



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Чжу Юйцин

ЧЖУ ЮЙЦИН

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ГРУППОВЫМ ПОВЕДЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Санкт Петербург
2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Шкодырев Вячеслав Петрович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент **Колесникова Светлана Ивановна**, профессор кафедры компьютерных технологий и программной инженерии ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г.Санкт-Петербург
Доктор технических наук, профессор **Прокопчина Светлана Васильевна**, Профессор Кафедры искусственного интеллекта Факультета информационных технологии и анализа больших данных Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» г.Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», г.Санкт-Петербург

Защита состоится «16» апреля 2025 года в 16.00 на заседании диссертационного совета У.2.3.1.29 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 3 корпус, 506 аудитория)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Сараджишвили С.Э.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последнее время беспилотные транспортные средства (БТС), такие как беспилотные машины, подводные роботы и беспилотные катера, беспилотные летательные аппараты привлекают всё большее внимание. БТС широко применяются в таких областях, как сельское хозяйство, аэрофотосъёмка, перевозка и доставка товаров, подводная археология и др., а также используются для решения различных задач в труднодоступных местах и в экстремальных условиях. Однако некоторые виды БТС имеют ограниченные возможности по величине полезной нагрузки, диапазону наблюдения, дальности полёта и т.д. Не каждый отдельный БТС может эффективно справляться с рядом поставленных задач, в связи с чем для повышения производительности БТС, используют БТС, объединенные группы. Одна из наиболее важных и сложных задач группового управления – это задача управления группой в условиях неопределенности воздействия внешних или внутренних факторов и необходимости быстрого реагирования на такие воздействия. Например, традиционную централизованную группу БТС трудно использовать для решения конкретной задачи в условиях неопределённости, более того, ошибка в информационном центре приведет к ошибкам во всей системе. А при работе традиционной децентрализованной группы БТС следует учитывать, что масштабируемость системы недостаточная: если количество БТС в системе значительно увеличивается, совместное планирование решения задачи приведет к препятствиям, ограничивающим расширение группы БТС; причина заключается в том, что интеллектуализация в условиях неопределенности в значительной степени зависит от структуры представления информации и алгоритмов группового управления, а их соответствие, как правило, упускается из виду.

В децентрализованной системе группового управления БТС при применении алгоритмов управления групповым поведением в условиях неопределенности основная проблема заключается в том, что сложно оценить внутреннее состояние группы и оптимизировать процесс управления групповым поведением БТС.

Задачи, рассматриваемые в исследовании, направлены на улучшение таких качеств системы, как ситуационная осведомленность, управляемость, возможность координации групповых действий для более эффективного выполнения миссии группой БТС в условиях неопределенности при совместной их работе с целью значительного уменьшения потерь, вызванных недостатками существующих групповых алгоритмов. Более того, разрабатываемые алгоритмы и система управления должны удовлетворять как требованиям общих задач управления групповым поведением БТС, так и требованиям ряда локальных задач, входящих в глобальные задачи (например, при облете группой препятствия требуется построение траектории отдельным БТС).

Таким образом, разработка интеллектуальной системы управления групповым поведением БТС в условиях неопределенности является актуальной задачей.

Решение данной задачи связано с широким кругом научных проблем и включает такие направления, как теория многоагентных систем, теория сложных систем, теория сетевого взаимодействия. Решением различных существующих проблем построения систем группового управления, особенно в области разработки алгоритмов управления, занимались и продолжают заниматься многие известные ученые, такие как Рейнольдс К, Вичек Т, Дориго М, Херардо Б, Ольфати-Сабер Р и т.д.; они заложили теоретическую основу алгоритмов управления на основе роевого интеллекта. Чжоу Х, Муслимов Т.З., Флореан Д и др занимались групповым поведением БТС, а Васархей Г, Су Х, Ян С. и другие известные ученые занимались групповым поведением на основе роевого интеллекта. Количество научных статей, опубликованных по данной теме, значительно выросло в последнее время.

Цель исследования. Целью диссертационной работы является повышение эффективности управления групповым движением БТС в условиях неопределенности на основе интеллектуализации управления для удержания формы строя с помощью стратегии быстрого реагирования на случайные изменения формы строя в случае нарушения заданной формы.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **задачи:**

1. Анализ и обоснование метода синтеза информации для частично наблюдаемых систем управления групповым движением строя БТС в условиях неопределенности.

2. Разработка метода построения интеллектуальной системы управления, основанной на роевом интеллекте, для обеспечения заданной формы строя при групповом движении.

3. Разработка целевых показателей и критериев эффективности группового управления.

4. Экспериментальный сравнительный анализ решения задачи управления групповым поведением БТС при различных сложных рабочих сценариях и проверка эффективности алгоритма.

Объектом исследования является система управления групповым движением строя БТС в условиях неопределенности.

Предметом исследования являются системы оптимизации процессов управления групповым поведением, позволяющие повысить управляемость и надежность системы управления групповым поведением БТС.

Методы исследования. В ходе работы над диссертацией использованы теория интеллектуальных систем управления, теория многоагентных систем, частично наблюдаемая марковская модель, модель и теория группового управления движением.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в решении следующих научных задач:

1. Предложен метод синтеза информации для группового управления БТС в частично наблюдаемых системах управления, отличающийся тем, что с целью повышения точности оцененных состояний вводится и используется дополнительный коэффициент доверия, что позволяет повысить достоверность оценивания состояния.

2. Предложен новый метод формализации интеллектуальной системы управления групповым движением строя БТС в режимах формирования строя, крейсерского полета и маневрирования на основе машинного обучения, отличающийся тем, что он обеспечивает согласованное взаимодействие в рабочем пространстве с вычисляемой наблюдаемостью и управляемостью, что позволяет реализовать оптимизацию внутреннего состояния группы БТС и поддерживать заданную геометрическую форму движения строя.

3. Предложены система целевых показателей и критерии эффективности интеллектуального управления движением строя БТС, отличающиеся тем, что в них совмещены оценки задач движения по маршруту и децентрализованного управления строем БТС, что позволяет повысить эффективность группового управления.

4. Разработана новая библиотека программ тестирования для решения задачи группового управления в виртуальной среде, что позволяет решать согласованные задачи управления большими группами БТС в условиях неопределенности.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод синтеза информации в частично наблюдаемой многоагентной системе в условиях неопределенности для группового управления движением строя БТС (соответствует п.4 паспорта специальности 2.3.1).

2. Метод формализации стратегий группового управления движением строя БТС в режимах формирования строя, крейсерского полета и маневрирования (соответствует п.4 паспорта специальности 2.3.1).

3. Целевые функции и критерии эффективности интеллектуального управления группой (соответствует п.3 паспорта специальности 2.3.1).

4. Программная реализация тестирования алгоритмов группового управления в условиях неопределенности (соответствует п.5 паспорта специальности 2.3.1).

Личный вклад автора. Все вынесенные на защиту положения диссертации сформулированы лично автором, автором разработаны программы для их реализации и получены результаты, выполненные с применением моделирования и расчетов.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.1. – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Теоретическая ценность и практическая значимость состоит в разработке модели группового движения, в которой предложен модифицированный алгоритм группового управления, а также метод подпространства наблюдений, позволяющие решать задачи оптимизации при групповом движении. Полученные результаты позволяют расширить класс решения многих важных практических задач при использовании группы БТС, среди которых задачи более точного и быстрого обнаружения источника возгорания и предотвращения пожаров в больших лесных массивах, логистические задачи транспортировки товаров на больших географически распределенных территориях, разработка крупномасштабной сети обмена информацией между беспилотными машинами для принятия совместных решений и ряд других гражданских задач. Практическая значимость работы обусловлена внедрением результатов исследования в организации, связанные с тематикой данной научной работы, которые подтверждены соответствующими актами.

Апробация работы – Результаты работы апробированы на следующих конференциях и научных мероприятиях:

1. Юйцин Ч. Модель системы управления беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера) [J]. Информатика, телекоммуникации и управление, 2022, 15(3): 49–61. (Журнал в перечне ВАК, K2)

2. Юйцин Ч. Формирование управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов на основе алгоритма многоагентной модели роевания [J]. Информатика, телекоммуникации и управление, 2022, 15(4): 22–36. (Журнал в перечне ВАК, K2)

3. Zhu Y. Shkodyrev V.P. Swarm Flight of UAV in Virtual Rigid Formation Using Olfati-Saber Algorithm[M]//Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 849–863. (Scopus)

4. Чжу Юйцин, Боряев А.А. Некоторые вопросы идентификации экспериментальных моделей объектов управления. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. № 5, 2019. С. 35–40. 1,34/0,4. Издательство ООО «Научные технологии». (Научная статья. Журнал в перечне ВАК, K3)

5. Чжу Юйцин, Боряев А.А. Обзор по дискретным системам управления. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. № 10, 2019. С. 56–70 2,8/0,9 Издательство ООО «Научные технологии». (Научная статья. Журнал в перечне ВАК, K3)

6. Чжу Юйцин, Боряев А.А. Модель системы управления беспилотного аппарата. Proceedings of the III International Multidisciplinary Conference «Recent Scietific Investigation». Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA. 2020. 0,5 (статья в сборнике трудов конференции).

7. Чжу Юйцин, Боряев А.А. Control and pre-processing of data on driving parameters of an unmanned vehicle for identification of the control model.

Proceedings of the II International Multidisciplinary Conference «Prospects and Key Tendencies of Science in Contemporary World». 0,5 Bubok Publishing S.L., Madrid, Spain. 2020 (статья в сборнике трудов конференции).

8. Чжу Юйцин, Боряев А.А. A brief overview of the state of research on driverless vehicle control systems. Proceedings of the II International Multidisciplinary Conference «Innovations and Tendencies of State-of-Art Science». 0,5 Mijnbestseller Nederland, Rotterdam, Nederland. 2020 (статья в сборнике трудов конференции).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 134 наименования, и приложений. Работа изложена на 179 листах машинописного текста, содержит 45 рисунок и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель диссертационной работы и перечислены решаемые задачи, определены научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведен обзор исследований в области БТС и поставлена задача разработки системы управления групповым поведением БТС, описан алгоритм, соответствующий децентрализованной системе. Проведен анализ текущих основных проблем и формализована постановка задач, решаемых в диссертации.

Основываясь на алгоритме управления отдельными БТС и методах планирования траектории, исследователи предложили традиционные алгоритмы управления группой БТС. Однако планирование траектории является сложной задачей, и система сталкивается с трудностями и ограничениями при увеличении размера группы. Использование алгоритмов группового управления БТС на основе локального правила движения и реагирования, а именно алгоритма на основе роевого интеллекта, например, искусственного потенциального поля, определенного относительно расстояния между членами группы БТС, позволяет решить проблему предотвращения столкновений и преодоления препятствий. Преимущества такого алгоритма подтверждаются рядом исследований. Глобальное скоординированное движение в классических моделях примененные алгоритмы группового управления часто описывают как комбинацию локальных взаимодействий, происходящих на индивидуальном уровне, и эти взаимодействия представлены с помощью потенциальных полей. Но исходная функция искусственного потенциального поля является громоздкой и сложной для вычислений, что негативно сказывается на скорости реагирования группы. Эти модели не гарантируют быстрое и безопасное совместное движение БТС, летающих в «загруженной» среде, таких как леса и городские районы.

Таким образом, формулируется задача интеллектуального группового управления БТС, основанного на развитии концепции «роевого интеллекта, задающая принципы коллективного поведения» на основе локальных взаимодействий отдельных объектов между собой и с окружающей средой.

Постановка решаемых задач в данном исследовании имеет 2 аспекта.

1. *Информационная согласованность* в условиях неопределенности.

В условиях неопределенности состояния системы и среды являются частично наблюдаемыми. Задача состоит в том, как получить глобальную информацию о системе и среде

$$(\hat{s}_i^i) \Rightarrow (s_i^i)$$

2. *Согласованность движения* для роя БТС.

Для группы БТС вводится понятие «Целевое состояние группы БТС» S_Σ , которое формируется как объединение двух типов целей в двух системах координат:

Цель S_i^G для «удержания строя / удержания места в строю» в системе координат формы строя, $S_i^G = (u_i^v, v_i^v)$, состояния БТС $S_i^t = (u_i, v_i)$,

$$\{\dot{u}_i(t) = v_i(t)\}$$

Для удержания строя, удержание места в строю

$$U(U, V): J(\|S_i^t - S_i^G\| \Rightarrow \min)$$

Матрица преобразования, $Q_i(t) = R(\psi)LU_i^v(t)$,

$$U(U, V): S_i^G \Rightarrow Q(Q, P): S_{\Sigma_i}$$

Групповая стратегическая цель группы S_{Σ_G} , задающая цель удержания маршрутного задания для движения всей группы БТС в инерциальной системе координат/в глобальной системе координат:

$$U: J(\|S_{\Sigma_G} - S_{\Sigma_t}\|) \Rightarrow \min_{U_i^\Sigma \in R^n}$$

$$J\left\{\left(\|q_{\Sigma_G}^i - q_{\Sigma_t}^i\| + \left(\|\dot{q}_{\Sigma_G}^i\| - \|\dot{q}_{\Sigma_t}^i\|\right)\right) \Rightarrow \min\right\}_{U_i^\Sigma \in R^n}$$

Технические проблемы при разработке системы управления БТС заключаются, во-первых, в наблюдении и количественной оценке внутреннего состояния группы; во-вторых, в оптимизации процессов управления групповым поведением во внутренней большой групповой системе. Согласно имеющимся результатам на текущий момент решения для этих проблем не получены, и поставленные вопросы остаются открытыми для исследования.

Во второй главе рассмотрена задача моделирования БТС и его системы управления. Задача управления поведением группы БТС в различных областях выдвигает технические требования к индивидуальным БТС в виде

стандартов безопасности, способности выполнения соответствующих задач, стоимости, летной годности и т.д. Более того, группа БТС представляет собой сложную систему. Следовательно, структура системы управления должна удовлетворять различным техническим требованиям на различных уровнях, таких как уровни отдельного БТС, БТС с соседними БТС, групповых движений для того, чтобы обеспечить решение задач управления и оптимизации. Исследование динамики и моделирования БТС, а также исследование характеристик БТС являются актуальными задачами при проектировании системы управления группой БТС; они рассмотрены в данной главе.

Для того, чтобы обеспечить безопасность полетов и выполнить технические требования, при разработке БТС и системы управления группой БТС целесообразно применять "системную инженерию на основе моделей" ("Model-Based Systems Engineering" - MBSE). Исследование модели структуры БТС и модели динамики является основным содержанием данной главы.

В третьей главе представлены математические модели децентрализованных групповых систем, и рассматривается взаимодействие между членами группы БТС и соседними БТС. Группа БТС в условиях неопределенности – это многоагентная децентрализованная система, которая не обладает полной информацией о внутреннем состоянии группы и об окружающей среде. Трудность использования этих систем заключается в том, что необходимо получить общую убедительную оценку состояния группы (убедительная точность в быстродействии и позиционировании) с ограниченным диапазоном связи и наблюдения для принятия решений.

В связи с этим в главе анализируется структура и протокол обмена информацией, а также метод принятия решений. Правильно подобранная структура группового управления и информационного взаимодействия позволяет агентам группы БТС быстро сходить к желаемому строю для того, чтобы повысить быстродействие и надежность функционирования системы и выполнять сложную задачу.

(1) Метод подпространства наблюдения

Проведено количественное измерение внутреннего состояния группы, вводится управляемая и оптимизируемая структура, и координируется взаимодействие между отдельными БТС в группе за счет потенциального поля в одном информационном поле - подпространствах наблюдений. Кроме того, разработаны возможные варианты избегания препятствий для ряда сценариев.

В данной работе наблюдаемое состояние группы определяется путем оценивания плотности распределения. Трехмерное пространство наблюдения S дискретизируется, и выделяется подпространство наблюдения s_n . В подпространстве наблюдений используется упрощенный групповой алгоритм, реализующий отслеживание внутреннего состояния группы БТС и

оптимизацию для преодоления недостатков простой идеализированной самоорганизующейся структуры, что позволяет разделить сложную проблему на части, уменьшить требуемую мощность вычисления, обеспечить быстрое реагирование при движении и в результате позволяет применить алгоритм к многоагентной системе с большим числом БТС (десятки и сотни БТС).

(2) Модель многоагентной системы

В этом информационном поле система группы БТС моделируется как частично наблюдаемый марковский процесс. Математическую модель агента i (именно i -го БТС, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, n - количество БТС в группе) можно описать следующими параметрами из множества:

$$(\hat{s}_t^i, \hat{P}_t^i, X_t^i, \rho_t^i, \bar{s}_t^i, \bar{P}_t^i),$$

где $\hat{s}_t^i \triangleq [\hat{s}_t^{i,1}, \hat{s}_t^{i,2}, \dots, \hat{s}_t^{i,M}]$ – оценочное значение (скорость, м\с, и положение, м) каждого целевого состояния для агента i . Оценочная ковариационная матрица равна $\hat{P}_t^i \triangleq [\hat{P}_t^{i,1}, \hat{P}_t^{i,1}, \dots, \hat{P}_t^{i,M}]$. Измеряемая область $X_t^i \triangleq \{q \mid \|q_t^i - q\| \leq R^o\}$ определяет дальность наблюдения агента i в момент времени t ; агент j (именно j -го БТС, $j \in \{1, 2, \dots, n\}, i \neq j$, n - количество БТС в группе) — это соседний агент, который находится в этой области, векторный параметр q (положение и расстояние, м) представляет собой координаты положения в трехмерном пространстве. Коэффициент доверия наблюдаемых состояний $\rho_t^i \triangleq [\rho_t^{i,1}, \rho_t^{i,2}, \dots, \rho_t^{i,M}]$ используется для количественной оценки состояния каждой цели, полученной для i -го агента.

(3) Информационное взаимодействие (оценивание и обмен информацией)

Процесс информационного взаимодействия состоит из 3 частей, а именно процесс оценивания, обмена и синтеза информации.

Прежде чем приступить к процессу обмена информацией, полученные параметры для i -го агента при k -м цикле обмена информации ($k \in \{1, 2, \dots, m\}$, m зависит от ограничения во времени) должны быть приведены к следующему виду:

$$(\hat{s}_k^i, \hat{P}_k^i, R_k^i, \rho_k^i, \bar{s}_{k-1}^i, \bar{P}_{k-1}^i),$$

причем на этапе процесса обмена и синтеза информации, последние два параметра i -го агента обновляются по протоколу максимальной согласованности.

При k -й итерации i -ый агент отправляет информацию о состоянии $(\rho_{k-1}^i, \hat{s}_{k-1}^i, \hat{P}_{k-1}^i)$ соседним агентам, находящимся в пределах диапазона связи $i_x \in I_{un}^i$, и получает информацию от соседних агентов. i -ый агент обновляет информацию состояния до $(\rho_k^i, \hat{s}_k^i, \hat{P}_k^i)$ по протоколу максимальной согласованности. Закон обновления о протоколе максимальной согласованности выражает величина:

$$\rho_k^{i,j} = \max_{i_x \in I_n^i} \{\rho_{k-1}^{i_x,j}\}, j=1,2,\dots,M$$

где i -й агент одновременно обновляет соответствующие данные о состоянии $\hat{s}_k^{i,j}$ и ковариационную матрицу ошибок $\hat{P}_k^{i,j}$. Вышеуказанный процесс обмена и обновления информации повторяется до тех пор, пока не будет получен согласованный коэффициент доверия для всех агентов. Для распределенных систем необходимо определить количество итераций D^i . Количество итераций является условием для прекращения обновлений и завершения процесса информационного взаимодействия агентов.

(4) Задача распределения целей задач

Для принятия совместных решений в многоагентной системе общую задачу необходимо разделить на несколько подзадач. Распределение задач для групп БТС, т.е. принятие решений и распределение целей для групп агентов, отслеживающих несколько целей, обычно решается в два этапа. Сначала получают оптимальную траекторию для агентов до каждой цели, либо путем перечисления (дискретная ситуация), либо методом оптимального планирования. Затем выполняется распределение задач, которое может быть смоделировано как максимальное взвешенное двустороннее сопоставление, обычно решаемое с помощью классического алгоритма Кун-Мункреса (основанного на алгоритме Венгерова). В результате чего агенты получают цели для отслеживания (т.е. задачи распределения), см. рисунок 1.

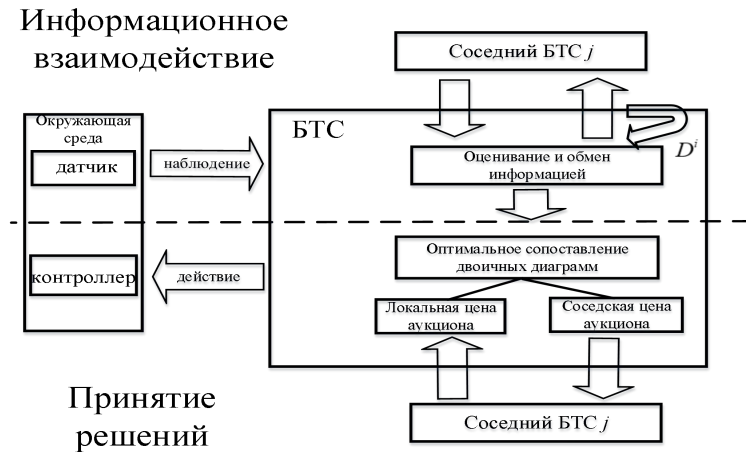


Рисунок 1. Оценивание, обмен информацией и принятие решений

Как показано на рисунке 1, принятия решений по распределению многоцелевого отслеживания состоит из двух этапов, а именно оценивание и обмен информацией и распределение задач для многоагентной системы. Первый этап позволяет агентам обмениваться информацией и получать согласованное состояние $\hat{s}_t^i, \hat{P}_t^i$, в то время как второй этап используется для совместного назначения и отслеживания целей, а также выбора оптимальных действий a_t^i .

В четвертой главе рассматривается классификация и развитие существующих моделей и алгоритмов управления групповым поведением БТС, соответствующих децентрализованной системе.

Алгоритм группового управления основан на реагировании подобно интеллекту насекомых, но требуется реализовать сложную функцию, не может быть выполнено на практике. Выход состоит в разработке упрощенного алгоритма и его применении в контроллерах на основе нечеткой логики для системы управления групповым поведением БТС.

Принцип алгоритма управления групповым поведением в данной системе заключается в формулировании закона индивидуального движения или планировании траектории в зависимости от анализа тенденции различий между целевым векторами и текущим движением БТС.

Учитывается сложность рабочих задач в различных средах. В соответствии с различными сценариями, разными характеристиками, такими как относительное ожидаемое расстояние, относительная ожидаемая скорость и энтропия в системе, предложены различные режимы работы и применяются различные алгоритмы. Так, в зависимости от разных сценариев, определённых и идентифицируемых с помощью контроллера, осуществляется установка разных коэффициентов в алгоритме. Таким образом, система позволяет формулировать различные комбинации режимов работы агента и примененных алгоритмов в соответствии с выполняемой целевой функцией.

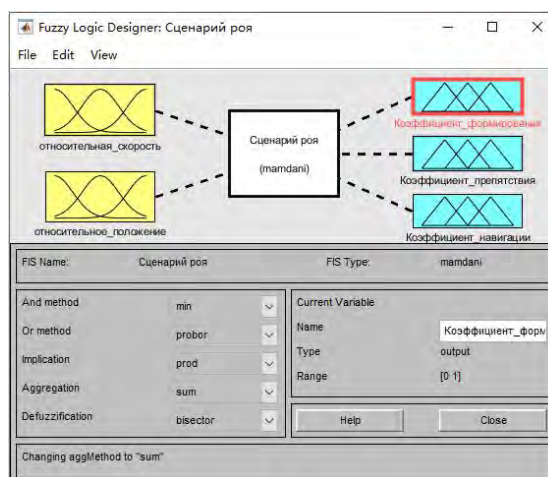


Рисунок 2. Контроллер на основе нечеткой логики

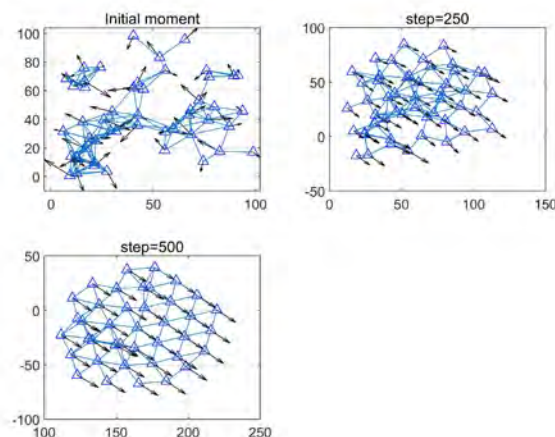


Рисунок 3. Движение агентов (БТС) под управлением группового алгоритма

В данной главе сценарии работы разделены на два типа: обычные рабочие сценарии и рабочие сценарии для чрезвычайных ситуаций. Для различных рабочих сценариев применяются разные алгоритмы.

(1) Упрощенный алгоритм группового управления

На основе информации о работе интеллекта насекомых Олфати-Сабер разработал классический групповой алгоритм для многоагентной системы,

который широко применяется во многих работах. Результат группового движения показан на рисунке 3. Однако вычисления функций в модели являются сложными и трудоёмкими. В данной работе предложен упрощенный алгоритм, применяющийся в режимах чрезвычайных ситуаций.

Представим элемент управления i -го агента как комбинированное действие трех элементов управления (дифференциация скорости, ускорение, как силы в потенциальном поле, м/с^2):

$$u_i = u_{i,j} + u_i^d + u_i^r.$$

Уравнение движения группы БТС в многоагентной системе представим следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{q}^r = p^r \\ \dot{p}^r = u_i, \end{cases}$$

Потенциальная функция i -го агента в искусственном потенциальном поле, созданном i -м и j -м агентом, выражается следующим образом:

$$u_i = f_i = f_{i,j}(q_i, q_j) + f_i^d(q_i, q_j, p_i, p_j) + f_i^r(q_i, p_i, q^r, p^r),$$

$$f_{i,j}(\|q_j - q_i\|) = -\nabla_{q_i} \varphi_{i,j}(\|q_j - q_i\|) = f(\|q_j - q_i\|)n_{i,j},$$

где $\| \cdot \|$ представляет собой значение модуля вектора. i -й агент получает силу потенциального поля, создаваемую j -м агентом, которая представляет собой отрицательный градиент энергии потенциального поля в позиции i -го агента:

$$\varphi_{i,j}(\|q_j - q_i\|) = \varphi(\|q_j - q_i\|),$$

$$f_i^d = \sum_{j \in N_i} a_{ij}^d(q_i, q_j)(p_j - p_i),$$

где $a_{ij}^d(q_i, q_j)$ – весовой коэффициент, который представляет собой плавную ступенчатую функцию второго порядка относительного расстояния между агентами.

$$a_{ij}^d(q_i, q_j) = s_1(\|q_j - q_i\|),$$

$$f_i^r = c_1^r(q_r, q_i) + c_2^r(p_r - p_i),$$

где $c_1^r(q_r, q_i)$ – согласование положения, $c_2^r(p_r - p_i)$ – согласование скорости, это функции плавного насыщения второго порядка; c_2^r – постоянный коэффициент.

$$c_1^r(q_r, q_i) = c_1^r s_3(\|q_r - q_i\|) \frac{q_r - q_i}{\|q_r - q_i\|},$$

где c_1^r – коэффициент согласования положения; $\|q_r - q_i\|$ – расстояние между агентами.

Таким образом, можно получить следующие формулы:

$$\begin{cases} \dot{q}^r = p^r \\ \dot{p}^r = -\nabla_{q_i} \sum_{j \in N_i} \varphi_{i,j}(\|q_j - q_i\|) + \sum_{j \in N_i} s_1(\|q_j - q_i\|)(p_j - p_i) + f_i^r(q_i, p_i, q^r, p^r), \end{cases}$$

В данном алгоритме получаем регулируемую функцию $s_1(r), s_2(r), s_3(r)$, где $s_1(r)$ и $s_2(r)$ – плавная ступенчатая функция второго порядка, $s_3(*)$ – функция насыщения второго порядка. Факторы, влияющие на выбор коэффициентов, перечислены в таблице 1. Знаком «+» обозначена

необходимость увеличения значений коэффициентов, знаком «-» - необходимость уменьшения значений, а знаком «\» - отсутствие влияния.

Факторы, влияющие на выбор коэффициентов.

Таблица 1

Влияние		Количество агентов	Точность оценки состояния	Расстояние до цели	Расстояние до ближайшего агента	Расстояние от препятствий
		Больше	Более точный	Дальше	Дальше	Дальше
Обычная ситуация		Стандартный	Стандартный	Стандартный	Стандартный	Стандартный
Чрезвычайная ситуация	Потенциальное поле	+	\	\	-	\
	Скорость	-	+	+	+	+
	Лидер	+	\	+	\	+

В следующем разделе рассматривается упрощенный алгоритм, который удовлетворяет требованиям, предъявляемым к режиму чрезвычайных ситуаций.

(2) Моделирование и сравнение

Далее рассматриваются групповые модели и моделирование алгоритмов управления групповым поведением. В работе предложен контроллер, работающий по алгоритму оптимизации проксимальной политики. Этот алгоритм проводит обучение БТС по отслеживанию цели и избеганию препятствий и столкновений на локальном уровне.

Моделирование проводилось в программе Matlab, что позволило получить следующие результаты. Если принять, что количество агентов в группе равно 75 и они разделены на 15 групп по 5 БТС в каждой группе, то результаты моделирования с моделью группового движения без упрощения показывают, что в этом рабочем режиме группа БТС не может избежать столкновения с препятствием (рисунок 4).

Построена модель управления группой БТС при помощи предложенного упрощенного группового алгоритма и метода обучения с подкреплением. Результаты выбранного метода управления показаны на рисунке 5 и рисунке 6: группа БТС облетает препятствия в случае разной их формы. На рисунках отражен результат моделирования группы из пяти БТС, так как рисунок с большим числом агентов в рассматриваемом масштабе не позволит четко и понятным образом отразить траектории движения.

Следовательно, при различных рабочих сценариях в результате использования разработанного алгоритма система управления может выполнять конкретную задачу, что позволяет повысить эффективность системы управления групповым поведением БТС. Далее предложен алгоритм

управления групповым поведением БТС при различных сложных рабочих сценариях.

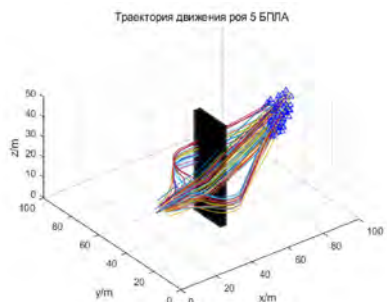


Рисунок 4. Траектория группового движения (без упрощения)

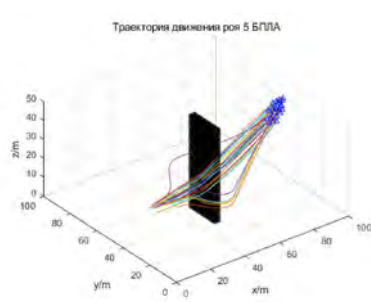


Рисунок 5. Траектория группового движения одной группы, состоящей из 5 БТС

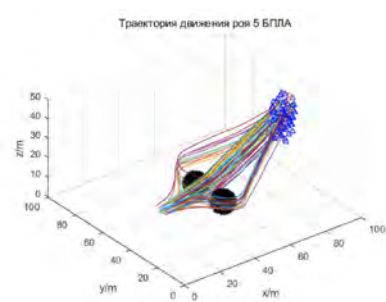


Рисунок 6. Траектория группового движения одной группы, состоящей из 5 БТС

В пятой главе рассматривается процесс управления групповым поведением БТС, и решаются некоторые технические вопросы в децентрализованной системе: количественное измерение внутреннего состояния группы, оптимизация и управление поведением отдельных БТС внутри группы.

(1) Удержание формы строя, планирование и оптимизация траектории в различных сценариях

Как показано ранее, все состояния движения в подпространстве наблюдений s_n подразделяются на режим маневренного полета, режим крейсерского полета, режим формирования строя. Система состоит из точек навигации, точек строя(конструкции), точек траектории и агентов.

Вектор положения и скорости точки навигации (желаемое положение и скорость виртуального лидера) в инерциальной системе координат, соответственно, представлены как $q^r \in R^2, p^r \in R^2$ (положение, m , и скорость, m/c), а кинематическое уравнение выражается следующим образом:

$$\{\dot{q} = p\}$$

где τ – закон управления, связанный с планированием траектории для всей группы, то есть вход управляющего сигнала u^r для всей группы БТС.

В режиме крейсерского полета, который является общим режимом полета, вектор положения и скорости движения остаются постоянными. Главная задача состоит в удержании формы строя. Различные формы строя при режиме движения в основном представлены различными комбинациями точек строя, а именно векторами ожидаемого положения и скорости.

Точки строя в одном подпространстве тесно взаимосвязаны. Набор целевых векторов в одном подпространстве может рассматриваться как заданная форма строя, именно виртуальное твёрдое тело. Точки строя – это i -е точки в системе координат формы строя, ожидаемый вектор положения и скорости – $u_i^v \in R^3, v_i^v \in R^3$

$$\{\dot{u}_i^v(t) = v_i^v(t)\}$$

Это заданная форма строя в режиме крейсерского полета. В инерциальной системе координат i -я точка строя имеет вектор положения и скорости $q_i \in R^3, p_i \in R^3$.

Матрицу преобразования можно записать следующим образом:

$$q_i = R(\psi) Lu_i^v(t),$$

Если группа переходит в режим маневренного полета, векторы скорости и положения точек в подпространстве наблюдения S_n изменяются, и агенты маневрируют из положения q_i^v в положение q_j^v . В этом процессе существует возможность возникновения столкновений между агентами и другие проблемы, поэтому необходимо дополнительно рассматривать разработку алгоритма в этом процессе. В режиме маневренного полета, а именно в процессе изменения состояния формирования группы, необходимо включить планирование и оптимизацию траектории в алгоритм группового управления. На основе этого предложены критерии оптимизации процессов управления групповым поведением для более эффективного группового управления БТС для разных классов сценариев.

Точки траектории i в модели движения можно записать следующим образом:

$$\{\dot{q}_i^p = p_i^p\}$$

где q_i^p и p_i^p являются вектором положения и вектором скорости i -ой точки траектории в инерциальной системе координат;

$\tau_i \in R^3$ является входом управляющего сигнала i -й контрольной точки траектории, которое можно представить следующим образом:

$$\tau_i^p = c_q (q_i^p - q_i) + c_p (p_i^p - p_i) + \sum_{j \in N_i} f_{i,j} + \sum_{k \in K_i} f'_{i,k},$$

Упрощенный вход управляющего сигнала:

$$\tau_i^p = c_q (q_i^p - q_i) + c_p (p_i^p - p_i),$$

Подставляя этот закон управления в модель движения, можно получить:

$$\ddot{q}_i^p + c_q q_i + c_p p_i = c_q q_i^p + c_p p_i^p,$$

Согласно критерию Гурвица, $c_q > 0, c_p > 0$.

$f_{i,j}$ — силы искусственного потенциального поля для точек траектории, которые используются для предотвращения столкновений при движении между точками траектории,

где N_i представляет набор соседей i -й точки траектории, а индекс j представляет j -ю точку траектории в наборе соседей N_i .

$f'_{i,k}$ — силы искусственного потенциального поля для предотвращения столкновения между точкой траектории и препятствием.

Если K_i представляет собой набор препятствий, то можно получить разные функции для разных видов препятствий и построить разные рабочие алгоритмы.

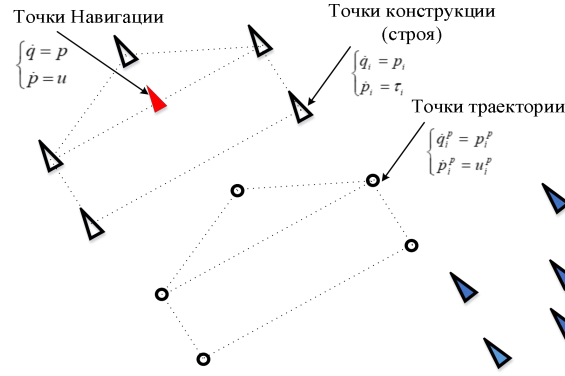


Рисунок. 8. Точки траектории в виртуальной структуре твердого тела
В режиме маневренного полета, изменение формы строя группы БТС можно разделить на следующие типы:

1. Изменение формы группы.
2. Поворот конструкции (строя).
3. Масштабирование перестроения.

u_i^v – это набор векторов положения точки конструкции (строя), которые представляет собой структурную форму. Различные значения u_i^v определяют различные формы группы БТС. $u_i^v(t)$ описывает процесс изменения формы группы.

Изменение значения $R(\psi^r)$ представляет вращение, ψ^r является функцией угла поворота виртуальной структуры. L представляет собой размер виртуальной структуры. Скорости точки строя $p_i \in R^3$:

$$p_i = p^r + \dot{R}(\psi^r)Lu_i^v + R(\psi^r)\dot{L}u_i^v + R(\psi^r)L\dot{u}_i^v(t),$$

Алгоритм управления позволяет агентам (БТС) отслеживать точки траектории, которые контролируются точками строя и приближают векторы скорости и положения БТС к векторам фиксированного или ожидаемого строя (конструкции).

Целевая функция в данном случае определяется следующим образом:

$$J = \sum_{i \in N} \left[c_q \left\| (q + R(\psi) Lu_i^v) - q_i^p \right\| + c_p \left\| (p + \dot{R}(\psi) Lu_i^v + R(\psi) \dot{L}u_i^v + R(\psi) L\dot{u}_i^v(t)) - p_i^p \right\| + \right. \\ \left. + c_q^\beta \sum_{k \in N_i^\beta} b_{i,k} (q_i^p) \varphi_\beta (q_i^p) + c_v^\beta \sum_{k \in N_i^\beta} b_{i,k} (q_i^p) (p_i^p - \hat{p}_{i,k}) + \right. \\ \left. + c_q^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} \rho_H (q_i^p) \varphi_\alpha (q_i^p) + c_v^\alpha \sum_{j \in N_i^\alpha} a_{ij} (q_i^p) (p_i^p - p_j^p) \right],$$

В диссертационной работе на основе существующего алгоритма управления большой группы предложен новый метод обработки пространства наблюдений и точек траектории, реализующий отслеживание внутреннего состояния группы БТС и оптимизацию процесса движения. В данной работе устранены недостатки существующего алгоритма - простой и идеализированной самоорганизующейся структуры. Для решения этой задачи следует предложить критерии оптимизации процессов управления групповым поведением по скорости и расстоянию. Результаты моделирования показаны ниже в подразделе (3).

(2) Разработка различных рабочих режимов

На основе исследования, представленного в главах 3 и 4, разработано общее решение для задачи управления групповым поведением БТС при различных сложных рабочих сценариях.

Различные режимы движения обладают разными характеристиками и коэффициентами, которые можно представить в виде различных комбинаций режимов движения БТС. В зависимости от разных сценариев, определённых в контроллере БТС, осуществляется установка разных коэффициентов в алгоритме.

В данной работе в качестве примера представлена задача перевозки, которую выполняет группа БТС. Существует 3 сценария работы в процессе оказания услуги авиационной доставки:

- взлёт из случайных начальных положений,
- избегание препятствий в процессе движения по маршруту,
- доставка и посадка.

Задача выполнена комбинированием ряда режимов работы, сценарии работы последовательно переключались от одного к другому, как показано в таблице 2.

Сценарии и режимы для реализации примеров.

Таблица 2

	Сценарии работы	Режимы
1	Взлёт из случайных начальных положений	3-2-1
2	Избегание препятствий	1-2-1
3	Доставка и посадка	1-2-3

Режимы работы:

1. Режим крейсерского полета происходит под управлением следующих сил:

$$\tau_i = \tau_i^\gamma,$$

$$\tau_i^\gamma = -c_q^\gamma \sigma_1(q_i - q_\gamma) - c_p^\gamma (p_i - p_\gamma) - c_h^\gamma Q_h,$$

Подстановка коэффициентов c_q^γ, c_p^γ для минимизации следующей функции:

$$J = \sum_{i \in N_i} (c_q \|q_i - q\| + c_p \|p_i - p\|) + \sum_{j \in N_i} a_{i,j} f_{i,j},$$

2. Режим маневренного полета происходит под управлением следующих сил:

$$\tau_i = \tau_i^\alpha + \tau_i^\beta + \tau_i^\gamma,$$

$$\tau_i^\alpha = -c_q^\alpha \sum \rho_H(q_i) \varphi_\alpha(q_i) - c_v^\alpha \sum a_{ij}(q_i) (p_i - p_j),$$

$$\tau_i^\beta = -c_q^\beta \sum b_{i,k}(q_i) \varphi_\beta(q_i) - c_v^\beta \sum b_{i,k}(q_i) (p_i - \hat{p}_{i,k}),$$

$$\tau_i^\gamma = -c_q^\gamma \sigma_1(q_i - q_\gamma) - c_p^\gamma (p_i - p_\gamma) - c_h^\gamma Q_h,$$

Подстановка коэффициентов $c_q^\alpha, c_v^\alpha, c_q^\beta, c_v^\beta, c_q^\gamma, c_p^\gamma$ и функции $b_{i,k}(q_i), \varphi_\beta(q_i), b_{i,k}(q_i), \varphi_{ij}(q_i), a_{ij}(q_i)$ для минимизации следующей функции:

$$J = \sum_{i \in N_i} (c_q \|q_i - q_{i-k}\| + c_p \|p_i - p_{i-k}\|) + \sum_{i \in N_i} (c_q \|q_i - q_j\| + c_p \|p_i - p_j\|) + \sum_{j \in N_i} a_{i,j} f_{i,j},$$

3. Режим формирования строя происходит под управлением следующих сил:

$$\tau_i = \tau_i^\alpha + \tau_i^\gamma,$$

$$\tau_i^\alpha = -c_q^\alpha \sum \rho_H(q_i) \varphi_\alpha(q_i) - c_v^\alpha \sum a_{ij}(q_i) (p_i - p_j),$$

$$\tau_i^\gamma = -c_q^\gamma \sigma_1(q_i - q_\gamma) - c_p^\gamma (p_i - p_\gamma) - c_h^\gamma Q_h,$$

Подстановка следующих коэффициентов $\rho_H, c_q^\alpha, c_v^\alpha, c_q^\gamma, c_p^\gamma, c_h^\gamma$ и функции $\rho_H(q_i), \varphi_{ij}(q_i), a_{ij}(q_i)$ для минимизации следующей функции:

$$J = \sum_{i \in N_i} (c_q \|q_i - q_j\| + c_p \|p_i - p_j\|) + \sum_{j \in N_i} a_{i,j} f_{i,j},$$

(3) Оптимизация и моделирование

Во-первых, рассматривается планирование траектории, где c_q, c_p - оптимизируемые коэффициенты согласно критерию Гурвица, коэффициенты $c_q, c_p > 0$. Вторичной целью оптимизации является обеспечение безопасности в процессе группового движения, определяемого коэффициентами в формуле $f_{i,j}(q_i, q_j)$ или $a_{ij}, b_{i,k}, c_q^\beta, \varphi_\beta, \rho_H$ - это вторичные оптимизируемые коэффициенты для избегания столкновения, которое зависит от вида искусственного потенциального поля (см. для примера рисунок 9) при групповом движении.

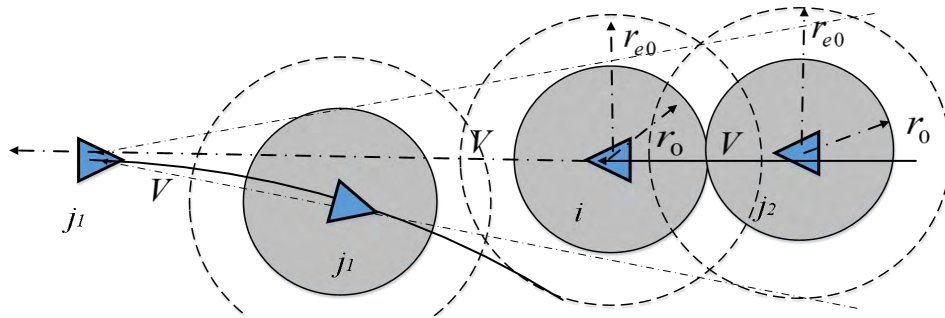


Рисунок 9. Модель обнаружения столкновений, зона безопасности и предупредительная зона

$$\text{Тогда } \begin{cases} r_{\text{опасное}} \leq \|r_{ij}\| \leq r_0 \\ \frac{(n+1)n}{2} r_{\text{опасное}} \leq \sum_{i=1}^n \Delta \|r_{ij}\| \leq \frac{(n+1)n}{2} r_0 \end{cases},$$

где r_0 – это радиус области действия искусственного потенциального поля. Если относительное расстояние между точками траектории больше r_0 , взаимодействие сил искусственного потенциального поля не происходит; Это относительно простой вариант; считаем, что в подпространстве наблюдения существует n агентов.

В неопределённой среде представляется затруднительным указать общее отдельное значение. Более надежно можно определить ряд значений для конкретных требований по эксперименту. В данной работе уставлены значения не больше 800 и не менее 68 для избегания препятствия.

Задачи, которые выполняет группа БТС, состоят в том, что из случайного начального положения (точки траектории) БТС собираются в единую группу, образуя групповое движение, и переключаются между различными формами группы.

В качестве примера для проведения моделирования представим, что в течение 1500 шагов 25 агентов сформировали 5 групп БТС в пяти подпространствах наблюдения, и группа выполняет режим маневренного полета три раза. Результаты моделирования показаны на рисунке 10.

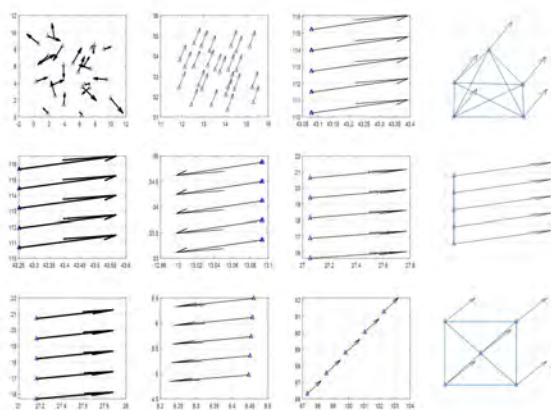


Рисунок 10. Точки траектории за 1500 шагов

На первых 500 шагах точки траектории, а именно агенты в группе, переходят в режим маневренного полета из начального случайного состояния. Когда достигнута желаемая форма движения, сформированная группа переходит в режим крейсерского полета. На следующем 1000-м шаге, группа переключается между двумя заданными формами группы. Изменение целевой функции потенциального поля имеет следующий вид.

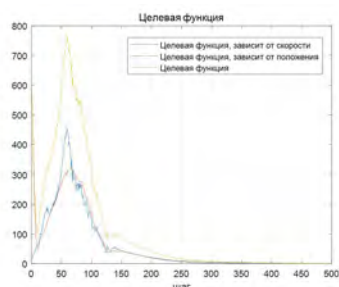


Рисунок 11. Целевая функция для первых 500 шагов

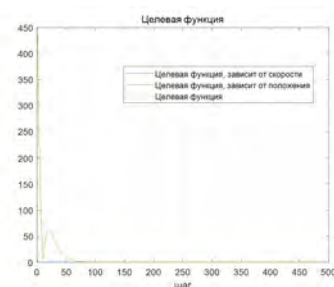


Рисунок 12. Целевая функция для 1000 – 1500 шагов

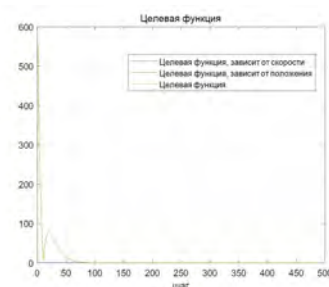


Рисунок 13. Целевая функция для 500 – 1000 шагов

На рисунке 10 показано движение группы и изменение формы группы в подпространствах наблюдений. На рисунках 11, 12 и 13 показана целевая функция при движении агентов группы. На рисунке 11 показано, как отдельные агенты, находящиеся в случайных начальных положениях и обладающие различными скоростями, быстро формируют группу в режиме маневренного полета. На рисунках 12 и 13 показано, что после окончания формирования группы целевая функция почти полностью зависит от положения. Это указывает на то, что группа агентов реализует иерархическую координацию для выполнения сложных задач в режиме маневренного полета, быстро образуя и изменяя форму, значительно снижая необходимость онлайн-вычислений при обходе препятствий агентами группы.

(4) Облет препятствия

Также в этой главе изучаются дальнейшие задачи предотвращения столкновений между членами группы и их столкновений с препятствиями для алгоритма решения задачи управления групповым поведением БТС при различных сложных рабочих сценариях. Были выделены три типа препятствий и разработаны соответствующие стратегии обхода для каждого конкретного типа (см. рисунки 14-16).

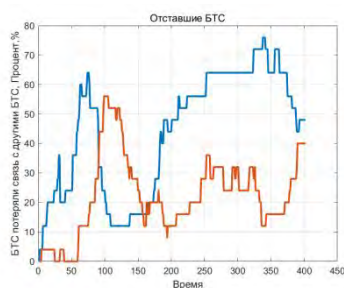


Рисунок 14. Стратегия обхода точечных препятствий

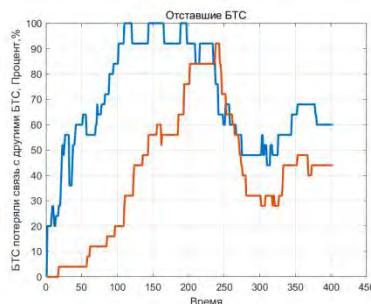


Рисунок 15. Стратегия обхода круговых препятствий

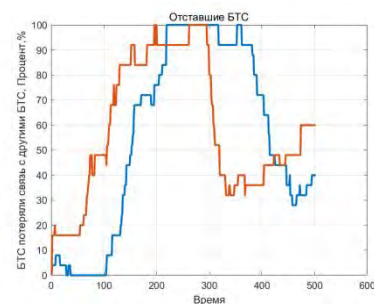


Рисунок 16. Стратегия обхода граничных препятствий

Подходящая стратегия позволяет строю быстрее и более эффективно сохранять форму при обходе препятствий. Разработанные стратегии предотвращения столкновений с препятствиями могут быть использованы в соответствии с различными сценариями.

Результаты и обсуждение

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель диссертационной работы и решаемые задачи.

В первой главе проведен обзор исследований в области беспилотных транспортных средств (БТС) и алгоритмов группового управления, проведен анализ текущих основных проблем и формализована постановка решаемых в диссертации задач.

Во второй главе рассматривается модель БТС и моделирование.

В третьей главе разработана система управления, основанная на модели группы БТС в многоагентной системе, проанализирована система обмена информацией и управление группой БТС с частично наблюдаемыми моделями, а также исследован обмен информацией об оценочных состояниях и способы распределения задач в многоагентной системе.

В четвертой главе рассмотрены развитие и классификация модели динамики группового движения, предложены новые решения для системы управления групповым поведением в сложной и неизвестной среде, а также исследован упрощенный алгоритм управления групповым поведением. Рассмотрены классификация и развитие метода обучения с подкреплением, использован метод обучения с подкреплением для того, чтобы реализовать моделирование группового движения БТС.

В пятой главе разработана система управления групповым поведением и проведена оптимизация для повышения эффективности группового

управления при выполнении различных задач на основе метода пространства наблюдений. Предоставлены алгоритмы решения задачи управления групповым поведением БТС при различных сложных рабочих сценариях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа включает в себя модель многоагентной системы, алгоритм управления групповым поведением, метод оценивания и обмена информацией, метод распределения задач, модель группового движения и критерии оптимизацию. Для создания распределенной системы интеллектуального управления групповым поведением БТС многоагентная система смоделирована как частично наблюдаемый марковский процесс, реализовано сотрудничество агентов в группе посредством информационного взаимодействия и распределения задач. Предложен модифицированный алгоритм решения задачи управления групповым поведением БТС при различных сложных рабочих сценариях, который включает критерии оптимизации процесса группового движения, структуру системы управления и метод подпространства наблюдений, обеспечивающие более эффективное и надежное управление группой БТС в заданном пространстве наблюдений.

Созданная интеллектуальная система управления групповым поведением БТС и оптимизация группового поведения в большой группе удовлетворяет техническим требованиям выполнения заданий. Полученные результаты позволяют расширить класс решения многих практических задач при использовании группы БТС. Результаты проведенных исследований внедрены и используются в организациях, связанных с темой данной научной работы, о чем составлены соответствующие акты, подтверждающие достижение поставленных в диссертационном исследовании целей.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. **Юйцин Ч.** Модель системы управления беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера)[J]. Информатика, телекоммуникации и управление, 2022, 15(3): 49–61. (Журнал в перечне ВАК)

2. **Юйцин Ч.** Формирование управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов на основе алгоритма многоагентной модели строения[J]. Информатика, телекоммуникации и управление, 2022, 15(4): 22–36. (Журнал в перечне ВАК)

3. **Zhu Y. Shkodyrev V.P.** Swarm Flight of UAV in Virtual Rigid Formation Using Olfati-Saber Algorithm[M]//Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 849–863. (статья в сборнике трудов конференции Scopus)

4. **Чжу Юйцин, Боряев А.А.** Некоторые вопросы идентификации экспериментальных моделей объектов управления. Современная наука:

актуальные проблемы теории и практики. № 5, 2019. С. 35–40 1,34/0,4. Издательство ООО «Научные технологии». (Научная статья. Журнал в перечне ВАК 2018 г. № 1868)

5. **Чжу Юйцин**, Боряев А.А. Оценка степени идентичности математической модели реальному процессу при разработке систем управления. № 5 (95). 2019. Наука и бизнес: пути развития. С. 87–92. 1,32/0,5. Издательство МОО «Фонд развития науки и культуры». (Научная статья. Журнал в перечне ВАК 2018 г. № 1338)

6. **Чжу Юйцин**, Боряев А.А. Обзор по дискретным системам управления. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. № 10, 2019. С. 56–70. 2,8/0,9. Издательство ООО «Научные технологии». (Научная статья. Журнал в перечне ВАК 2018 г. № 1868)

Публикации в других изданиях

1. Боряев А.А. **Чжу Юйцин**. Ensuring efficiency and reliability of equipment with optimization of integrated tests (Обеспечение эффективности и надежности оборудования с оптимизацией комплексных испытаний.) Heliyon. Volume 6, Issue 4. April 2020. Article e03782. (научная статья Scopus, Web of Science)

2. A. Boryaev, **Yuqing Zhu**, I. Ruchina, P. Rajczyk. Control of low-temperature characteristics of motor fuels in the Arctic. International conference of Arctic transport accessibility: networks and systems. Transportation Research Procedia 57, 2021. pp. 95–105. (статья в сборнике трудов конференции Scopus)

3. A. Boryaev, **Yuqing Zhu**, I. Chernyaev. The use of liquid, slurry, gel and solid hydrogen in fuel systems of transport equipment. Problems of territorial development of the Arctic zone and ways to solve them. International scientific and practical conference. 0,3, 2021. (статья в сборнике трудов конференции Scopus)

4. A. Boryaev, **Yuqing Zhu**. Heat and mass transfer and hydrodynamics in cryogenic hydrogen fuel systems. 1,4 Fuel, 2022. 321, 124004. (научная статья Scopus, Web of Science)

5. Boryaev, A.A., **Yuqing Zhu**, Chernyaev, I.O. The Use of Liquid, Slush, Gel and Solid Hydrogen in Fuel Systems of Transport Equipment, pp. 103–111, 2022, Proceedings of ARCTD 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 206. Springer, Cham., ISBN 978-3-030-99626-0. (статья с индексацией в Scopus)

6. Боряев А.А. **Чжу Юйцин**. Системы управления технологическими процессами. Технические измерения. Санкт-Петербург. Издательство «Трактат», 2019. – 143 с. ISBN 978-5-6043525-1-9. (Учебное пособие)

7. Боряев А.А. **Чжу Юйцин**. Технологические измерения на предприятиях химической промышленности. М.; Вологда: «Инфра-Инженерия», 2023. – 124 с.: ил., табл. ISBN 978-5-9729-1255-1. (Учебное пособие)