

На правах рукописи



**Коновалов Петр Алексеевич**

**Алгоритмы управления группой мобильных роботов в  
условиях дефицита информации о сцене**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Работа была выполнена в научном центре информационных технологий и искусственного интеллекта Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Научно-технологический университет «Сириус».

**Научный руководитель: Матвеев Алексей Серафимович,**  
доктор физико-математических наук, профессор  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский  
государственный университет»

Защита состоится 11 ноября 2026 года в 15:30 на заседании диссертационного совета НТУ.2.3.1.17 в АНОО ВО «Университет «Сириус» по адресу: 354340, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АНОО ВО «Университет «Сириус» <https://siriusuniversity.ru/sveden/science/obyavleniya-o-zashchitakh>.

Автореферат разослан 10 октября 2026 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент

Рябикова Т. В.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования** Задачи распределённого управления роями мобильных роботов приобретают всё большее значение в связи с расширением областей применения автономных групп устройств: мониторинг протяжённых объектов и территорий, инспекция, экологический контроль, патрулирование и связанные миссии. Одновременно развитие микроэлектроники, сенсорных и навигационных средств сделало практически доступным развёртывание крупномасштабных сетей недорогих мобильных роботов для мониторинга и обработки протяжённых объектов и обширных территорий. К числу типичных миссий текущего и перспективного практического применения относятся разведка, автоматизированное разминирование и минирование, инспекция, оперативное развёртывание «на лету» беспроводных ячеистых коммуникационных сетей, поисково-спасательные операции, обнаружение источников загрязнения, мониторинг пожаров и зон заражения окружающей среды, задачи распределённого обнаружения и охватывающего сопровождения целей и др. Эффективность таких миссий в решающей степени зависит от размещения элементов сети: в идеале — в оптимальных позициях, а как минимум так, чтобы любая точка обрабатываемой области или объекта попадала в зону действия хотя бы одного агента.

Для крупномасштабных команд внешнее централизованное развёртывание и управление часто оказывается непрактичным, трудоёмким, опасным или вовсе невыполнимым. Поэтому актуальны и всё более востребованы распределённые алгоритмы автономного саморазвёртывания и управления, сочетающие вычислительную простоту, однородность ролей агентов, работу при дефиците сенсорных и коммуникационных ресурсов и, по возможности, строгие гарантии нелокальной сходимости. При этом *саморазвёртывание* означает, что, стартуя из сравнительно случайных начальных положений, агенты автономно прибывают к целесообразной конфигурации и далее её поддерживают.

**Степень разработанности темы** Рассматриваемый в диссертации класс задач относится к парадигме *роевой робототехники*. При этом под *роем* понимается однородный ансамбль простых и относительно дешёвых мобильных роботов, неотличимых друг от друга (анонимных), не способных выполнять различные роли в составе команды и существенно ограниченных в сенсорных, вычислительных и коммуникационных ресурсах. Ввиду отсутствия ролевой дифференциации управление таким ансамблем сводится к индивидуальной реализации каждым роботом одного и того же правила (протокола) на основе доступных ему локальных сенсорных данных о своей малой окрестности. Требуемым результатом, однако, является скоординированное поведение и кооперация членов роя при решении глобальной задачи, превосходящей возможности отдельного агента. Иными словами, речь идёт о механизме возникновения согласованного поведения ансамбля из локальных взаимодействий многих примитивно, однородно и индивидуально действующих робототехнических агентов — в духе поведенчески-ориентированного искусственного интеллекта. Однородность обеспечивает масштабируемость, гибкость, отказоустойчивость, взаимозаменяемость агентов и снижение стоимости развёртывания и обслуживания. Вместе с тем она исключает ряд распространённых и хорошо разработанных подходов к децентрализованному управлению формациями. К

их примерам относятся методы, основанные на отношениях лидер–ведомый, применении виртуальных жёстких структур, априорном назначении меток или индивидуальных задач отдельным агентам, а также на выделении и закреплении каналов связи или взаимодействия между фиксированными парами агентов. Однородности более созвучны поведенческие подходы. Однако многие из них не дают строгих гарантий возникновения требуемой формации; позитивные исключения связаны, в частности, с протоколами консенсуса и ассоциированными методами построения формаций и покрытий.

Значительная часть литературы по управлению мобильными роботами в целях покрытия сосредоточена на геометрическом планировании траекторий для одного или нескольких роботов (в том числе с опорой на идеи клеточной декомпозиции рабочей области или её сэмплирования), а также на решении задачи статического размещения и диспетчеризации узлов на структурированных и известных сценах. Детали управления движением, кинематические и динамические ограничения, безопасность (отсутствие столкновений) и строгие гарантии нелокальной сходимости в ситуации неизвестной сцены в основном оставались за рамками рассмотрения, либо перекладывались на неспецифицированный нижний уровень управления. Однако при ограниченных вычислительных и энергетических ресурсах узлов такая двухуровневая архитектура (планировщик плюс отдельный контур исполнения) часто нежелательна. Для априори неизвестных сцен широко применяются методы виртуальных сил и потенциальных полей, а также подходы, опирающиеся на разбиение Вороного. Вместе с тем они ориентированы преимущественно на статическое (в том числе барьерное) покрытие; строгие гарантии нелокальной сходимости к требуемому распределению при этом остаются относительной редкостью. Кроме того, многие предложенные решения опираются на постоянный обмен данными между агентами, который на практике может быть недоступен или нежелателен. Ещё реже одновременно учитываются отсутствие нумерации и связи между агентами, ограниченная зона видимости и необходимость восстановления формации после прохождения препятствий или изменения состава команды.

Постоянная информационная связность команды часто просто постулируется при анализе распределённых алгоритмов, тогда как в ситуации, когда возможность передачи данных зависит от расстояния между агентами, само исполнение основного закона движения может эту связность разрушать. Один из популярных подходов к решению этой проблемы состоит в запрете любых перемещений, которые приводят к разрыву хотя бы одной из имеющихся связей. Однако этот подход может привести к недостижимости целевого распределения. Примером служит ситуация, когда роботы начинают в тесном кластере и тем самым в условиях видимости «всех со всеми», а требуется их рассредоточить по настолько обширной области, что расстояние между крайними и не только роботами превышает дистанцию сенсорного контакта. Имеющиеся альтернативные подходы связаны с тщательным отбором допускаемых к разрыву информационных связей, однако характеризуются высокой вычислительной сложностью и требуют доступа к значительному объёму информации о глобальной топологии обмена данными.

Напротив предметом настоящей работы являются основанные на локальных сенсорных данных вычислительно нетребовательные *реактивные* алгоритмы управления. *Реактивным* называется закон (протокол), который в реальном времени осуществляет прямое,

«рефлексоподобное» преобразование текущих сенсорных наблюдений в текущее управляющее воздействие без опоры на заранее вычисленный план траектории, глобальную карту сцены или интенсивный межроботный обмен сообщениями. Такие законы обычно вычислительно дешёвы и удобны для миниатюрных платформ, однако их анализ, особенно доказательство нелокальной сходимости и безопасности порождённых ими манёвров, представляет существенную теоретическую трудность.

Вместе с тем именно сочетание однородности роя, сенсорных и коммуникационных ограничений, вычислительной простоты алгоритма и строгих гарантий сходимости и выполнения необходимых требований (например, отсутствия столкновений между роботами) является общим контекстом всех глав диссертации.

Настоящая диссертация направлена на восполнение указанных пробелов для ряда практически значимых сценариев заматающего и статического покрытия, а также равномерного самораспределения на линии и в замкнутой цепи.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертации является разработка и строгое обоснование распределённых реактивных алгоритмов управления однородными роями мобильных роботов, обеспечивающих саморазвёртывание роя и эффективное покрытие априори неизвестных протяжённых областей в условиях дефицита информации о сцене и локальности сенсорных данных, а также при отсутствии средств связи и доступа к системам позиционирования.

Рассматриваемые сценарии охватывают заматающее (динамическое) и барьерное покрытие коридорообразных сцен, равномерное самораспределение на линии и в замкнутой цепи, а также статическое покрытие сложных двумерных областей при отсутствии доступа к системам позиционирования. Исследуемые модели роботов включают аналоги машины Дубинса, простой интегратор (в том числе для моделирования беспилотных наземных транспортных средств, далее UGV) и общие нелинейные уравнения второго порядка с согласованными неопределённостями. Общие для глав допущения — отсутствие информации о размере команды и сцене, средств связи и нумерации (анонимность), ограниченная зона видимости и единое правило управления для всех агентов — уточняются в каждой главе применительно к конкретной постановке.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать реактивный закон управления роем неголономных роботов типа машины Дубинса для формирования подвижного эффективного барьера поперёк неизвестного коридора и обеспечения его движения с заданной скоростью вдоль коридора; доказать нелокальную сходимость алгоритма для коридоров с прямыми параллельными стенами и исследовать его работоспособность в более сложных сценах.
2. Разработать и теоретически обосновать распределённое правило управления роем беспилотных наземных транспортных средств с кинематикой интегратора для плотного заматающего покрытия коридора с неизвестными многоугольными препятствиями и искривлёнными стенами; подтвердить работоспособность алгоритма компьютерным моделированием и экспериментами на физических роботах.
3. Построить и теоретически обосновать вычислительно нетребовательные протоколы равномерного самораспределения полностью однородной команды роботов с целью формирования решётки с заданным шагом, а также равномерного распределения на

неизвестном интервале, обеспечивающие возникновение информационной связности команды «из ничего»; проиллюстрировать разработки их применением к задачам круиз-контроля, покрытия коридоров и построения виртуальной антенной решётки.

4. Синтезировать распределённые алгоритмы самораспределения роя мобильных роботов по неизвестным сложным двумерным областям в условиях отсутствия доступа к системам позиционирования (в частности, GPS), разработать метрику, оценивающую степень равномерности покрытия области, и провести сравнительный анализ предложенных алгоритмов с известными методами решения исследуемой задачи.
5. Разработать распределённый протокол самоорганизации однородного роя роботов в равномерную замкнутую цепь (применительно к заданной циклической выходной переменной) в случае роботов с нелинейной динамикой второго порядка с согласованными неопределённостями, обеспечивающий отработку заданного временного профиля скорости и не требующий начальной информационной связности команды; теоретически обосновать сходимость и проиллюстрировать её в задачах затаивающего покрытия барьерной линии в 3D.

Все поставленные задачи были решены.

**Научная новизна:** Все основные результаты диссертации являются новыми. Результаты опубликованы в международных рецензируемых научных журналах.

1. Разработан, включая строгое обоснование, новый распределённый реактивный закон управления роем анонимных (не различающих друг друга), неголономных, неполноприводных роботов типа машины Дубинса, не снабжённых системами связи и обладающих ограниченной зоной видимости, для плотного затаивающего покрытия коридора при отсутствии нумерации роботов, знания ими размера команды и ширины коридора. Закон управления обеспечивает отсутствие столкновений роботов друг с другом и стенами коридора. Методом компьютерного моделирования установлена определённая степень робастности к искривлениям стен, препятствиям и изменениям численности команды.
2. Разработан, включая строгое обоснование, новый распределённый реактивный закон управления роем анонимных роботов с кинематикой простого интегратора, не снабжённых системами связи и обладающих ограниченной зоной видимости, для плотного затаивающего покрытия неизвестного коридора с искривлёнными стенами после прохождения полосы статических многоугольных препятствий, при отсутствии нумерации роботов, знания ими размера команды, а также параметров сцены. Закон управления обеспечивает отсутствие столкновений роботов друг с другом, препятствиями и стенами коридора. Методом компьютерного моделирования продемонстрирована применимость алгоритма при наличии динамических препятствий и разрывов информационной связности; теоретические выводы и робастность к реальным неидеальностям продемонстрированы экспериментами на физических моделях.

3. Разработаны, включая строгое обоснование, новые распределённые нелинейные протоколы равномерного самораспределения однородной команды неизвестного размера, состоящей из анонимных агентов с ограниченной зоной видимости, учитывающие ограничения на управление, для формирования одномерной решётки с заданным шагом, а также равномерного распределения на неизвестном одномерном интервале; доказана способность алгоритма к формированию информационной связности при её первоначальном отсутствии и на основе локальных данных.
4. Предложены два новых распределённых алгоритма самораспределения роя анонимных роботов с ограниченной зоной видимости по сложным неизвестным двумерным областям; предложена новая метрика для оценки степени равномерности покрытия области. Обоснование предложенных разработок выполнено на основе компьютерных экспериментов и многокритериального сравнения результатов семи алгоритмов, включающих пять ранее известных методов и два метода, предложенных в диссертации. Все рассмотренные методы, включая предложенные, применяют концепцию виртуальных сил. Показано, что по комплексу метрик предложенные алгоритмы не уступают конкурентам, а по проценту и степени равномерности покрытия превосходят их в сложных сценах с препятствиями.
5. Для роботов с динамикой второго порядка, неопределённостями и ограниченной зоной видимости разработан, включая строгое обоснование, новый распределённый протокол формирования равномерной замкнутой цепи, основывающийся на измерениях циклической выходной переменной неизвестного периода и обеспечивающий заданный временной профиль скорости движения, в том числе в условиях начальной несвязности информационного графа. Предложенный протокол робастен к смене состава команды и гарантирует отсутствие столкновений.

**Теоретическая и практическая значимость** Ценность результатов работы обусловлена значением и перспективами применения технологий и алгоритмов роевой робототехники в различных прикладных областях, а также в инженерных и естественных науках.

Теоретическая значимость диссертации состоит в развитии методов анализа и синтеза распределённых законов управления однородными роями робототехнических агентов в условиях ограниченных ресурсов: информационных, сенсорных, коммуникационных, энергетических и т.п. С теоретической точки зрения диссертация обогащает арсенал современной теории многоагентных робототехнических систем, вводя ряд новых алгоритмических решений и развивая методы изучения сходимости, эволюции информационной связности и отсутствия внутригрупповых столкновений.

Практическая значимость обусловлена применимостью предложенных алгоритмов к задачам мониторинга, инспекции, поисково-спасательных операций, экологического контроля, автономного разминирования, очистки корпуса судна, мониторинга мест захоронения отходов на дне океана, патрулирования границ, обнаружения источников загрязняющих веществ и шлейфов, мониторинга лесных пожаров, обнаружения разливов нефти, поиска в экстремальных условиях окружающей среды, технического осмотра, поиска и захвата целей и т. д. Особый интерес они представляют в сценариях минимальной априорной информации об операционной среде,

при наличии существенных ограничений на сенсорные возможности роботов, например на дистанцию сенсорного контакта или доступ к системам позиционирования, а также при наличии проблем с устойчивой связью между агентами. Экспериментальная проверка подтверждает принципиальную работоспособность подхода в условиях практического применения, в частности при наличии погрешностей датчиков и идеализаций в теоретической модели.

**Соответствие паспорту специальности** Тема и результаты диссертации соответствуют паспорту научной специальности 2.3.1 — «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» в части разработки теоретических основ, методов и алгоритмов управления сложными системами, включая многоагентные и распределённые системы управления, а также методов обработки информации в условиях неопределённости и ограничений на доступные данные.

**Методология и методы исследования** В работе используются методы теории управления многоагентными системами, теории распределённых алгоритмов достижения консенсуса, теории устойчивости динамических систем, теории скользящих режимов управления, элементы геометрического и комбинаторного анализа конфигураций, компьютерное моделирование, а также натурные эксперименты с физическими моделями роботов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Распределённый алгоритм управления роем роботов типа машины Дубинса, обеспечивающий формирование плотнейшего поперечного барьера в неизвестном свободном коридоре и его движение с заданной скоростью вдоль коридора с прямыми стенками в условиях отсутствия связи, нумерации роботов, знания размера команды и при ограниченной дистанции сенсорной видимости.
2. Распределённый алгоритм управления роем роботов с кинематикой интегратора, гарантирующий прохождение неизвестного коридора с многоугольными препятствиями и искривлёнными стенками без столкновений и при сохранении эффективной поперечной формации; обоснование возможности решения задачи вычислительно нетребовательным алгоритмом.
3. Нелинейные распределённые алгоритмы самораспределения роя анонимных роботов в узлы одномерной решётки с заданным шагом и к равномерному распределению на неизвестном интервале, обеспечивающие в определённых сценариях формирование информационной связности команды за счёт минимальных вычислительных затрат.
4. Два алгоритма самораспределения по неизвестным сложным двумерным областям в условиях отсутствия доступа к системам позиционирования.
5. Распределённый алгоритм управления роем роботов, обеспечивающий его равномерное самораспределение в замкнутую цепь по отношению к заданной циклической выходной переменной и отслеживание заданного временного профиля скорости для роботов с динамикой второго порядка и динамическими неопределённостями в условиях отсутствия начальной информационной связности.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечивается математически строгими доказательствами нелокальной сходимости

для ключевых сценариев, согласованностью теоретических утверждений с результатами компьютерного моделирования, а также экспериментами на физических моделях роботов.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы были представлены в виде устных докладов на следующих конференциях:

- 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2021), Бари, Италия, 2021;
- European Control Conference (ECC 2021), Роттердам, Нидерланды, 2021;
- 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2022), Чеджу, Республика Корея, 2022;
- XXIV конференция молодых учёных «Навигация и управление движением», Санкт-Петербург, 2022;
- ANS Conference Series: Regular and Chaotic Dynamics, Ижевск, 2023;
- 7th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE 2024), 2024;
- Fourth International Conference on Computer Communication and Network Security (CCRIS 2024), 2024.

Эти результаты также докладывались на семинарах направления «Математическая робототехника и искусственный интеллект» НТУ «Сириус», руководимых профессорами Л. М. Фридманом, Д. В. Баландиным и С. В. Гусевым, а также на семинаре кафедры теоретической кибернетики Санкт-Петербургского государственного университета, руководимом профессорами А. С. Матвеевым и А. Л. Фрадковым. Результаты диссертации использованы в работах по гранту в рамках выполнения государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научное и технологическое развитие федеральной территории «Сириус»», соглашение № 18-03 от 10.09.2024.

**Личный вклад** Все основные результаты диссертации получены автором лично. Постановка задач и общее научное руководство осуществлялись научным руководителем А. С. Матвеевым. В работах [1–8] соавтору принадлежит постановка задач и консультативное участие; разработка алгоритмов, доказательства утверждений (в заявленном объёме), численные эксперименты и подготовка текстов выполнены автором. В работе [9] результаты получены совместно с А. С. Матвеевым и К. А. Гордиевичем: постановка задачи принадлежит научному руководителю, разработка и обоснование алгоритмов — автору; К. А. Гордиевич проводил компьютерное моделирование в симуляторе Gazebo с использованием ROS в условиях, приближённых к реальным, автор выполнял тесты компьютерного моделирования в среде Jupyter Notebook на языке Python в условиях, приближённых к теоретическим. В тезисах [10] все результаты получены автором лично. В работе [11] результаты получены совместно с соавторами; вклад автора состоит в разработке и анализе алгоритмов управления. В тезисах [12] результаты получены совместно с К. А. Гордиевичем: К. А. Гордиевич проводил компьютерное моделирование в симуляторе Gazebo с использованием ROS, автор использовал среду Jupyter Notebook и язык Python.

**Публикации** Основные результаты диссертации изложены в 12 печатных работах, в том числе 5 статей — в изданиях из перечня научных журналов, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов диссертаций

и входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus [1—4, 9], и 7 работ — в трудах конференций и сборниках тезисов [5—8, 10—12]. Основные результаты глав 1, 2, 3, 4 и 5 изложены соответственно в работах [1], [9], [2], [3] и [4].

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Общий объём работы составляет 203 страницы, включая 49 рисунков, 2 таблицы, 211 наименований в списке литературы и 4 приложения.

## Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы, характеризуется степень её разработанности, формулируются цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология, положения, выносимые на защиту, соответствие паспорту специальности, достоверность, апробация, личный вклад и публикации; кратко очерчивается структура диссертации. Общий контекст работы — реактивные законы управления однородными роями при дефиците сенсорной и коммуникационной информации, с акцентом на строгие гарантии нелокальной сходимости.

**Первая глава** посвящена плотному заматающему покрытию неизвестного коридора роем неголономных роботов типа машины Дубинса. В коридорообразной сцене требуется сочетать барьерное и заматающее покрытие: однородная команда неизвестного размера должна выстроиться поперёк неизвестного коридора в наиболее плотный барьер и перемещать его вдоль коридора с заданной скоростью  $v_{\text{des}} > 0$  без столкновений роботов друг с другом и со стенами. Роботы не имеют средств связи, не различают друг друга, не способны выполнять специализированные роли, не знают размера команды  $N$  и ширины коридора  $w$ . Каждый робот опирается только на информацию о направлении коридора и относительных положениях роботов и фрагментов стен, находящихся в зоне видимости радиуса  $R_{\text{sen}} > 0$ , а также на измерение собственной скорости. В теоретической части коридор моделируется полосой между двумя параллельными прямыми, описываемыми уравнениями  $y = \pm w/2$  в некоторой декартовой системе координат на плоскости; при компьютерном моделировании рассматриваются также искривлённые стены и препятствия.

Кинематика  $i$ -го робота имеет вид

$$\dot{x}_i = v_i \cos \theta_i, \quad \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i, \quad \dot{v}_i = a_i, \quad \dot{\theta}_i = \omega_i, \quad |a_i| \leq \bar{a}, \quad |\omega_i| \leq \bar{\omega},$$

причём допустимая линейная скорость ограничена условием  $v_i < \bar{v}$ . Здесь  $x_i, y_i$  — координаты  $i$ -го робота, а  $\theta_i$  — угол его ориентации. Плотнейшее размещение  $N$  роботов в поперечном сечении  $x = x_*$  достигается в точках  $e_j(x_*)$  с ординатами

$$y_j = -\frac{w}{2} + \frac{w}{2N} + \frac{jw}{N}, \quad j = 0, \dots, N-1.$$

При таком размещении расстояние между соседними роботами равно  $w/N$ , а максимальное расстояние от произвольной точки сечения коридора до ближайшего робота равно  $w/(2N)$ .

Цель управления состоит в том, чтобы исключить столкновения и обеспечить существование нумерации роботов и числа  $x_*$ , для которых

$$\|\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{e}_i(v_{\text{des}} t + x_*)\| \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0 \quad \forall i.$$

Предложен вычислительно нетребовательный реактивный закон управления, реализуемый в парадигме скользящих режимов. По локальным данным определяются модифицированные поперечные расстояния  $d_i^\pm$ , учитывающие ближайших видимых соседей и стены, и множество  $\mathcal{N}_i = \{j : \|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i\| \leq R_{\text{sen}}, |x_j - x_i| \leq \delta\}$ , включающее самого робота  $i$ . Весовые коэффициенты и целевые компоненты скорости задаются формулами

$$\begin{aligned} w_{ji} &= W\left(\frac{\|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i\|}{R_{\text{sen}}}\right) W\left(\frac{|x_j - x_i|}{\delta}\right), \\ v_i^y &= \Xi[d_i^+] - \Xi[d_i^-], \\ v_i^x &= v_{\text{des}} + \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} w_{ji}\right)^{-1} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} w_{ji} \Upsilon[x_j - x_i]. \end{aligned}$$

Здесь  $W, \Xi, \Upsilon$  — выбираемые разработчиком функции, подчинённые указанным в главе условиям регулярности, ограниченности и знака:  $W$  задаёт веса соседей,  $\Xi$  — поперечную, а  $\Upsilon$  — продольную коррекцию;  $\delta \in (0, R_{\text{sen}})$  — параметр отбора соседей. В частности,  $W(0) = 1$ , поэтому  $w_{ii} = 1$ , а  $\Xi$  не убывает. Поперечная целевая компонента  $v_i^y$  выравнивает модифицированные поперечные расстояния, а продольная  $v_i^x$  согласует абсциссы роботов и задаёт требуемую скорость движения барьера. Далее вычисляются целевые ускорения

$$a_i^x = \bar{a}^x \mathbf{sgn}(v_i^x - \dot{x}_i), \quad a_i^y = \bar{a}^y \mathbf{sgn}(v_i^y - \dot{y}_i),$$

которые преобразуются в линейное ускорение  $a_i$  и угловую скорость  $\omega_i$  с применением, при необходимости, насыщения для соблюдения ограничений на ускорение и угловую скорость робота. Решения возникающей разрывной замкнутой системы понимаются в смысле Филиппова.

Необходимые ограничения для выполнимости миссии принимаются в усиленной форме:  $v_{\text{des}} < \bar{v}$  и  $w/N < R_{\text{sen}}$ . Перед включением основного закона предполагается начальный манёвр, приводящий к ситуации, когда роботы неподвижны, находятся внутри коридора на различных расстояниях от стен, ориентированы в целевом направлении и расположены в общей поперечной полосе, ширина которой вдоль коридора меньше  $\delta$ . Основная теорема утверждает, что при выполнении указанных условий можно выбрать параметры регулятора (включая функции  $W, \Xi, \Upsilon$ ) так, что:

- (i) роботы достигают сформулированной цели плотного заметающего покрытия;
- (ii) для всех  $t > 0$  соблюдаются ограничения  $v_i(t) < \bar{v}$  и  $\dot{x}_i(t) > 0$ ;
- (iii) продольный разброс  $\varsigma(t) := \max_{i,j} |x_i(t) - x_j(t)|$  не возрастает со временем.

Компьютерное моделирование подтверждает робастность закона к искривлениям стен, препятствиям, изменениям численности команды, шумам измерений и неидеальностям приводов. Результаты опубликованы в [1]; предварительные результаты представлены в [7, 8].

**Вторая глава** посвящена проблеме заматающего покрытия коридорообразной сцены с препятствиями. На плоскости рассматривается рой автономных мобильных роботов с кинематикой простого интегратора

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{v}_i, \quad \|\mathbf{v}_i\| \leq \bar{v},$$

где вектор скорости  $\mathbf{v}_i$  является управляющим входом. Вводится декартова система координат на плоскости, в которой коридор ограничен стенами, описываемыми уравнениями  $y = \pm w/2$ ; внутри него расположено конечное число неизвестных непересекающихся многоугольных препятствий. Результаты распространяются также на направленные коридоры с непрямыми полигональными стенами при выполнении сформулированных в главе геометрических условий. Роботы не используют связь, не различают друг друга, не знают размера команды  $N$ , ширины коридора  $w$  и параметров препятствий и применяют единое реактивное правило по локальным сенсорным данным в зоне видимости радиуса  $R_{\text{sen}}$ .

Обозначим через  $\mathbf{p}_j(x)$  точку с абсциссой  $x$  и ординатой

$$y(\mathbf{p}_j(x)) = -\frac{w}{2} + \frac{jw}{N+1}, \quad j = 1, \dots, N.$$

Эти точки равномерно распределены по поперечному сечению коридора.

**Определение.** Скажем, что роботы проходят сцену со скоростью  $v_{\text{des}}$ , если они не сталкиваются со стенами, препятствиями и друг с другом и существуют число  $x_*$  и нумерация роботов, для которых

$$\|\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{p}_i(v_{\text{des}} t + x_*)\| \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0 \quad \forall i.$$

При прохождении полосы препятствий равномерность распределения по ширине коридора нарушается. Закон должен обеспечить безопасный обход и восстановление равномерного поперечного строя после выхода из этой полосы, сохраняя взаимный порядок роботов по ординате.

Для раннего начала обхода на видимых передних выступах препятствий строятся воображаемые горизонтальные «козырьки». Каждый робот  $i$  вычисляет поперечные расстояния  $d_{i,\delta}^+$  и  $d_{i,\delta}^-$  до ближайших объектов в положительном и отрицательном направлениях оси ординат соответственно; учитываются позиции других роботов  $j$  в зоне прямой видимости, для которых  $|x_j - x_i| \leq \delta$ , и латерально видимые точки препятствий и стен. Здесь  $\delta > 0$  — параметр алгоритма, а латеральная видимость означает незаслонённый вертикальный обзор в пределах  $R_{\text{sen}}$ ; при отсутствии объекта полагается  $d_{i,\delta}^\pm = R_{\text{sen}}$ . Если расположение видимых объектов требует бокового смещения для предотвращения столкновения, робот считается уклоняющимся; по правилам алгоритма определяется угол уклонения  $\alpha_i \in \{0, \pm \alpha_*\}$ . Закон навигации использует ограниченные функции  $F$  и  $G$ , удовлетворяющие сформулированным в главе условиям, и описывается следующими формулами:

$$v_i^x = v_{\text{des}} + \frac{1}{\#[\mathcal{N}_i]} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} F[x_j - x_i],$$

$$v_i^y = G[d_{i,\delta}^+] - G[d_{i,\delta}^-] + P \tan \alpha_i, \quad P > 0.$$

Здесь  $\mathcal{N}_i$  включает индекс  $i$  и индексы роботов в пределах радиуса  $R_{\text{sen}}$ , прямая видимость которых не перекрыта препятствиями;  $\#[\mathcal{N}_i]$  — число элементов этого множества, а  $P$  — параметр алгоритма.

Первая формула обеспечивает согласование абсцисс роботов и асимптотический выход на требуемую скорость  $v_{\text{des}}$  продвижения вдоль коридора, а вторая выравнивает поперечные зазоры и обеспечивает обход препятствий и стен без столкновений на основе сведений об их видимых фрагментах.

Относительно препятствий сформулирован ряд предположений, которые, в частности, выполняются для широкого класса невыпуклых многоугольных препятствий. Предполагается, что изначально роботы расположены вне пещер препятствий в достаточно узкой поперечной полосе, имеют попарно различные ординаты и не отделены друг от друга препятствиями. Доказана теорема, согласно которой при выполнении этих требований, геометрических предположений и условий выполнимости задачи параметры закона управления можно выбрать так, что справедливы следующие утверждения:

- (i) выполняется ограничение  $\|v_i(t)\| \leq \bar{v}$ ;
- (ii) роботы проходят сцену в смысле приведённого определения;
- (iii) продольный разброс  $\max_{i,j} |x_i(t) - x_j(t)|$  не возрастает;
- (iv) для почти всех (в смысле меры Лебега) моментов времени  $t \geq 0$  выполняется неравенство  $\dot{x}_i(t) > 0$  для каждого робота  $i$ .

Тем самым после прохождения полосы препятствий восстанавливаются равномерное поперечное распределение и требуемая скорость движения вдоль коридора. Работоспособность закона исследована при статических и динамических препятствиях, не прямых стенах, а также в ситуациях незапланированного пополнения и сокращения команды роботов. Теоретические результаты подтверждены компьютерным моделированием и экспериментами на физических беспилотных наземных транспортных средствах [9].

**Третья глава** посвящена распределённым нелинейным протоколам непрерывного времени для полностью однородной команды неизвестного размера  $N \geq 2$ . Агенты анонимны и не используют средства связи, не различают партнёров и опираются только на относительные состояния ближайших соседей в конечной зоне видимости. Движение каждого агента описывается моделью простого интегратора

$$\dot{x}_i = u_i, \quad |u_i| \leq \bar{u}.$$

Здесь  $x_i \in \mathbb{R}$  описывает состояние, а  $u_i \in \mathbb{R}$  — управление  $i$ -го агента. Множество информаторов агента формируется по правилу прямой видимости: агент учитывает партнёра на расстоянии меньше  $R_{\text{sen}}$ , если между ними не находится другой агент. Для анализа информационной связности используется неориентированный граф видимости, рёбра которого соответствуют таким парам.

Рассматриваются три задачи равномерного самораспределения:

- (1) размещение с заданным шагом  $w$ , при котором существуют  $x_*$  и нумерация агентов такие, что  $x_i(t) \rightarrow x_* + iw, i = 1, \dots, N$ ;
- (2) такое же размещение относительно заданной якорной точки  $x_*$ ;

(3) равномерное распределение на интервале  $[x_-, x_+]$ .

Для первой и второй задач предполагается  $w < R_{\text{sen}}$ , а для третьей — что требуемый шаг  $(x_+ - x_-)/(N + 1)$  меньше радиуса видимости. Протоколы строятся с использованием гладкой возрастающей функции  $\Xi(d)$ , удовлетворяющей условиям  $\Xi(0) = 0$  и  $\Xi(d) \in [0, \bar{u}]$ .

**Протокол 1**, предназначенный для формирования решётки с шагом  $w$ , имеет вид

$$u_i = \Xi[d_i^+] - \Xi[d_i^-], \quad d_i^\pm = \begin{cases} \min_{j \in \mathcal{J}_i^\pm} |x_j - x_i|, & \mathcal{J}_i^\pm \neq \emptyset, \\ w, & \mathcal{J}_i^\pm = \emptyset, \end{cases}$$

где  $\mathcal{J}_i^+$  и  $\mathcal{J}_i^-$  — множества видимых информаторов, состояния которых соответственно больше и меньше состояния  $x_i$  агента  $i$ . Управление увеличивает слишком малые зазоры и уменьшает слишком большие, не требуя знания размера команды или глобальных координат. Доказано, что если в начальный момент информационный граф связан, а состояния агентов попарно различны, то Протокол 1 сохраняет ближайших соседей, не допускает столкновений и обеспечивает сходимость к равномерной решётке. Результат сохраняется при выбытии агентов, если не нарушается локальная видимость вдоль цепи, и допускает присоединение новых агентов.

Протоколы 2 и 3 являются модифицированными вариантами Протокола 1. **Протокол 2** решает задачу равномерного размещения от якорной точки  $x_*$ : видимый якорь обрабатывается как фиктивный информатор, а при его отсутствии крайний агент продолжает движение в направлении расширения цепи. **Протокол 3** аналогичным образом использует концы интервала  $x_-$  и  $x_+$  как фиктивных агентов и обеспечивает равномерное разбиение интервала. Для настройки последнего протокола достаточно знать верхнюю оценку длины интервала и нижнюю оценку размера команды. Сходимость Протоколов 2 и 3 доказана без предположения о начальной информационной связности команды: даже если отдельные группы агентов первоначально не видят друг друга, связность возникает в процессе выполнения алгоритма, после чего команда сходится к целевому размещению.

Протоколы применены для решения задач построения виртуальной антенной решётки в трёхмерном пространстве, распределённого круиз-контроля колонны автономных роботов на узкой дороге, формирования поперечного барьера в коридоре и многоагентного сканирования коридора движущейся равномерной «стеной» роботов. Сходимость соответствующих алгоритмов обоснована теоретически и подтверждена компьютерным моделированием [2].

**Четвёртая глава** посвящена решению задачи самораспределения однородного роя по априори неизвестной области  $\mathcal{R} \subset \mathbb{R}^2$ , в том числе по области с препятствиями, с итоговой остановкой всех членов роя. Роботы имеют кинематику простого интегратора  $\dot{r}_i = u_i$ , не используют межроботную связь, не имеют доступа к системе позиционирования и карте области, не знают размера команды  $N$  и должны применять единое локальное правило управления. Каждый робот обнаруживает объекты, включая компаньонов, границу области и препятствия, в зоне мониторинга  $M_i$  — диске радиуса  $R_{\text{sen}}$  с центром в  $r_i$ . Требуется, чтобы после остановки роя каждая точка области  $\mathcal{R}$  попадала в зону мониторинга хотя бы одного робота.

Предложены два алгоритма, основанных на идее метода виртуальных сил. **Секторальный алгоритм (SA, от англ. Sectoral Algorithm)** делит зону мониторинга на  $s \geq 3$  равных по

величине угловых секторов. В каждом секторе выбирается ближайший сосед, а если сектор пуст, используется определённая алгоритмом граничная точка сектора. Для каждого из этих объектов определяется его относительная позиция  $\mathbf{n}_i^k$ , а затем вычисляется среднее расстояние от робота  $i$  до выбранных объектов

$$\mathcal{D}_i = \frac{1}{s} \sum_{k=0}^{s-1} \|\mathbf{n}_i^k\|.$$

Управление задаётся следующей формулой

$$u_i = C \sum_{k=0}^{s-1} \frac{\mathbf{n}_i^k}{\|\mathbf{n}_i^k\|} \frac{\|\mathbf{n}_i^k\| - \mathcal{D}_i}{\mathcal{D}_i},$$

где  $C > 0$  — настраиваемый параметр алгоритма.

### **Непрерывный секторальный алгоритм (CSA, от англ. *Continuous Sectoral Algorithm*)**

устраняет скачки управления, возникающие в секторальном алгоритме при выходе соседа из зоны мониторинга, переходе через границу сектора или смене ближайшего соседа. Для этого относительно граничных лучей секторов строятся отражения и непрерывно эволюционирующие «тени» соседей, а ближайший объект заменяется взвешенной комбинацией кандидатов с приоритетом более близких. Виртуальные силы затем вычисляются по тому же принципу, что и в секторальном алгоритме. Доказано, что при  $s \geq 3$  управление, вырабатываемое непрерывным секторальным алгоритмом, является липшиц-непрерывной функцией конфигурации роя.

Для оценки качества наряду со стандартными критериями — временем до остановки, процентом покрытия области, средней пройденной дистанцией, равномерностью межроботных расстояний и энергопотреблением — введена новая метрика равномерности покрытия области. Она определяется формулой

$$\text{Area\_uniform} = \sqrt{\frac{1}{S(\mathcal{R})} \int_{\mathcal{R}} [C(\mathbf{r}) - C_{\text{mean}}]^2 d\mathbf{r}},$$

где  $C(\mathbf{r}) = |\{j : \mathbf{r} \in M_j\}|$  — кратность покрытия точки  $\mathbf{r}$ ,  $C_{\text{mean}}$  — её среднее значение по области, а  $S(\mathcal{R})$  — площадь области. Метрика оценивает неравномерность кратности покрытия области, связанную с наличием слабо покрытых участков и участков с избыточной концентрацией роботов.

Проведён многокритериальный сравнительный анализ семи методов на единых сценах с препятствиями и узкими проходами. Сравнивались предложенные секторальный и непрерывный секторальный алгоритмы, распределённый алгоритм самораспространения (DSSA)<sup>1</sup>, алгоритм самоорганизующегося развёртывания узлов (SODA)<sup>2</sup>, умный алгоритм самоорганизующегося

<sup>1</sup>Heo, N. A distributed self spreading algorithm for mobile wireless sensor networks [Текст] / N. Heo, P. Varshney // 2003 IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. Т. 3. 2003. 1597—1602 vol.3. DOI: 10.1109/WCNC.2003.1200625.

<sup>2</sup>Ghahroudi, M. S. An efficient self-organizing node deployment algorithm for mobile sensor networks [Текст] / M. S. Ghahroudi, A. Shahrabi, T. Boutaleb // UBICOMM 2018, The 12th Int. Conf. on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies. IARIA. 2018.

развёртывания узлов (SSND)<sup>3</sup>, биоинспирированный алгоритм SWARM<sup>4</sup> и алгоритм виртуальных пружин (VFA-SF)<sup>5</sup>. По совокупности процента и равномерности покрытия предложенные алгоритмы не уступают известным методам, а в сложных сценах с препятствиями превосходят их. Непрерывный секторальный алгоритм в среднем обеспечивает несколько более высокий процент покрытия ценой большего времени и пройденной дистанции, тогда как секторальный алгоритм проще и быстрее сходится. Работоспособность обоих алгоритмов дополнительно продемонстрирована на сложной «зданиеобразной» сцене [3, 6].

**Пятая глава** посвящена задаче равномерного самораспределения полностью однородной анонимной команды из  $N \geq 2$  роботов в замкнутую цепь. Роботы не используют связь и не знают  $N$ ; каждый из них характеризуется циклическим выходом  $s_i(t)$  периода  $p > 0$ : например, углом или криволинейной абсциссой на замкнутой дороге. Значения  $s_i$  и  $s_i \pm p$  описывают один и тот же выход. Динамика выходов задаётся нелинейными уравнениями второго порядка общего вида с неопределённостями

$$\ddot{s}_i(t) = f_i[t, \dots, u_i(t), \xi_i(t)], \quad v_i := \dot{s}_i, \quad |v_i| \leq \bar{v}.$$

Робот измеряет собственную скорость  $v_i$  и определяет зазоры между своим выходом  $s_i$  и выходами видимых соседей.

Цель управления состоит в равномерном саморазмещении и движении с заданным временным профилем скорости  $v^0(\cdot)$ . Точнее, требуется, чтобы существовали число  $s_*$  и нумерация роботов, при которых выход  $s_i(t)$   $i$ -го робота был равен

$$i \frac{p}{N} + s_* + \int_0^t v^0(\tau) d\tau$$

с точностью до ошибки  $\delta_i(t)$ , причём

$$\delta_i(t) \rightarrow 0, \quad \dot{s}_i(t) - v^0(t) \rightarrow 0 \quad \text{при } t \rightarrow \infty \quad \forall i.$$

Дополнительно требуется отсутствие совпадений циклических выходов разных роботов на всём горизонте времени.

Каждый робот определяет зазоры  $\delta_i^-$  и  $\delta_i^+$  между своим выходом и выходами ближайших соседей в обратном и прямом направлениях соответственно, в зоне видимости  $\Delta_{\text{vis}} \in (0, p/2]$ . При этом  $\delta_i^- < 0$ ,  $\delta_i^+ > 0$ . Если сосед в соответствующем направлении отсутствует, полагается  $\delta_i^\pm = \pm \Delta_{\text{vis}}$ . Для достижимости равномерной конфигурации требуется  $\Delta_{\text{vis}} > p/N$ . Заданный профиль скорости должен лежать внутри допустимого диапазона

$$v^0(t) \in [-\bar{v} + \varepsilon_v, \bar{v} - \varepsilon_v]$$

<sup>3</sup>Ghahroudi, M. S. A Smart Self-Organizing Node Deployment Algorithm in Wireless Sensor Networks [Текст] / M. S. Ghahroudi, A. Shahrabi, T. Boutaleb // 2019 15th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS). 2019. С. 17–23. DOI: 10.23919/WONS.2019.8795451.

<sup>4</sup>Mathews, E. Biologically inspired swarm robotic network ensuring coverage and connectivity [Текст] / E. Mathews, T. Graf, K. Kulathunga // 2012 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics. 2012. С. 84–90. DOI: 10.1109/ICSMC.2012.6377681.

<sup>5</sup>An Optimized Node Deployment Solution Based on a Virtual Spring Force Algorithm for Wireless Sensor Network Applications [Текст] / X. Deng [и др.] // Sensors. 2019. Т. 19, № 8. DOI: 10.3390/s19081817. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/8/1817>.

и быть реализуемым для всех допустимых неопределённостей динамики робота.

Предложен следующий разрывный закон управления

$$u_i = u_i^{\langle -\text{sgn } \Sigma_i \rangle}, \quad \Sigma_i = v_i - [v^0 + k(\delta_i^+ + \delta_i^-)],$$

где  $k > 0$  — настраиваемый параметр алгоритма. Этот закон опирается на измерения только собственной скорости робота и локальных позиционных данных, не требуя измерения относительных скоростей соседей. Решения разрывной замкнутой системы понимаются в смысле Филиппова.

Основная теорема утверждает, что при выполнении сформулированных в главе предположений об уравнениях динамики роботов и при условии, что  $\Delta_{\text{vis}} > p/N$ , коэффициент  $k$  выбран достаточно малым, начальные циклические выходы попарно различны, а начальные скорости лежат внутри указанных в главе допустимых интервалов, справедливы следующие утверждения:

- (i) траектории определены для всех  $t \geq 0$ ;
- (ii) достигаются равномерное саморазмещение и заданный профиль скорости, причём сходимость происходит с экспоненциальной скоростью;
- (iii) соблюдается ограничение на скорость роботов  $|v_i(t)| < \bar{v}$ ;
- (iv) циклические выходы разных роботов не совпадают, то есть столкновения исключаются.

Начальная информационная связность команды не требуется: протокол сходится и тогда, когда рой первоначально разделён на несколько кластеров, «не видящих» друг друга, а связность возникает в процессе перехода к равномерному размещению. Результат сохраняется в ситуации незапланированного выбытия роботов, если условие  $\Delta_{\text{vis}} > p/N$  остаётся выполненным для оставшейся команды, где  $N$  — её численность; допускается и добавление нового робота при выполнении ограничений на его начальные положение и скорость.

В качестве приложений рассмотрены заметающее покрытие одномерного барьера группой автономных мобильных роботов, движущихся по замкнутой дороге, извивающейся в трёхмерном пространстве, и равномерное распределение роботов по угловым секторам при обходе удалённого объекта. Компьютерное моделирование с шумами измерений, ветровыми возмущениями и неопределённостями параметров роботов подтверждает теоретические результаты и робастность предложенного закона [4, 5, 10].

## Заключение

Работа посвящена распределённому управлению саморазвёртыванием однородных роев мобильных роботов для покрытия протяжённых объектов при отсутствии доступа к системам позиционирования и межроботной связи, неизвестном размере команды. Все роботы должны управляться на основе единого локального правила, индивидуально реализуемого каждым из них. Основной научный вклад — разработка и строгое обоснование алгоритмов с гарантированной нелокальной (глобальной) сходимостью. Основные результаты заключаются в следующем:

1. Разработан и строго обоснован распределённый реактивный закон управления роем неголономных роботов типа машины Дубинса для плотного заметающего покрытия неизвестного коридора при отсутствии связи, нумерации и знания размера команды (глава 1).
2. Для роя мобильных роботов с кинематикой интегратора разработан и строго обоснован закон навигации, обеспечивающий прохождение коридора с неизвестными препятствиями и искривлёнными стенами без столкновений и с восстановлением равномерного поперечного распределения (глава 2).
3. Разработаны и строго обоснованы нелинейные протоколы равномерного самораспределения полностью однородной анонимной команды (решётка с заданным шагом и распределение на неизвестном интервале) с установлением информационной связности; приложения включают круиз-контроль колонны, покрытие коридоров и построение виртуальной антенной решётки в 3D (глава 3).
4. Разработаны алгоритмы SA и CSA самораспределения по неизвестным сложным областям в условиях отсутствия доступа к системам позиционирования; выполнен сравнительный анализ семи методов виртуальных сил по комплексу метрик, включая предложенный критерий равномерности покрытия области (глава 4).
5. Разработан и строго обоснован распределённый протокол формирования равномерной замкнутой цепи по циклической выходной переменной для роботов с динамикой второго порядка и неопределённостями, обеспечивающий заданный профиль скорости без требования начальной информационной связности (глава 5).

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: ослабление геометрических предположений о препятствиях и стенах в задаче навигации в коридороподобных сценах; переход к моделям более высокого порядка и трёхмерным средам; сценарии с несколькими последовательными барьерами; экспериментальная верификация протоколов глав 3 и 5 на физических роботах.

**Рекомендации.** Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании нижнеуровневых законов управления однородными роями для заметающего и статического покрытия в условиях отсутствия доступа к системам позиционирования и межроботной связи, а также при подготовке прикладных миссий мониторинга, инспекции и поисково-спасательных операций. При реализации целесообразно учитывать ограничения на зону видимости, скорость и управляющие усилия, принятые в теоретических предположениях соответствующих глав, и при необходимости проводить калибровку параметров на целевой платформе.

## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Distributed reactive motion control for dense cooperative sweep coverage of corridor environments by swarms of non-holonomic robots [Text] / A. S. Matveev, P. A. Kononov // International Journal of Control. — 2023. — Vol. 96, no. 3. — P. 554—567. — DOI: 10.1080/00207179.2021.2005258. — (Scopus, WoS).

2. Distributed nonlinear algorithms for building chain formations by fully homogeneous multi-agent teams, with establishing informational connectivity [Text] / P. A. Konovalov, A. S. Matveev // Systems and Control Letters. — 2025. — Vol. 204. — P. 106143. — DOI: 10.1016/j.sysconle.2025.106143. — (Scopus, WoS).
3. Distributed algorithms for self-spreading of robotic networks over unknown complex areas in GPS-denied environments [Text] / P. A. Konovalov, A. S. Matveev // Cybernetics and Physics. — 2025. — Vol. 14, no. 1. — P. 52—61. — DOI: 10.35470/2226-4116-2024-14-1-52-61. — (BAK, Scopus).
4. Distributed self-organisation of a homogeneous swarm of robots into a uniform closed-chain, with creating informational connectivity [Text] / P. A. Konovalov, A. S. Matveev // International Journal of Control. — 2026. — Vol. 99, no. 6. — P. 1877—1897. — (Scopus, WoS).
5. Robust distributed algorithm for building closed-chain formations by homogeneous multi-agent teams [Text] / P. A. Konovalov, A. S. Matveev // Proceedings of SPIE. Vol. 13404. — 10/2024. — P. 1340411. — (Fourth International Conference on Computer Communication and Network Security (CCRIS 2024)).
6. Efficient algorithms for distributed virtual force-based self-spreading of robotic networks in GPS-denied environments [Text] / P. A. Konovalov, A. S. Matveev // 2024 7th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE). — 2024. — P. 127—132.
7. Decentralized reactive navigation for densest sweep coverage of corridor environments by swarms of non-holonomic robots [Text] / A. S. Matveev, P. A. Konovalov // 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). — 2021. — P. 1108—1113. — DOI: 10.1109/MED51440.2021.9480298.
8. Decentralized reactive control of robotic teams for cooperative sweep coverage of corridor-like environments [Text] / A. S. Matveev, P. A. Konovalov // 2021 European Control Conference (ECC). — 2021. — P. 1144—1149. — DOI: 10.23919/ECC54610.2021.9655153.
9. Reactive Autonomous Ad Hoc Self-Organization of Homogeneous Teams of Unmanned Surface Vehicles for Sweep Coverage of a Passageway with an Obstacle Course [Text] / P. A. Konovalov, A. S. Matveev, K. A. Gordievich // Drones. — 2025. — Vol. 9, no. 3. — P. 161. — DOI: 10.3390/drones9030161. — (Scopus, WoS).
10. Self-organization of a swarm of mobile robots into a uniform closed chain by resource-saving nonlinear control laws [Text] / P. A. Konovalov // ANS Conference Series: Russian Conference on Dynamics (RCD). Book of Abstracts. — Izhevsk, 2023. — P. 48—49.
11. Building regular formations of mobile robots [Text] / A. S. Matveev, P. A. Konovalov, A. A. Kapitonov, A. I. Shepeljavyi // 2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). — Jeju, Republic of Korea, 2022. — P. 123—128.

12. Координация группы мобильных роботов при прохождении полосы препятствий в коридоро-подобной сцене [Текст] / К. А. Гордиевич, П. А. Коновалов // Навигация и управление движением: материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием / науч. ред. О. А. Степанов ; под общ. ред. В. Г. Пешехонова. — Санкт-Петербург : ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. — С. 17—19.