то есть, $c_K = c_{K+1}$, $c_{K-1} = c_{K+2}$, ..., сравнение четырех методов показывает: $(P_{2K}^T)^a - (P_{2K}^T)^b \leq 0$, поскольку во втором случае время поиска в два раза больше; $2(P_{2K}^T)^a - (P_{2K}^T)^b \geq 0$ – если время поиска увеличивается в два раза, то вероятность обнаружения цели увеличивается меньше чем в два раза; $(P_{2K}^T)^a - (P_{2K}^T)^c = 0$ и $(P_{2K}^T)^b - (P_{2K}^T)^d = 0$ – если параметры поиска постоянны, то разные методы поиска приводят к одинаковым результатам, причем при одинаковом времени поиска значения вероятностей обнаружения цели не отличаются.

Метод разделения района поиска.

Аналитически эта задача трудно разрешима, поэтому в работе были промоделированы некоторые конкретные ситуации. Пусть два агента выполняют задачу поиска на площине с числом ячеек $M \times N$. Первый агент исследует ячейки $R \times N$ второй – остальные $(M-R) \times N$ (Рис. 11). Разные цвета соответствуют разным вероятностям нахождения цели в ячейке. Задача: найти разбиение R , максимизирующее вероятность обнаружения цели.

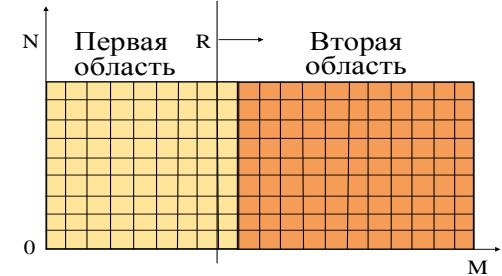


Рис. 11. Принципиальная схема процесса разбиения

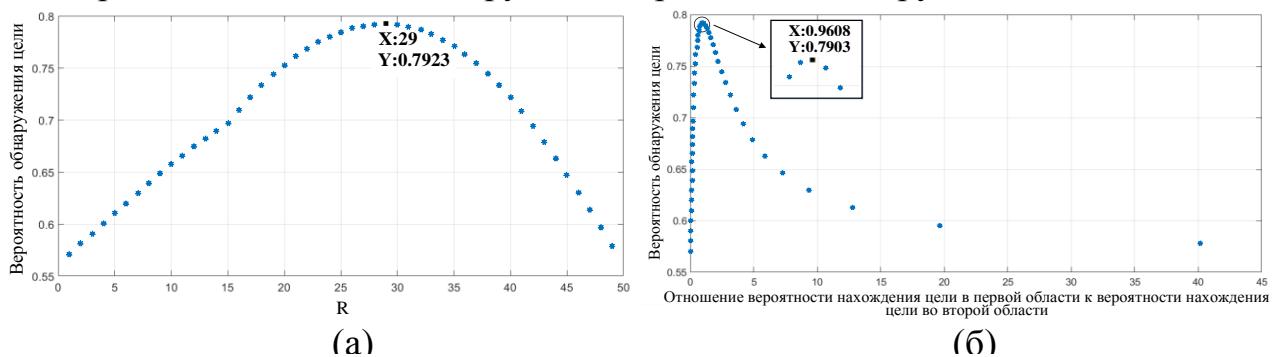


Рис. 12. Результаты разбиения области поиска

Например, при $M=50$, $N=20$, времени поиска $T=1200$ сек и $\alpha=0.5$, вероятности обнаружения цели в зависимости от разбиения R , показаны на Рис. 12, а. Если вероятности нахождения цели в первой и во второй областях одинаковы или не сильно отличаются, то вероятность обнаружения цели достигает максимума (Рис. 12, б).

Анализ траекторий движения агентов. Выбор траекторий поиска также влияет на вероятность обнаружения цели. На Рис. 13 слева представлена сетевая карта, содержащая вероятности нахождения цели в ячейках. Справа – возможные варианты обхода ячеек. Сравнение траекторий, соответствующих Рис. 14, а, б и в, с точки зрения вероятности обнаружения цели, показано на Рис. 14.

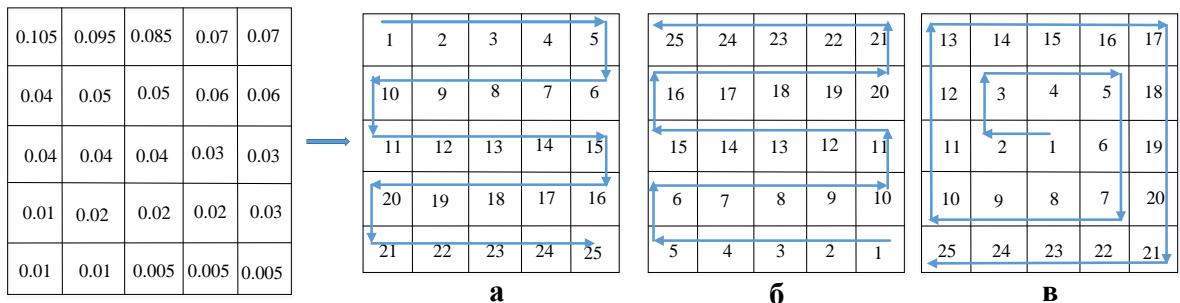


Рис. 13. Последовательность обхода сетевой карты (траектории поиска)

Очевидно, что начинать поиск нужно с ячеек с большей вероятностью нахождения целей (а), что позволит обнаружить их раньше. Кроме того, при проведении поисковой операции требуется выбирать траекторию, где вероятность обнаружения цели нарастает быстрее.

Четвертая глава посвящена вопросам распределения задач в МРТС при выполнении спасательных операций. Разработаны и применены централизованные и децентрализованные методы и алгоритмы, проведен их сравнительный анализ.

Постановка задачи распределения. Пусть $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ – множество задач, которые необходимо решить, $N = \{n_1, n_2, \dots, n_p\}$ – множество агентов-роботов, причем множества M и N могут меняться в процессе работы МРТС. Заданы следующие матрицы, имеющие размерность $k \times p$: матрица вознаграждений $Q = \{q_{ij}\}$, матрица затрат $R = \{r_{ij}\}$ и матрица возможностей $L = \{l_{ij}\}$, где q_{ij} – вознаграждение при выполнении i -й задачи j -м агентом, r_{ij} – ресурсы, затраченные j -м агентом на выполнение i -й задачи, l_{ij} – возможность выполнения i -й задачи j -м агентом, $l_{ij} = \{0, 1\}$, $i = \{1, \dots, k\}$, $j = \{1, \dots, p\}$. Необходимо распределить задачи между агентами так, чтобы выигрыш $C = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^k (l_{ij} * (q_{ij} - r_{ij}))$ был максимальным. Результат распределения удобно представить в виде массива, размер которого соответствует числу распределяемых задач. Элементы массива – это номера роботов, участвующих в распределении, а порядковый номер элемента соответствует номеру задачи, назначенному для данного робота. Например, последовательность [3, 1, 2] означает, что 3-й робот будет выполнять 1-ю задачу, 1-й робот – вторую, а 2-й робот – третью.

Централизованное распределение задач является одним из видов глобального планирования и осуществляется в МРТС управляющим центром. Сначала управляющий центр выполняет первичное распределение задач. В процессе работы системы исходные данные постоянно меняются, поскольку УЦ постоянно получает информацию о новых обнаруженных выживших и о текущем состоянии агентов-роботов. Это связано с тем, что БПЛА постепенно обнаруживают пострадавших, увеличивая число задач, которые нужно

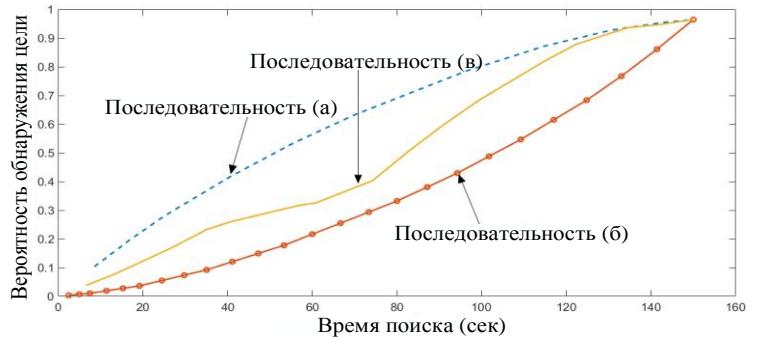


Рис. 14. Сравнение траекторий

распределить. Следовательно, необходимо периодически повторять процедуру распределения задач. По результатам проведенного в первой главе аналитического обзора в качестве централизованных методов распределения задач использованы алгоритм роя частиц (АРЧ) и генетический алгоритм (ГА).

В основе **алгоритма роя частиц** лежит принцип поведения птиц. Каждая птица знает собственное расстояние до пищи, а также расстояния до пищи всех остальных птиц в стае. В АРЧ каждая птица представлена частицей. В случае МРТС частицей является некоторое решение задачи распределения, а расстоянием до «пищи» – затраты на выполнение задач. АРЧ является итерационным алгоритмом и содержит последовательность шагов.

Шаг 1. Инициализация роя частиц. В начальный момент агенты разбросаны случайным образом по всей области поиска лучшего решения, каждый из них имеет случайные скорость и направление движения.

Шаг 2. Расчет значений целевой функции, т.е. суммы расстояний между агентами и целями. На основе этих данных можно найти лучшие локальное и глобальное решения.

Шаг 3. Корректировка положения частицы с тем, чтобы она не выходила за рамки пространства поиска и стремилась к лучшему решению. Корректировка выполняется, согласно следующим формулам:

$$v_i = v_i + a_1 \cdot \text{rnd}(0, 1) \cdot (pbest_i - x_i) + a_2 \cdot \text{rnd}(0, 1) \cdot (gbest - x_i)$$
$$x_i = x_i + v_i$$

где v_i – текущая скорость i -й частицы; x_i – текущее положение i -й частицы; a_1 и a_2 – весовые коэффициенты локального и глобального решения соответственно; $pbest_i$ – лучшее решение, найденное i -й частицей (локальный оптимум); $gbest$ – лучшее решение среди всех частиц (глобальный оптимум); $\text{rnd}(0, 1)$ – случайное число в диапазоне от 0 до 1.

Шаг 4. Проверка условий останова, например, количество итераций равно заданному числу. При выполнении условий поиск заканчивается, иначе – переход к шагу 2.

Другой подход к централизованному распределению задач между агентами – это **генетический алгоритм**. В основе ГА лежит принцип естественной биологической эволюции. На старте алгоритма определяется исходная популяция – начальное пространство решений задачи распределения. Далее благодаря операциям над генами особей популяции (скрещивание и мутация) появляется новое поколение решений. Затем, в полученной популяции выполняется отбор особей, имеющих наилучшее значение целевой функции. К отобранным особям вновь будут применены генетические операции. Процесс повторяется до тех пор, пока не появится особь, целевая функция которой будет отвечать заданным требованиям выхода из алгоритма (например, выполнение определенного числа итераций).

С помощью компьютерного моделирования проведен сравнительный анализ рассмотренных централизованных алгоритмов распределения задач (Рис. 15, сплошные линии – АРЧ, штриховые линии – ГА). Исследования показали, что при одинаковом размере популяции АРЧ по сравнению с ГА быстрее сходится к лучшему решению. Кроме того, при одинаковом количестве

выполненных итераций, как и при одинаковом времени вычисления, решение, найденное с помощью АРЧ, будет лучше решения, полученного с использованием ГА. Таким образом, централизованное распределение задач в группе агентов целесообразно осуществлять с помощью алгоритма роя частиц.

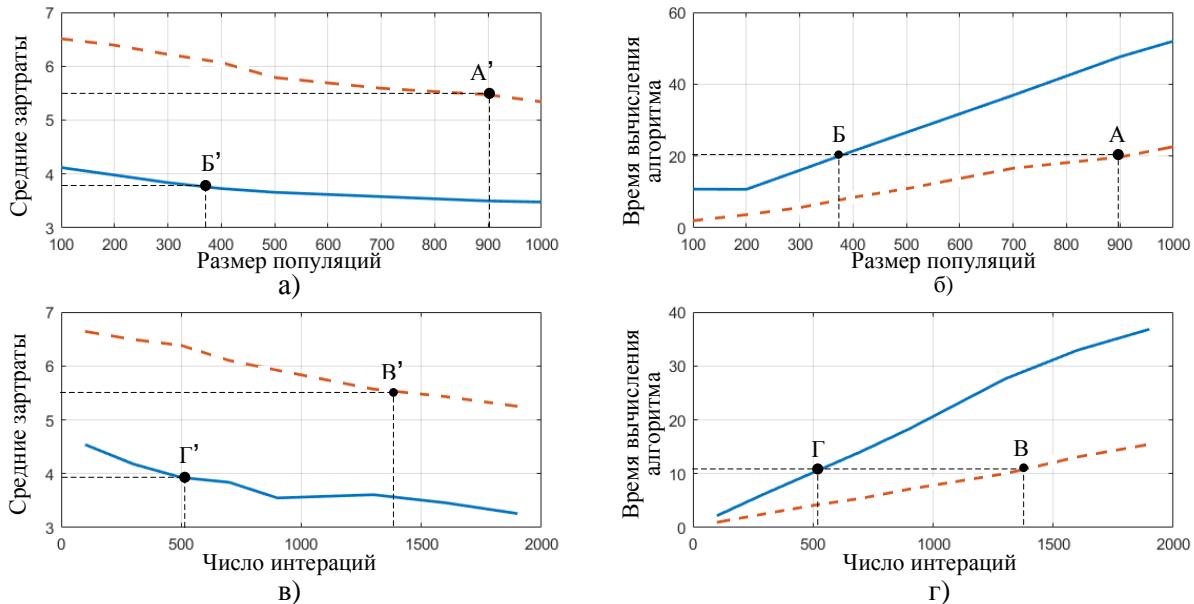


Рис. 15. Сравнительный анализ централизованных алгоритмов распределения задач

Децентрализованное распределение задач, в основе которого лежат переговоры между агентами. В процессе выполнения задач часть агентов-роботов могут не справиться с поставленной задачей или выйти из строя, а также некоторые агенты теряют связь с управляющим центром. В этом случае необходимо использовать локальное планирование без участия управляющего центра. По результатам проведенного в первой главе обзора в качестве децентрализованных – алгоритм аукциона и теория игр.

Алгоритм аукциона является децентрализованным итерационным методом распределения задач, основанным на обмене информацией между отдельными агентами. Предметом «торгов» являются распределяемые задачи.

Сначала один из агентов группы, аукционер, сообщает информацию о поставленных задачах остальным агентам. Затем агенты (в том числе и аукционер) в зависимости от своего текущего состояния (свободен/занят) и координат формируют массив данных, элементы которого – это затраты на выполнение полученных от аукционера задач. Далее агенты сортируют массив затрат в порядке возрастания. Затем аукционер проводит аукцион, начиная с наименее затратной для себя задачи. Задача «продается» тому агенту, который обеспечит минимум затрат при ее выполнении (таким агентом, в частном случае, может быть сам аукционер). Аукцион проводится до тех пор, пока не будут распределены все задачи.

Альтернативным вариантом организации децентрализованного распределения задач является использование **методов теории игр**. Эта теория изучает оптимальные стратегии и планирование поведения участников игр, где принимают участие две и более стороны, ведущие борьбу за реализацию своих интересов. Согласно теории, цель игры – нахождение оптимальной стратегии, т.е.

равновесия Нэша, которое означает, что игрок всегда выбирает наилучший с точки зрения полезности ход в ответ на ход соперника. Равновесие Нэша является оптимальным решением, поскольку отклонение любого игрока от соответствующей стратегии ухудшает общее решение поставленной задачи.

В случае применения теории игр для распределения задач в группе в качестве игроков могут выступать как агенты-роботы, так и задачи. Платежная матрица содержит затраты агентов-роботов на выполнение задач, которые необходимо распределить.

Сравнительный анализ рассмотренных децентрализованных методов распределения задач показал, что с помощью теории игр всегда можно найти оптимальное решение. При этом решение, полученное с использованием алгоритма аукциона, в общем случае является хорошим, но не оптимальным. Недостатком теории игр являются значительные временные затраты на поиск оптимального решения, особенно при наличии большого числа игроков. В результате, если количество задач больше 5, то предлагается для их децентрализованного распределения использовать алгоритм аукциона. В остальных случаях целесообразно применять теорию игр.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных с помощью комплексного компьютерного моделирования в средах ROS и V-Rep.

Структурная схема модели МРТС в среде ROS показана на Рис. 16. Модель внешней среды разработана в симуляторе Stage. В среде ROS планирование траектории осуществляется с использованием расширения ROS Navigation Stack и подразделяется на глобальное и локальное. Глобальное планирование – это планирование пути от начальной точки до цели. Для решения этой задачи используется алгоритм A*. Локальное планирование необходимо в случае обхода динамических препятствий. Оно выполняется с помощью алгоритма динамического окна.

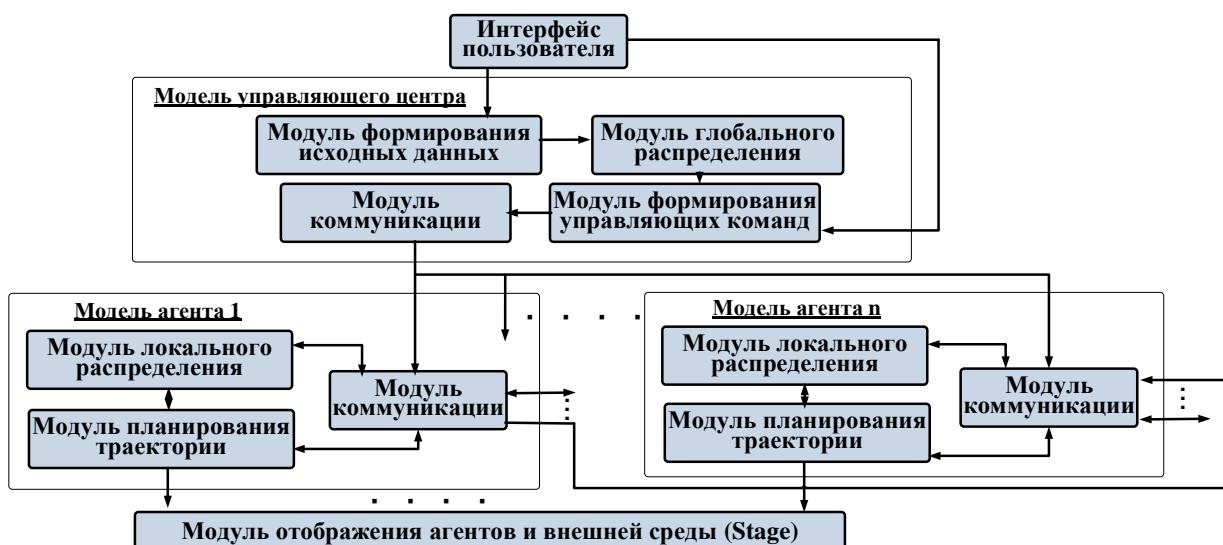


Рис. 16. Модель МРТС в среде ROS

Процесс моделирования строится следующим образом: несколько мобильных роботов готовы к выполнению задач спасения; управляющий центр распределяет задачи между агентами (алгоритм роя частиц и ГА); агенты

начинают выполнять свои задачи, осуществляется планирование траекторий их движения к целям. Если связь с УЦ потеряна, агенты распределяют задачи между собой с помощью переговоров (теория игр).

Моделирование показало, что алгоритм роя частиц дает лучшее решение по сравнению с генетическим алгоритмом. Проведенные исследования подтвердили вывод, полученный в четвертой главе.

Визуализация процесса обнаружения и спасения пострадавших выполнена с помощью твердотельной динамической модели МРТС, разработанной в среде V-Rep и учитывающей сенсорную систему роботов. Планирование траекторий агентов здесь осуществляется с помощью алгоритма Брайтенберга (Рис. 17).

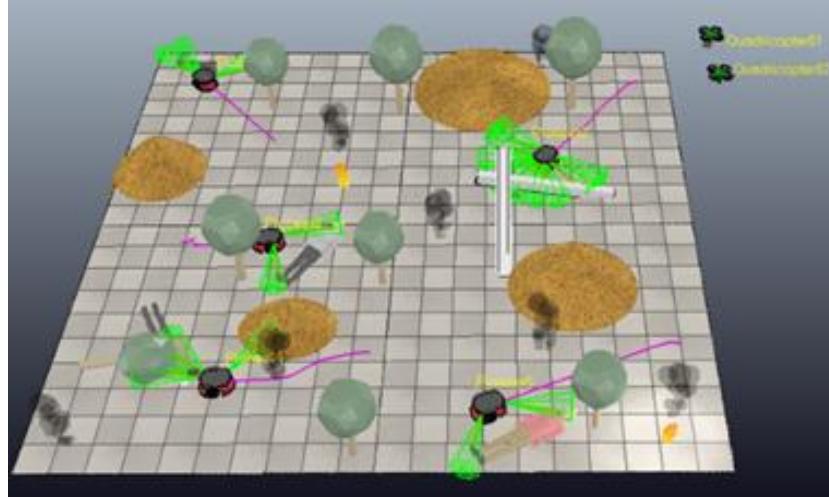


Рис. 17. Моделирование в среде V-Rep

Проведенные исследования подтвердили работоспособность и эффективность разработанных в диссертации методов и алгоритмов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложенный подход к формированию этапов спасения при землетрясениях и выбранный принцип построения МРТС с учетом существующих методов решения проблем группового управления роботами дают рекомендации для практического применения в ситуациях, опасных для жизни и здоровья человека.
2. При выполнении поисковой задачи группой агентов предложено разбиение поискового района на отдельные участки в соответствии с числом имеющихся БПЛА, при котором обеспечиваются одинаковые или не сильно отличающиеся вероятности нахождения цели в каждом подрайоне. При обнаружении цели БПЛА должны начинать поисковую операцию в точке/ячейке с большей вероятностью нахождения цели. Для повышения вероятности обнаружения цели распределение времени обследования каждой ячейки при управлении БПЛА необходимо получать с использованием метода множителей Лагранжа или динамического программирования.
3. При глобальном распределении задач алгоритм роя частиц по сравнению с генетическим алгоритмом быстрее сходится к оптимальному решению. Поэтому при глобальном распределении рекомендуются использовать алгоритм роя частиц, который обеспечивает меньшие затраты.

4. При локальном распределении задач для получения оптимального решения целесообразно использовать теорию игр. При большом количестве задач (больше 5) предлагается применять алгоритм аукциона.
5. Компьютерное моделирование в средах ROS и V-Rep подтвердило работоспособность и эффективность предложенных методов и алгоритмов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зенкевич С. Л., Чжу Хуа, Чжай Мэйсинь. Один способ получения оценки сглаживания фазового вектора в задаче управления движением строя. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. №7. С.458-462. (0,3 п.л./0,1 п.л.).
2. Назарова А.В., Мэйсинь Чжай. Проблемы использования робототехнических систем в операциях спасения при землетрясениях. // Робототехника и техническая кибернетика. №3(20). Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2018. С. 31-38. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
3. Назарова А.В., Мэйсинь Чжай. Организация спасательных команд роботов для ликвидации последствий стихийных бедствий. // Робототехника и техническая кибернетика. №7(1). Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2019. С. 21-28. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
4. Зенкевич С. Л., Назарова А.В., Мэйсинь Чжай. Планирование траекторий при выполнении задач поиска и покрытия на основе теории вероятности. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. №9. С.560-567. (0,5 п.л./0,17 п.л.)
5. Nazarova A.V., Zhai M. Distributed Solution of Problems in Multi Agent Robotic Systems. In: Gorodetskiy A., Tarasova I. (eds) Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control, vol 174. Springer, Cham. 2018. Pp.107-124. (1,125 п.л./0,56 п.л.).
6. Назарова А.В., Чжай Мэйсинь. Распределенное решение задач в многоагентной робототехнической системе. // Экстремальная робототехника: сборник тезисов Международной научно-технической конференции. СПб. Издательско-полиграфический комплекс «Гангут». 2017. С. 139-141. (28-th International Scientific and Technological Conference «EXTREME ROBOTUCS»). (0,18 п.л./0,09 п.л.).
7. Зенкевич С. Л. Чжу Хуа, Чжай Мэйсинь. Управление движением роботов в группе на основе сглаживания траектории. // Экстремальная робототехника: сборник тезисов Международной научно-технической конференции. СПб. Издательско-полиграфический комплекс «Гангут». 2017. С. 143-145. (28-th International Scientific and Technological Conference «EXTREME ROBOTUCS»). (0,18 п.л./0,09 п.л.).
8. Назарова А.В., Чжай Мэйсинь. Поиск цели многоагентной системой. //. III Международная научно-практическая конференция: Word Science-Чехия, Карловы Вары- Россия, Москва. 2018. С. 99-111. (0,18 п.л./0,09 п.л.).