Проблемы искусственного интеллекта. 2026. N 3 (42). С. 255-267
Problems of Artificial Intelligence. 2026;3(42):255-267.
Роботы, мехатроника и робототехнические системы
Научная статья

УДК 004.056.53:004.932 **DOI** 10.24412/2413-7383-2026-3-42-255-267

А. А. Приходский[1], Д. К. Лебедев[2], С. А. Сериков[3]
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), 190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.
[1]prihodskiy@gmail.com; ORCID: 0009-0009-5625-6623.
[2]asspirat2008@gmail.com; ORCID: 0009-0004-6906-718X
[3]srkv@inbox.ru ORCID: 0000-0002-3668-2459.

АДАПТИВНОЕ НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФОРМАЦИЕЙ ГЕТЕРОГЕННЫХ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОЙ НАБЛЮДАЕМОСТИ

A. A. Prihodskiy[1], D. K. Lebedev[2], S. A. Serikov[3]
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), 67 Bolshaya Morskaya St., Bldg. A, St. Petersburg, 190000, Russia
[1]prihodskiy@gmail.com; ORCID: 0009-0009-5625-6623.
[2]asspirat2008@gmail.com; ORCID: 0009-0004-6906-718X
[3]srkv@inbox.ru ORCID: 0000-0002-3668-2459.

ADAPTIVE FUZZY FORMATION CONTROL FOR HETEROGENEOUS MULTI-ROBOT SYSTEMS UNDER PARTIAL OBSERVABILITY

В работе рассматривается задача согласованного управления формацией гетерогенной группы мобильных роботов в условиях частичной наблюдаемости и стохастических потерь связи. Предложен адаптивный нечёткий алгоритм управления, объединяющий гибридный наблюдатель состояния с динамической метрикой уверенности и регулятор на основе логики Такаги–Сугено с подстройкой параметров в реальном времени. Для компенсации неопределённостей динамики платформ и ограничений коммуникационного канала разработана процедура взвешивания измерений по степени их достоверности, а устойчивость замкнутой мультиагентной системы доказана методом функций Ляпунова. Результаты численного моделирования подтверждают робастность синтезированного алгоритма: группа сохраняет заданную геометрическую конфигурацию при потере до 40 % пакетов данных, высоком уровне сенсорного шума и существенном различии динамических характеристик агентов. Разработанный подход обеспечивает интерпретируемость правил управления и теоретические гарантии безопасности, что делает его перспективным для внедрения в реальные робототехнические комплексы поисково-спасательного и мониторингового назначения.
Ключевые слова: групповая робототехника; мультиагентные системы; нечёткое управление; управление формацией; гетерогенные роботы; частичная наблюдаемость; наблюдатель состояния; метрики уверенности; адаптивное управление.

This paper addresses the problem of coordinated formation control for a heterogeneous group of mobile robots under conditions of partial observability and stochastic communication losses. An adaptive fuzzy control algorithm is proposed, which integrates a hybrid state observer with a dynamic confidence metric and a Takagi–Sugeno fuzzy regulator featuring real-time parameter adaptation. To compensate for platform dynamic uncertainties and communication channel constraints, a measurement weighting procedure based on data credibility is developed. The stability of the closed-loop multi-agent system is rigorously proven using the Lyapunov direct method. Numerical simulation results confirm the robustness of the synthesized algorithm: the group maintains the desired geometric configuration despite up to 40% packet loss, high sensor noise, and significant differences in the dynamic characteristics of the agents. The proposed approach ensures the interpretability of control rules and provides theoretical safety guarantees, making it highly promising for deployment in real-world robotic systems for search-and-rescue and monitoring missions.
Key words: multi-robot systems; multi-agent systems; fuzzy control; formation control; heterogeneous robots; partial observability; state observer; confidence metrics; adaptive control.

Введение

Современные задачи коллективной робототехники, такие как поисково-спасательные операции, мониторинг крупных территорий и логистика на складах, требуют от групп роботов высокой степени автономности, гибкости и устойчивости к внешним возмущениям [1]. Перспективным направлением является использование многозадачных складских роботов с иерархической архитектурой совместной оптимизации [2], а также специализированных платформ с нестандартной динамикой, например прыгающих колесных роботов [3]. Фундаментальные основы распределенной координации мультиагентных сетей изложены в работах [4], где показана определяющая роль топологии графа в задачах консенсуса. Сравнительный анализ алгоритмов координации в децентрализованных многоагентных системах с динамической топологией связи проведен в работе [5], а вопросы применения роев роботов в сценариях ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций подробно рассмотрены в [6].

Ключевой проблемой при реализации таких систем является обеспечение согласованного поведения гетерогенных агентов в условиях неопределенности среды, неполноты информации и ограничений коммуникационных каналов. Традиционные методы, основанные на жестких математических моделях, часто теряют робастность при существенных нелинейностях [7] и динамически меняющейся топологии взаимодействия. В то время как методы обучения с подкреплением демонстрируют высокую производительность в задачах безопасного управления формацией [8], их «закрытость» затрудняет верификацию безопасности. Интеграция нечеткой логики в контур управления позволяет сохранить интерпретируемость правил и обеспечить строгие теоретические гарантии устойчивости через аппарат функций Ляпунова [9], что критически важно для внедрения алгоритмов в реальные робототехнические комплексы.

Постановка задач

Цель исследования – разработка адаптивного нечёткого алгоритма управления формацией гетерогенной группы мобильных роботов, обеспечивающего устойчивое согласованное движение в условиях частичной наблюдаемости, стохастических потерь связи и параметрической неопределённости динамических моделей. Для её достижения решаются следующие задачи:

- формализация моделей гетерогенных систем и графа наблюдаемости с учётом задержек и различий кинематики;
- синтез базового нечёткого регулятора формации;
- разработка наблюдателя состояния с динамической метрикой уверенности для компенсации потерь данных и шумов;
- создание механизма адаптации параметров и доказательство устойчивости замкнутой системы методом Ляпунова (условие равномерной окончательной ограниченности, UUB).

Математическая модель динамики агентов и формализация информационной структуры

Динамическая модель i-го агента записывается в виде:

$$\dot{x}_i(t) = f_i(x_i(t), u_i(t), t) + \xi_i(t),$$

где $x_i(t)$ – вектор состояния, $u_i(t)$ – вектор управления, $fi(\cdot)$ – нелинейная функция, отражающую специфику кинематики и динамики *i*-й платформы, $\xi_i(t)$ – внешние возмущения и модельных погрешностей.

Взаимодействие роботов и структура обмена информацией описываются ориентированным графом с переменной топологией, элементы которого задаются матрицей смежности [10]. Связность графа учитывает физические ограничения дальности сенсоров, возможные потери пакетов данных и изменения конфигурации группы в процессе движения. Матрица смежности *A(t)* определяется элементами, принимающими значение единицы при наличии информационного канала от *j*-го робота к *i*-му и ноль в противном случае. На основе матрицы смежности формируется матрица Лапласа, используемая для анализа синхронизации и устойчивости формационного режима:

$$L(t) = D(t) - A(t),$$

где *D(t)* – диагональная матрица полустепеней исхода, элементы которой вычисляются как сумма элементов соответствующей строки матрицы смежности.

Частичная наблюдаемость моделируется через ограничение доступных измерений и введение весовых коэффициентов достоверности информации [11]. Каждый робот получает доступ только к локальным измерениям относительных положений соседей, которые подвержены шумам, задержкам и периодическим потерям. Измерение состояния j-го робота с точки зрения i-го агента описывается уравнением:

$$y_{ij}(t) = C_{ij} x_j(t) + \eta_{ij}(t),$$

где C_{ij} – матрица наблюдения, а $\eta_{ij}(t)$ – аддитивный шум [12].

Для учёта достоверности данных вводится скалярный коэффициент уверенности $\alpha_{ij}(t)$, принимающий значения от нуля до единицы, который вычисляется на основе отношения сигнал-шум, времени задержки и истории расхождений оценок.

Фактическая ошибка формации заменяется на взвешенную оценку, учитывающую частичную наблюдаемость и структуру коммуникационной сети:

$$\tilde{e}_{ij}(t) = \alpha_{ij}(t) a_{ij}(t) \left(x_i(t) - x_j(t) - \rho_{ij} \right),$$

где ρ_{ij} – заданный вектор взаимного смещения в целевой формации.

Совокупная ошибка формации i-го робота формируется как взвешенная сумма относительных отклонений по всем активным каналам связи и записывается в виде:

$$E_i(t) = \sum_{j=1}^{N} \alpha_{ij}(t) a_{ij}(t) \left(x_i(t) - x_j(t) - \rho_{ij} \right)$$

Динамика агрегированной ошибки определяется уравнением, связывающим нелинейности моделей роботов, вариации топологии графа и изменения весовых коэффициентов:

$$\dot{E}_i(t) = g_i(x(t), u(t), A(t), \alpha(t), t) + \zeta_i(t),$$

где $g_i(\cdot)$ – агрегирующая функция, $\zeta_i(t)$ – обобщённый шум.

Синтез нечеткого регулятора поддержания формации

Структура контроллера базируется на архитектуре Мамдани или Такаги-Сугено [13], [14], где входными сигналами являются ошибка формации и скорость ее изменения, а выходным сигналом – управляющее воздействие, корректирующее траекторию движения робота.

Для каждой компоненты вектора ошибки (например, по координатам *x* и y, или в полярной системе координат) определяются две основные лингвистические переменные: текущее отклонение от заданного положения *e* и скорость изменения этого отклонения $\dot{e}$.

Результирующее управление формируется как суперпозиция вкладов всех активных правил, что обеспечивает гладкость управляющего сигнала и отсутствие разрывов, характерных для релейных регуляторов [15].

Математическое описание входа нечеткого контроллера (ошибка формации) для i-го агента $e_i(t) = E_i(t)$.

Производная ошибки, используемая как второй входной параметр для учета динамики процесса:

$$\dot{e}_i(t) = \frac{d}{dt} E_i(t)$$

Для многомерного случая, когда управление включает линейную скорость v_i и угловую скорость ω_i, синтезируются два независимых нечетких контроллера или один многомерный контроллер с векторным выходом. В случае декомпозиции, управление линейной скоростью $v_i(t)$ вычисляется на основе продольной ошибки, а угловой скорости $\omega_i(t)$ – на основе поперечной ошибки и ошибки ориентации.

Управление линейной скоростью *i*-го робота:

$$v_i(t) = F_v\left(e_{long}, \dot{e}_{long}\right),$$

Управление угловой скоростью *i*-го робота:

$$\omega_i(t) = F_\omega\left(e_{lat}, \dot{e}_{lat}, e_\theta\right),$$

где F_v и F_ω обозначают функции нечеткого вывода для соответствующих каналов управления, e_{long} и e_{lat} – продольная и поперечная компоненты ошибки формации, e_θ – ошибка ориентации.

Полученные сигналы $v_i(t)$ и $\omega_i(t)$ подаются на контроллеры приводов робота, которые обеспечивают отслеживание заданных скоростей с учетом динамики двигателей и ограничений по насыщению.

Алгоритм оценки состояния с динамическим взвешиванием измерений

Для компенсации потерь данных и шумов синтезируется гибридный наблюдатель состояния. Наблюдатель базируется на расширенном фильтре Калмана, в котором нечеткая логика динамически вычисляет метрику уверенности $\alpha_{ij}(t)$ [16]. Подобные наблюдатели с адаптивной нечеткой компенсацией неопределенностей применяются в задачах трекинга нелинейных систем с ограничениями на состояние [17], а также в распределенных схемах управления неаффинными мультиагентными системами [18].

При $\alpha_{ij}(t) \to 0$ вклад соответствующего соседа в ошибку формации обнуляется, что предотвращает *destabilizing* влияние недостоверных данных на управление. Вместо этого робот опирается на внутреннюю модель прогноза состояния соседа, генерируемую наблюдателем.

Математическая модель процесса в наблюдателе для *j*-го агента (с точки зрения *i*-го наблюдателя) описывается уравнением состояния с учетом шума процесса:

$$\hat{x}_j(k+1|k) = f_j(\hat{x}_j(k|k), u_j(k)),$$

где $\hat{x}_j(k+1|k)$ априорная оценка состояния на шаге k+1, сделанная на основе информации до шага *k*, f_j – дискретизированная модель динамики j-го робота.

Уравнение обновления ковариационной матрицы ошибки оценки (априорная ковариация):

$$P_j(k+1|k) = F_j(k)P_j(k|k)F_j^T(k) + Q_j(k),$$

где $F_j(k)$ – матрица Якоби функции f_j по состоянию, $P_j(k|k)$ – апостериорная ковариация на предыдущем шаге, $Q_j(k)$ – ковариационная матрица шума процесса, которая может адаптироваться нечетким регулятором.

Вычисление инновации (невязки измерения), которая служит входом для оценки качества данных:

$$\nu_{ij}(k) = y_{ij}(k) - C_{ij}\hat{x}_j(k+1|k),$$

где: $y_{ij}(k)$ – реальное измерение, полученное по каналу связи, $C_{ij}\hat{x}_j(k+1|k)$ – предсказанное измерение.

Нормированная квадратичная форма инновации, используемая как один из входов нечеткой системы оценки уверенности:

$$\gamma_{ij}(k) = \nu_{ij}^T(k)S_j^{-1}(k)\nu_{ij}(k),$$

где: $S_j(k) = C_{ij}P_j(k+1|k)C_{ij}^T + R_{ij}(k)$ ковариационная матрица инновации, $R_{ij}(k)$ – ковариационная матрица шума измерения.

Выход нечеткой системы оценки уверенности, определяющий вес доверия к измерению:

$$\alpha_{ij}(k) = FuzzyInference\left(SNR_{ij}, \tau_{ij}, \gamma_{ij}(k)\right),$$

где: SNR_{ij} – оценка отношения сигнал/шум канала, τ_{ij} – время задержки пакета, γ_{ij} – статистическая согласованность измерения. Функция *FuzzyInference* реализует базу правил, например: «ЕСЛИ *SNR* высокое И задержка малая И инновация нормальная, ТО уверенность высокая».

Корректировка апостериорной оценки состояния с учетом вычисленного веса уверенности (модифицированное обновление Калмана):

$$\hat{x}_j(k+1|k+1) = \hat{x}_j(k+1|k) + \alpha_{ij}(k)K_j(k)\nu_{ij}(k),$$

где $K_j(k)$ – коэффициент усиления Калмана, вычисляемый стандартным образом. Множитель $\alpha_{ij}(k)$ эффективно «отключает» коррекцию состояния при низкой уверенности, сохраняя прогноз модели.

Обновление апостериорной ковариационной матрицы ошибки оценки:

$$P_j(k+1|k+1) = (I - \alpha_{ij}(k)K_j(k)C_{ij})P_j(k+1|k),$$

где I – единичная матрица соответствующей размерности.

Данная формула показывает, что при $\alpha_{ij} \to 0$ ковариация не уменьшается, что отражает рост неопределенности знания о состоянии соседа при отсутствии достоверных измерений.

Итоговая взвешенная ошибка формации, поступающая на вход нечеткого контроллера, теперь использует восстановленные состояния и метрики уверенности:

$$E_i^{obs}(t) = \sum_{j=1}^{N} a_{ij}(t)\alpha_{ij}(t)\left(\hat{x}_i(t) - \hat{x}_j(t) - \rho_{ij}\right).$$

Внедрение данного модуля позволяет системе сохранять работоспособность при значительном уровне потерь данных (до 30-40%) и высоком уровне сенсорного шума, так как контроллер получает сглаженные, физически обоснованные оценки состояний, взвешенные по степени их достоверности.

Механизм адаптации параметров и анализ устойчивости замкнутой системы

Адаптация параметров осуществляется на основе градиентного спуска по функции ошибки или с использованием законов адаптации, полученных из теории устойчивости Ляпунова [19]. В рамках подхода Такаги-Сугено выход контроллера представляется как линейная комбинация базисных функций, взвешенных активируемыми правилами. Параметры этой линейной комбинации (веса) подлежат адаптации [20].

Устойчивость замкнутой системы с переменной топологией доказывается с использованием коммутационных функций Ляпунова и сводится к решению системы линейных матричных неравенств (LMI) [21].

Функция Ляпунова для i-го агента, включающая ошибку формации и ошибку параметров адаптации:

$$V_i(t) = \frac{1}{2} E_i^T(t) P_i E_i(t) + \frac{1}{2} tr\left(\tilde{\Theta}_i^T(t) \Gamma_i^{-1} \tilde{\Theta}_i(t)\right),$$

где: $E_i^T(t)$ – вектор ошибки формации, P_i – положительно определенная симметричная матрица, $\tilde{\Theta}_i$ – ошибка оценки параметров (разница между идеальными Θ_i^* и текущими $\hat{\Theta}_i(t)$ весами нечеткой системы), Γ_i – положительно определенная матрица скорости адаптации, $tr(\cdot)$ – оператор взятия следа матрицы.

Производная функции Ляпунова по времени, используемая для синтеза закона адаптации:

$$\dot{V}_i(t) = E_i^T(t) P_i \dot{E}_i(t) - tr\left(\tilde{\Theta}_i^T(t) \Gamma_i^{-1} \dot{\hat{\Theta}}_i(t)\right).$$

Закон адаптации весов нечеткой системы, обеспечивающий компенсацию невязок модели и возмущений:

$$\dot{\hat{\Theta}}_i(t) = \Gamma_i \Phi_i(E_i(t)) E_i^T(t) P_i B_i,$$

где: $\Phi_i(E_i(t))$ – вектор регрессоров (базисных функций нечеткой системы), зависящий от ошибки, B_i – матрица входа системы управления. Этот закон минимизирует вторую часть производной $\dot{V}$, делая её отрицательной.

Проекционный оператор для ограничения параметров в допустимом диапазоне Ω_θ:

$$\dot{\hat{\Theta}}_i(t) = Proj\left(\hat{\Theta}_i(t), \Gamma_i \Phi_i(E_i(t)) E_i^T(t) P_i B_i\right).$$

Функция $Proj(\cdot)$ гарантирует, что оценки параметров $\hat{\Theta}_i(t)$ остаются внутри выпуклого множества Ω_θ, предотвращая неограниченный рост весов и сохраняя физическую реализуемость управления.

Условие устойчивости в виде линейного матричного неравенства (LMI) для нахождения матрицы P_i:

$$A_i^T P_i + P_i A_i + P_i B_i R_i^{-1} B_i^T P_i + Q_i < 0,$$

где: A_i и B_i – матрицы линеаризованной модели системы в окрестности рабочей точки, Q_i и R_i – весовые матрицы квадратичного критерия качества.

Решение этого неравенства гарантирует асимптотическую устойчивость линейной части системы. Итоговое условие равномерной окончательной ограниченности (*UUB*) ошибки формации:

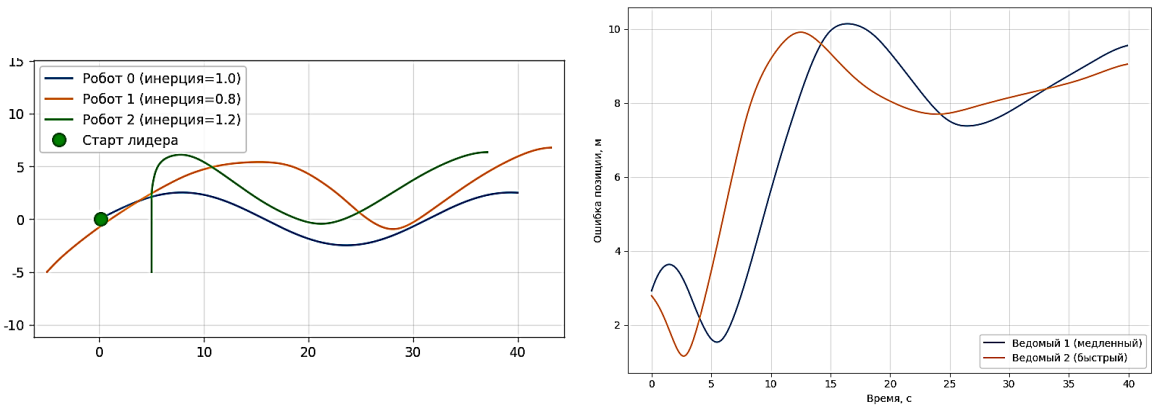
$$\| E_i(t) \| \leq \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(P_i)\tau^2 + \lambda_{\max}(\Gamma_i^{-1}) \| \tilde{\Theta}_i(0) \|^2}{\lambda_{\min}(P_i)}} e^{-\kappa t} + \delta,$$

где: $\lambda_{\min}$ и $\lambda_{\max}$ – минимальное и максимальное собственные числа матриц, τ – граница аппроксимации нечеткой системой, κ – коэффициент скорости сходимости, δ – радиус конечного множества, к которому сходится ошибка.

Результаты численного моделирования и анализ показателей качества

Разработанный адаптивный модуль совместно с доказательством устойчивости обеспечивает теоретическую базу для надежной работы группы роботов в сложных условиях. Система способна автоматически подстраиваться под изменения среды и состояния самих роботов, сохраняя гарантированные показатели качества управления. Это завершает этап теоретического синтеза и подготавливает систему к этапу численного моделирования и статистической валидации.

Результаты моделирования движения гетерогенной группы из трех роботов представлены в соответствии с рисунком 1. На рисунке1 (а) показаны траектории движения: ведомые роботы успешно отслеживают волнообразную траекторию лидера, сохраняя заданные геометрические смещения, несмотря на различия в инерционных характеристиках платформ. На рисунке 1 (б) проиллюстрирована ошибка удержания формации. Кратковременные пики отклонений коррелируют с эпизодами стохастической потери пакетов данных. Быстрое затухание ошибки после восстановления канала связи подтверждает робастность синтезированного алгоритма к сбоям коммуникации.

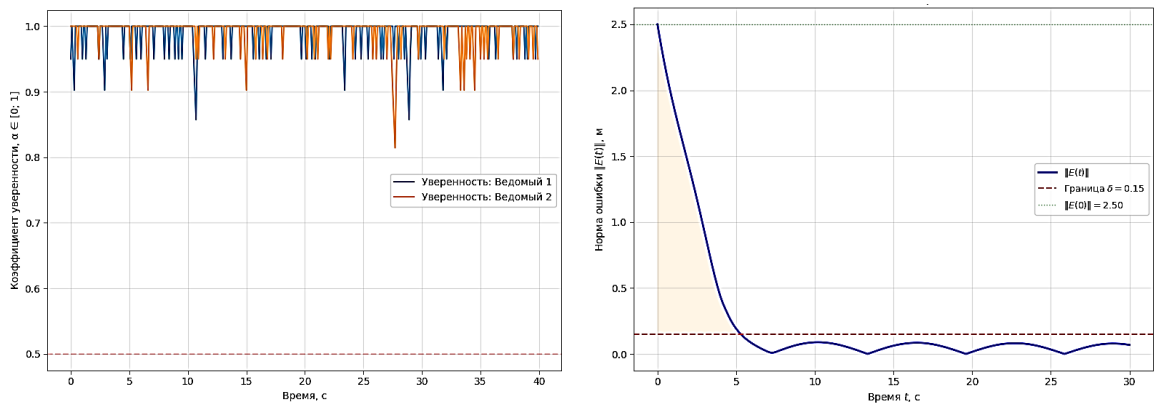


а) б)

Рисунок 1 – а) Траектории движения гетерогенной группы
б) Ошибка удержания формации во времени

Анализ работы гибридного наблюдателя и сходимость замкнутой системы отражены в соответствии с рисунком 2. Динамика метрики уверенности $\alpha_{ij}(t)$ (рис. 2 (а) демонстрирует, что при потере данных или росте шума коэффициент достоверности

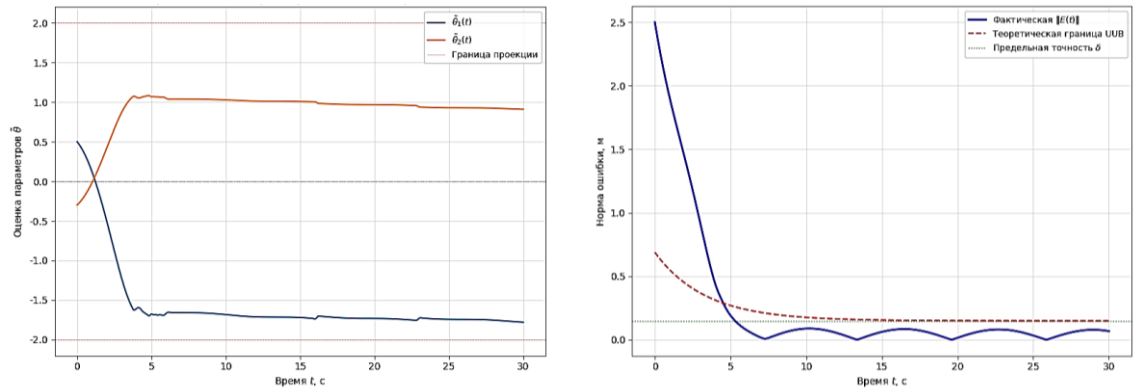
стремится к нулю. Это инициирует переключение наблюдателя на прогнозную модель, исключая дестабилизирующее влияние недостоверных измерений. Данный механизм напрямую обеспечивает требуемую динамику евклидовой нормы вектора ошибки формации ‖E(t)‖ (рис. 2 (б). Несмотря на действие внешних возмущений, ошибка экспоненциально затухает и асимптотически локализуется в малой δ-окрестности нуля, что подтверждает выполнение условия равномерной окончательной ограниченности (UUB).



а) б)

Рис. 2 – а) Уровень доверия к данным наблюдателя
б) Сходимость нормы ошибки формации к δ-окрестности

На рисунке 3 проиллюстрированы показатели качества работы адаптивного механизма. Эволюция оценок параметров нечеткой системы $\theta\sim(t)$ (рис. 3 (а) демонстрирует корректность работы проекционного оператора: веса ограничены допустимым множеством Ω_θ, что предотвращает неограниченный дрейф параметров и гарантирует физическую реализуемость управления. Сопоставление фактической нормы ошибки ‖E(t)‖ с аналитической верхней границей, полученной из условий LMI (рис. 3 (б), подтверждает строгость теоретических выкладок. Экспериментальная кривая на всем интервале моделирования располагается ниже расчетной оценки, а сходимость обеих величин к общему предельному значению δ доказывает адекватность полученного теоретического запаса устойчивости.



а) б)

Рисунок 3 – а) Ограниченность параметров адаптации (проекция)
б) Сравнение с теоретической оценкой сходимости

Заключение

В работе синтезирован адаптивный нечеткий алгоритм управления формацией гетерогенной группы роботов в условиях частичной наблюдаемости и переменной топологии связи. Ключевым результатом стало создание гибридной архитектуры, объединяющей нечеткий наблюдатель состояния для компенсации потерь данных с адаптивным регулятором Такаги–Сугено. Теоретически доказано, что алгоритм обеспечивает равномерную окончательную ограниченность (UUB) ошибки формации и всех сигналов замкнутой системы. Внедрение метрик уверенности позволило динамически исключать недостоверные измерения из контура управления, что существенно повысило робастность группы к сбоям связи.

Дальнейшие исследования будут сосредоточены на:

– экспериментальной валидации алгоритмов на реальных гибридных группах роботов с учетом аппаратных нелинейностей и стохастических характеристик каналов связи;
– интеграции нечеткой архитектуры с методами обучения с подкреплением для автоматической генерации базы правил в неизвестных средах;
– масштабировании метода на большие рои и повышении киберустойчивости контура управления к целенаправленным информационным атакам.

Список источников

1. Каляев, И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. Москва : ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2009. 280 с. ISBN 978-5-9221-1141-6. EDN MUWSIT.
2. Гун Ш. Модель принятия решений для многозадачных складских роботов на основе четырехуровневой архитектуры совместной оптимизации / Ш. Гун // Проблемы искусственного интеллекта. 2025. № 3 (38). С. 100–112. DOI: 10.24412/2413-7383-2025-3-38-100-112.
3. Зуев В. М. Динамика прыгающего колесного робота / В.М. Зуев, Д. А. Первенко // Проблемы искусственного интеллекта. 2026. № 1 (40). С. 241–253. DOI: 10.24412/2413-7383-2026-1-40-241-253
4. Ren W. Distributed coordination of multi-agent networks: emergent problems, models, and issues / W. Ren, Y. Cao. London : Springer, 2011. 288 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-039-7.
5. Приходский, А. А. Сравнительный анализ алгоритмов координации в децентрализованных многоагентных системах с динамической топологией связи / А. А. Приходский, У. В. Белкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2026. № 4(311). С. 37-41. DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-37-41. EDN HHPGRC.
6. Белкин, У. В. Разработка и оценка алгоритмов децентрализованного управления роями роботов в сценариях ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций / У. В. Белкин, А. А. Приходский, С. А. Сериков // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2025. № 4(299). С. 12-15. DOI 10.35211/1990-5297-2025-4-299-12-15. EDN BUPLZN.
7. Cooperative Output Regulation of Heterogeneous Multiagent Systems: A Global Distributed Control Synthesis Approach / A. T. Koru, S. B. Sarsılmaz, T. Yucelen and E. N. Johnson // in IEEE Transactions on Automatic Control. Vol. 66, № 9. Pp. 4289-4296. Sept. 2021. Doi: 10.1109/TAC.2020.3032496.
8. Fuzzy weight-based secure formation control for two-order heterogeneous multi-agent systems via reinforcement learning / Z. Gao, N. Xu, G. Zong, B. Niu and X. Zhao // Information Sciences. Vol. 698. 2025. Doi: 10.1016/j.ins.2024.121782.
9. Zhang H. Adaptive Fuzzy Prescribed-Time Formation Control for Nonlinear Multi-Agent Systems / H. Zhang, C. Chen and Z. Xiang // in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. Vol. 22. Pp. 10986-10996. 2025. Doi: 10.1109/TASE.2025.3531846.
10. Qin, Z. Distributed Control of A Class of Nonlinear Multi-Agent Systems with Switching Topologies / Z. Qin, T. Liu and Z. -P. Jiang // 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Changsha, China, 2018. Pp. 620-625. Doi: 10.1109/WCICA.2018.8630412.
11. Li Y. Adaptive Fuzzy Control for Heterogeneous Vehicular Platoon Systems With Collision Avoidance and Connectivity Preservation / Y. Li, Y.,Zhao and S. Tong // in IEEE Transactions on Fuzzy Systems. Vol. 31, № 11. Pp. 3934-3943. Nov. 2023. Doi: 10.1109/TFUZZ.2023.3271904

12. Chen J. Distributed Control of Robotic Swarms from Reactive High-Level Specifications / J. Chen, R. Sun and H. Kress-Gazit // IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Lyon, France, 2021. Pp. 1247-1254. Doi: 10.1109/CASE49439.2021.9551578.
13. Adaptive Fuzzy Secure Consensus Control of Nonlinear Multi-Agent Systems Under Deception Attacks / Y. Bi, P. Ding, F. Wang, T. Wang and J. Qiu // International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY). Kagawa, Japan, 2024. Pp. 01-06. Doi: 10.1109/iFUZZY63051.2024.10662875.
14. Distributed Prescribed-Time Formation Control of Heterogeneous T–S Fuzzy Multiagent Systems: A Hierarchical Design Approach / Y. Zhi, L. Liu, H. Fan and B. Wang, // in IEEE Transactions on Fuzzy Systems. Vol. 32, № 12. Pp. 6789-6800. Dec. 2024. Doi: 10.1109/TFUZZ.2024.3464645.
15. Event triggered control for multi-agent systems with packet dropout / Q. -Q. Li, Y.-W. Wang, J.-W. Xiao and J.-W. Yi // 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA). Taichung, Taiwan, 2014. Pp. 1180-1185. Doi: 10.1109/ICCA.2014.6871089.
16. Adaptive fuzzy formation control for heterogeneous multi-agent systems using time-varying IBLFs / Hou, HQ., Liu, YJ., Liu, L. et al. // Nonlinear Dyn. 2023. № 111. P. 16077–16091 https://doi.org/10.1007/s11071-023-08686-2
17. Zhao, Wei. Observer-Based Adaptive Fuzzy Tracking Control Using Integral Barrier Lyapunov Functionals for A Nonlinear System With Full State Constraints / Zhao Wei, Yanjun Liu and Lei Liu // IEEE/CAA J. Autom. Sinica. Mar., 2021. Vol. 8, № 3. Pp. 617-627. Doi: 10.1109/JAS.2021.1003877
18. Li, X., He, D. & Zhang, Q. Observer-Based Adaptive Fuzzy Distributed Control of Non-affine Multi-agent Systems with Input Quantization [Electronic resource] // Int. J. Fuzzy Syst. 2023. № 25. P. 118–135. Access mode: https://doi.org/10.1007/s40815-022-01354-4
19. Бобцов А.А. Адаптивное и робастное управление с компенсацией неопределенностей: учебное пособие / А.А. Бобцов, А.А. Пыркин. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 135с.
20. Krstic M. Nonlinear and adaptive control design / M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic. New York: Wiley, 1995. 528 p.
21. Tanaka, K. Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach / K. Tanaka, H. O. Wang. New York : John Wiley & Sons, 2001. 320 p.

References

1. Kalyaev, I. A. Models and algorithms of collective control in robot groups [Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov] / I. A. Kalyaev, A. R. Gaiduk, S. G. Kapustyan. – Moscow: Fizmatlit, 2009. – 280 p. – ISBN 978-5-9221-1141-6. – EDN MUWSIT.
2. Gun, Sh. Decision-making model for multi-task warehouse robots based on a four-level collaborative optimization architecture [Model' prinyatiya resheniy dlya mnogozadachnykh skladskikh robotov na osnove chetyrekhurovnevoy arkhitektury sovmestnoy optimizatsii] / Sh. Gun // Problems of Artificial Intelligence. – 2025. – No. 3 (38). – P. 100–112. – DOI: 10.24412/2413-7383-2025-3-38-100-112.
3. Zuev, V. M. Dynamics of a jumping wheeled robot [Dinamika prygayushchego kolesnogo robota] / V. M. Zuev, D. A. Pervenko // Problems of Artificial Intelligence. – 2026. – No. 1 (40). – P. 241–253. – DOI: 10.24412/2413-7383-2026-1-40-241-253.
4. Ren, W. Distributed coordination of multi-agent networks: emergent problems, models, and issues / W. Ren, Y. Cao. – London : Springer, 2011. – 288 p. – DOI: 10.1007/978-0-85729-039-7.
5. Prikhodskiy, A. A. Comparative analysis of coordination algorithms in decentralized multi-agent systems with dynamic communication topology [Sravnitel'nyy analiz algoritmov koordinatsii v detsentralizovannykh mnogagentnykh sistemakh s dinamicheskoy topologiey svyazi] / A. A. Prikhodskiy, U. V. Belkin // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2026. – No. 4 (311). – P. 37–41. – DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-37-41. – EDN HHPGRC.
6. Belkin, U. V. Development and evaluation of decentralized control algorithms for robot swarms in emergency response scenarios [Razrabotka i otsenka algoritmov detsentralizovannogo upravleniya royami robotov v stsenariyakh likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy] / U. V. Belkin, A. A. Prikhodskiy, S. A. Serikov // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2025. – No. 4 (299). – P. 12–15. – DOI: 10.35211/1990-5297-2025-4-299-12-15. – EDN BUPLZN.
7. Koru, A. T. Cooperative output regulation of heterogeneous multiagent systems: a global distributed control synthesis approach / A. T. Koru, S. B. Sarsılmaz, T. Yucelen, E. N. Johnson // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2021. – Vol. 66, No. 9. – P. 4289–4296. – DOI: 10.1109/TAC.2020.3032496.
8. Gao, Z. Fuzzy weight-based secure formation control for two-order heterogeneous multi-agent systems via reinforcement learning / Z. Gao, N. Xu, G. Zong, B. Niu, X. Zhao // Information Sciences. – 2025. – Vol. 698. – Art. 121782. – DOI: 10.1016/j.ins.2024.121782.

9. Zhang, H. Adaptive fuzzy prescribed-time formation control for nonlinear multi-agent systems / H. Zhang, C. Chen, Z. Xiang // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2025. – Vol. 22. – P. 10986–10996. – DOI: 10.1109/TASE.2025.3531846.
10. Qin, Z. Distributed control of a class of nonlinear multi-agent systems with switching topologies / Z. Qin, T. Liu, Z.-P. Jiang // 2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). – Changsha, China, 2018. – P. 620–625. – DOI: 10.1109/WCICA.2018.8630412.
11. Li, Y. Adaptive fuzzy control for heterogeneous vehicular platoon systems with collision avoidance and connectivity preservation / Y. Li, Y. Zhao, S. Tong // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2023. – Vol. 31, No. 11. – P. 3934–3943. – DOI: 10.1109/TFUZZ.2023.3271904.
12. Chen, J. Distributed control of robotic swarms from reactive high-level specifications / J. Chen, R. Sun, H. Kress-Gazit // 2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). – Lyon, France, 2021. – P. 1247–1254. – DOI: 10.1109/CASE49439.2021.9551578.
13. Bi, Y. Adaptive fuzzy secure consensus control of nonlinear multi-agent systems under deception attacks / Y. Bi, P. Ding, F. Wang, T. Wang, J. Qiu // 2024 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY). – Kagawa, Japan, 2024. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/iFUZZY63051.2024.10662875.
14. Zhi, Y. Distributed prescribed-time formation control of heterogeneous T–S fuzzy multiagent systems: a hierarchical design approach / Y. Zhi, L. Liu, H. Fan, B. Wang // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2024. – Vol. 32, No. 12. – P. 6789–6800. – DOI: 10.1109/TFUZZ.2024.3464645.
15. Li, Q.-Q. Event triggered control for multi-agent systems with packet dropout / Q.-Q. Li, Y.-W. Wang, J.-W. Xiao, J.-W. Yi // 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA). – Taichung, Taiwan, 2014. – P. 1180–1185. – DOI: 10.1109/ICCA.2014.6871089.
16. Hou, H. Q. Adaptive fuzzy formation control for heterogeneous multi-agent systems using time-varying IBLFs / H. Q. Hou, Y. J. Liu, L. Liu [et al.] // Nonlinear Dynamics. – 2023. – Vol. 111. – P. 16077–16091. – DOI: 10.1007/s11071-023-08686-2.
17. Zhao, W. Observer-based adaptive fuzzy tracking control using integral barrier Lyapunov functionals for a nonlinear system with full state constraints / W. Zhao, Y. Liu, L. Liu // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. – 2021. – Vol. 8, No. 3. – P. 617–627. – DOI: 10.1109/JAS.2021.1003877.
18. Li, X. Observer-based adaptive fuzzy distributed control of non-affine multi-agent systems with input quantization / X. Li, D. He, Q. Zhang // International Journal of Fuzzy Systems. – 2023. – Vol. 25. – P. 118–135. – DOI: 10.1007/s40815-022-01354-4.
19. Bobtsov, A. A. Adaptive and robust control with uncertainty compensation [Adaptivnoe i robastnoe upravlenie s kompensatsiey neopredelennostey] : textbook / A. A. Bobtsov, A. A. Pyrkin. – Saint Petersburg: ITMO University, 2013. – 135 p.
20. Krstić, M. Nonlinear and adaptive control design / M. Krstić, I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotović. – New York: Wiley, 1995. – 528 p.
21. Tanaka, K. Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach / K. Tanaka, H. O. Wang. – New York: John Wiley & Sons, 2001. – 320 p.

RESUME

A. A. Prihodskiy, D. K. Lebedev, S. A. Serikov

Adaptive Fuzzy Formation Control for Heterogeneous Multi-Robot Systems under Partial Observability

This paper presents a solution to the timely problem of coordinated control for heterogeneous groups of mobile robots under environmental uncertainty and communication constraints. An adaptive fuzzy formation-keeping algorithm is developed, which ensures coherent motion of diverse platforms (UAVs, ground robots) under conditions of partial observability, stochastic packet losses, and parametric uncertainties in dynamic models.

The key contribution of this research is the integration of three components into a unified control architecture: a baseline Takagi–Sugeno fuzzy regulator that ensures smooth coordination of agent positions through linguistic processing of formation errors; a hybrid state observer with a dynamic confidence metric that adaptively weights measurements according to their credibility and switches to a predictive model during communication link failures; and an online parameter adaptation mechanism for the fuzzy system, synthesized using the Lyapunov direct method.

The theoretical novelty of this work lies in the rigorous proof of uniform ultimate boundedness for the error of the closed-loop multi-agent system, accounting for platform heterogeneity, switching communication graph topology, and stochastic disturbances. The derived analytical stability conditions, formulated as linear matrix inequalities, enable a priori selection of regulator parameters with guaranteed performance metrics.

Numerical simulation results confirm the practical effectiveness of the proposed approach: a group of three heterogeneous robots robustly maintains a triangular formation despite up to 40% packet loss, high sensor noise levels, and significant differences in the dynamic characteristics of the agents. Furthermore, the interpretability of the fuzzy rules and the theoretical safety guarantees make the developed algorithm highly promising for deployment in real-world robotic systems for search-and-rescue, monitoring, and logistics applications.

РЕЗЮМЕ

А. А. Приходский, Д.К. Лебедев С. А. Сериков
Адаптивное нечеткое управление формацией гетерогенных роботов в условиях частичной наблюдаемости

В работе представлено решение актуальной задачи коллективного управления гетерогенными группами мобильных роботов в условиях неопределённости среды и ограничений коммуникации. Разработан адаптивный нечёткий алгоритм поддержания формации, который обеспечивает согласованное движение разнородных платформ (БПЛА, наземные роботы) при частичной наблюдаемости, стохастических потерях пакетов данных и параметрических неопределённостях динамических моделей.

Ключевым вкладом исследования является интеграция трёх компонентов в единую архитектуру управления: базового нечёткого регулятора Такаги–Сугено, обеспечивающего плавное согласование положений агентов за счёт лингвистической обработки ошибок формации; гибридного наблюдателя состояния с динамической метрикой уверенности, который адаптивно взвешивает измерения по степени их достоверности и переключается на прогнозную модель при разрывах канала связи; механизма онлайн-адаптации параметров нечёткой системы, синтезированного на основе прямого метода Ляпунова.

Теоретическая новизна работы заключается в строгом доказательстве равномерной окончательной ограниченности ошибки замкнутой мультиагентной системы с учётом гетерогенности платформ, переменной топологии графа связи и стохастических возмущений. Полученные аналитические условия устойчивости, сформулированные в виде линейных матричных неравенств, позволяют априорно выбирать параметры регулятора с гарантированными показателями качества.

Результаты численного моделирования подтвердили практическую эффективность предложенного подхода: группа из трёх гетерогенных роботов устойчиво сохраняет треугольную формацию при потере до 40% пакетов данных, высоком уровне сенсорного шума и существенном различии динамических характеристик агентов. При этом интерпретируемость нечётких правил и теоретические гарантии безопасности делают разработанный алгоритм перспективным для внедрения в реальные робототехнические комплексы поисково-спасательного, мониторингового и логистического назначения.

Приходский Андрей Александрович – аспирант, ассистент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), 190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.. Тел.: +7 (911) 230-74-52. E-mail: prihodskiy@gmail.com *Область научных интересов:* групповая робототехника, нечеткое управление, методы машинного обучения. ORCID: 0009-0009-5625-6623.
Лебедев Денис Константинович – аспирант кафедры управления в технических системах, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), 190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Тел.: +7 (981) 950-66-85. E-mail: asspirat2008@gmail.com. *Область научных интересов:* групповая робототехника, нечеткое управление, методы машинного обучения. ORCID: 0009-0004-6906-718X
Сериков Сергей Анатольевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), 190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.. Тел.: +7 (931) 541-91-25. E-mail: srkv@inbox.ru *Область научных интересов:* групповая робототехника, нечеткое управление, методы машинного обучения. ORCID: 0000-0002-3668-2459.

Prikhodsky Andrey Aleksandrovich – postgraduate student, Assistant at the Department of Electromechanics and Robotics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), 190000, Russia, Saint Petersburg, Bolshaya Morskaya St., 67, Building A. Tel.: +7 (911) 230-74-52. E-mail: prihodskiy@gmail.com. *Research interests:* group robotics, fuzzy control, machine learning methods. ORCID: 0009-0009-5625-6623
Lebedev Denis Konstantinovich – postgraduate student, Department of Control Systems, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), 67 Bolshaya Morskaya St., Building A, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation. Phone: +7 (981) 950-66-85. E-mail: asspirat2008@gmail.com. Research interests: multi-robot systems, fuzzy control, machine learning methods. ORCID: 0009-0003-2433-5649.
Serikov Sergey Anatolyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Electromechanics and Robotics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), 190000, Russia, Saint Petersburg, Bolshaya Morskaya St., 67, Building A. Tel.: +7 (931) 541-91-25. E-mail: srkv@inbox.ru. *Research interests:* group robotics, fuzzy control, machine learning methods. ORCID: 0000-0002-3668-2459

Статья поступила в редакцию: 25.03.2026
одобрена после рецензирования 29.04.2026; принята к публикации 02.09.2026
The article was submitted 25.03.2026; approved after reviewing 29.04.2026;
accepted for publication 02.09.2026.