

УДК 007.52 + 681.51

 10.25209/2079-3316-2026-17-2-3-82

Сравнение децентрализованной, централизованной и гибридной структур взаимодействия для гетерогенной группы беспилотных летательных аппаратов

Тагир Забирович Муслимов[✉]

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

[✉] tagir.muslimov@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается концепция гетерогенной (разнородной) или полиморфной взаимодействующей группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА или дронов) для оценки перспектив дальнейшего построения роевой системы на основе такого подхода. Исследуются несколько вариантов структуры взаимодействия между отдельными БПЛА в составе группы: децентрализованная, централизованная и гибридная архитектуры. На основе моделирования полета формации БПЛА проведен анализ эффективности управления в соответствии с несколькими метриками. В результате выявлены преимущества и недостатки каждого из изучаемых вариантов структуры взаимодействия в гетерогенной группе БПЛА.

Исследование проведено на основе компьютерного моделирования полета с реалистичной динамикой отдельных летательных аппаратов. Рассмотрено влияние временных задержек в канале связи на качество работы системы управления группой. По итогам моделирования получены значения количественных метрик, отражающие эффективность системы группового управления гетерогенной формацией БПЛА, и выполнен их анализ. Приведены графики параметров полета, которые позволяют сделать выводы о влиянии структуры взаимодействия на поведение отдельных летательных аппаратов в процессе их функционирования.

Автономные гетерогенные группы и рои БПЛА являются перспективным направлением для исследований, которое привлекает все больше внимания. Такие системы обладают существенными преимуществами по сравнению с однородными по составу группами БПЛА. Статья содержит анализ влияния разных вариантов структуры взаимодействия на работу системы управления гетерогенной группой БПЛА и динамику полета такой формации. Результаты исследования могут быть полезны для оценки возможных способов практической реализации гетерогенного автономного роя БПЛА.

Ключевые слова и фразы: рой дронов, стайное управление, управление роем, групповая робототехника, строй БПЛА, разнородная группа роботов, устойчивость системы по входу-состоянию

Благодарности: Работа выполнена в рамках гранта, предоставленного по договору от 26.05.2025 № 70-2025-000650 между Университетом ИТМО и Фондом поддержки проектов Национальной технологической инициативы.

Для цитирования: Муслимов Т.З. *Сравнение децентрализованной, централизованной и гибридной структур взаимодействия для гетерогенной группы беспилотных летательных аппаратов* // Программные системы: теория и приложения. 2026. Т. 17. № 2(71). С. 3–82. https://psta.psiras.ru/read/psta2026_2_3-82.pdf

Введение

Одно из наиболее перспективных направлений исследований по автономным беспилотным летательным аппаратам (БПЛА или дронам) относится к области управления группами или роями [1, 2]. В настоящее время публикуются работы, в которых изучаются роевые системы БПЛА [3–5]. При этом на сегодняшний день в подавляющем большинстве случаев такие изучаемые группы (в том числе роевые) являются однородными по составу, то есть состоят из летательных аппаратов одного типа (например, квадрокоптеров [6, 7] или самолетных БПЛА [8]).

В последнее время все чаще в публикациях рассматриваются разнородные (или гетерогенные) группы БПЛА, то есть состоящие из летательных аппаратов разных типов. Именно гетерогенные рои позволяют в полной мере использовать возможности отличающихся типов БПЛА [9]. В то же время различия в динамических ограничениях и моделях энергопотребления создают проблемы для точного описания задач планирования траектории полета такого роя БПЛА [10]. Поэтому исследования аспектов функционирования гетерогенных роев являются актуальными.

В работе [11] изучалась гетерогенная группа, состоявшая из одного вертолета и нескольких квадрокоптеров. В статье [12] гетерогенная группа применялась для инспекции линий электропередач. За счет использования особенностей БПЛА разных типов удалось достичь сокращения времени на планирование и выполнение миссии инспекции. Работа [13] рассматривает гетерогенную группу БПЛА, применяя к ней термин «полиморфный рой». При этом на БПЛА возлагаются разные роли в зависимости от их типа при выполнении миссии обследования заданной области. БПЛА самолетного типа использовались для наблюдения с большой высоты, а квадрокоптеры – для инспекции с близкого расстояния. В итоге была предварительно оценена эффективность работы различных конфигураций гетерогенного роя при разном его составе по соотношению БПЛА самолетного типа и квадрокоптеров. Объектом исследования в статье [14] является гетерогенный рой, который принимает решения на основе прецедентов.

В статье предлагается структура гетерогенного (разнородного или полиморфного) роя, который состоит из двух подгрупп: подгруппы БПЛА самолетного типа и подгруппы БПЛА мультироторного типа. Каждая подгруппа выполняет индивидуальную задачу, при этом подгруппы взаимодействуют между собой через специально назначенные БПЛА-ретрансляторы (по одному в каждой подгруппе). В целом группа, состоящая

из двух подгрупп, образует целостный гетерогенный коллектив, способный более эффективно решать известные задачи и возможно выполнить новые задачи, которые не под силу однородной группе. Рисунок 1 показывает обобщенную схему предлагаемой системы.

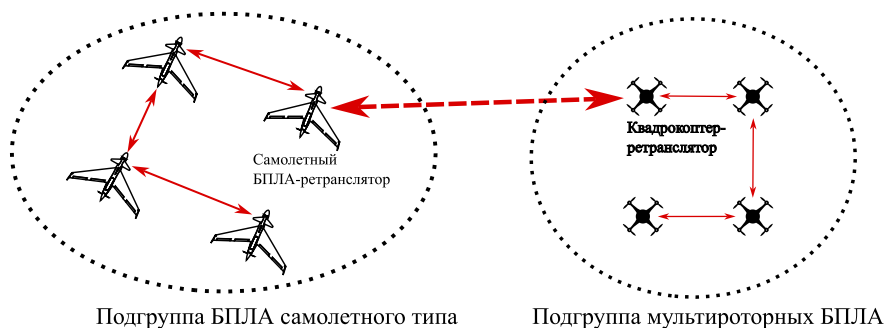


Рисунок 1. Гетерогенная группа, состоящая из двух подгрупп: БПЛА самолетного типа и квадрокоптеры

Для изучения структуры такой гетерогенной группы были проанализированы с помощью компьютерного моделирования разные типы взаимодействия в группе: децентрализованный, централизованный и гибридный. Для дальнейшего исследования выбрана децентрализованная структура ввиду ее большей перспективности и гибкости.

Сравнительный анализ структур и обоснование выбора будут представлены в разделе результатов моделирования, который продемонстрирует такие преимущества, как: меньшие интегральные рассогласования и меньшее влияние несовершенства характеристик канала связи. Некоторые достоинства децентрализованной структуры также выявлены при анализе устойчивости системы, что отражено в разделе «Анализ устойчивости» данной статьи. Термин «рой» используется для описания децентрализованной структуры взаимодействия внутри группы потому, что каждый БПЛА управляется исключительно на основе локальной информации от своих *sоседей*. Кроме того, масштабирование такой системы не вызовет проблем даже при небольшом исходном количестве летательных аппаратов в подгруппах. Следовательно, предварительные исследования могут проводиться с использованием малой группы БПЛА.

В статье [15] проводилось сравнение разных структур взаимодействия, но для однородной группы, управляемой оператором, а не автономной группы, как в нашей статье. В работе [16] гетерогенная группа БПЛА была использована для задачи планирования обследования территории в целях точного земледелия. Однако такой коллектив нельзя в полной мере назвать гетерогенным, поскольку рассмотренная группа состояла из летательных аппаратов одного типа (мультироторов), хотя и разных моделей. Авторы статьи [17] изучают задачу реконфигурации двухуровневой гетерогенной группы БПЛА. При этом в [17] исследовалась группа, состоявшая из аппаратов разных типов – мультироторов и самолетных. В работе [18] изучалось распределение задач в гетерогенном рое БПЛА, причем различающихся по специализациям, но именно типы летательных аппаратов не уточнены.

В некоторых работах внимание обращено на процесс информационного обмена между бортами. Например, в статье [19] предложена схема информационного обмена между БПЛА внутри группы и самой группы с пунктом управления, позволяющая рассчитать оптимальные параметры передающих устройств. Однако при этом рассматривалась однородная группа БПЛА и основное внимание уделено организации информационного обмена, а не влиянию структуры взаимодействия на динамику полета группы. Более близкой к нашей статье является работа [20], однако исследуемая там группа была однородной.

Рассмотрим также патент «Самоорганизующийся и самоуправляемый рой БПЛА и способ контроля территории на наличие установленного события посредством такого роя» [21] и основные отличия исследуемой в нашей статье системы от той, что представлена в этом патенте. В данном патенте рой состоит из летательных аппаратов одного типа (с различными типами навесного оборудования на них), которым назначаются отличающиеся роли. Также имеется описание сценария действий для «обнаружения события» посредством такого роя.

Основное отличие предлагаемой нами системы состоит в том, что используются аппараты *разных* типов (самолетные и мультироторные), из чего вытекают новые свойства такого разнородного или гетерогенного роя (встречается также термин «полиморфный рой» в англоязычных статьях [13]). Новые свойства обеспечиваются не только возможными отличиями в навесном оборудовании, но и различиями в динамике полета самих аппаратов: принципиально разные скорость, маневренность, возможность или невозможность зависания в заданной области, продолжительность полета у разных типов аппаратов.

В качестве примера применения разнородного роя можно назвать миссию по разведке, наблюдению, обнаружению очагов и процессов распространения лесного пожара по некоторой территории. Как отмечено в [13], на разных этапах миссии требуются аппараты с разнообразными возможностями и с отличающейся динамикой полета. Если область поиска достаточно большая, что обычно верно, то наиболее эффективные результаты при обследовании территории и наблюдении за ней можно получить при полете на большой высоте в течение продолжительного времени (эта высота полета дает покрытие большей площади) с более высокой скоростью.

В такой ситуации применение мультиротора нерационально с точки зрения расхода энергии. Наиболее эффективно с задачей наблюдения справляются БПЛА самолетного типа. Однако обнаружение некоторого события (например, очага возгорания) зачастую является только первым шагом миссии, особенно в ситуации, когда возможен ложноположительный результат. Например, яркое пятно на тепловом изображении может быть как очагом возгорания, так и живым объектом. Далее нужно произвести уточнение информации, и большая высота полета является препятствием для выполнения этого второго шага миссии. Здесь, на данном шаге, гораздо эффективнее использовать мультироторные БПЛА, летящие на низкой высоте.

Таким образом, подгруппа БПЛА самолетного типа производит обнаружение и направляет подгруппу мультироторов в заданную область для уточнения информации. Необходимость использования разных типов аппаратов возникает из-за того, что определенная категория бортов эффективнее выполняет назначенный ей шаг миссии. Вместе с тем в отличие от этой статьи в работе [13] нет разделения на подгруппы одного типа, внутри которых БПЛА взаимодействуют между собой для построения заданной формации.

Существует необходимость использования нескольких коммуницирующих аппаратов разного типа в каждой подгруппе разнородного роя. В патенте [21] БПЛА в подгруппе действуют самостоятельно, взаимодействуя между собой ограниченно. Например, в подгруппе «дронов-исследователей» каждый такой БПЛА проводит обследование в одиночку и далее рассылает сигнал обнаружения через «метку» или самостоятельно другим аппаратам. Таким образом, его коммуникация ограничена оповещением остальных БПЛА. Аналогично, в подгруппе «дронов-поисковиков» каждый БПЛА не взаимодействует с другими в целях выполнения задания, а лишь оповещает их после завершения своего задания.

В патенте [21] сказано, что «дроны-рабочие» и «дроны-координаторы» могут двигаться строем (формацией), то есть в данных подгруппах они способны взаимодействовать для построения заданной формации. В то же время не сообщается, за счет чего это достигается и какой применяется алгоритм управления.

В этой статье управление группой и взаимодействие происходят децентрализованно, что ведет к возможности беспроблемной масштабируемости роя и изначальной адаптируемости к потере аппаратов в группе. Ключевое отличие предлагаемой ниже системы состоит в том, что подгруппа БПЛА самолетного типа проводит совместное обследование территории. При этом обмен данными может происходить не только для полета строем (формацией), но и для комплексирования информации, то есть слияния сенсорных данных, что открывает возможности более эффективного обнаружения событий. Кроме того, за счет децентрализации система становится нечувствительной к потере БПЛА в группе, поскольку утрата аппаратов не ведет к срыву миссии.

Основные преимущества предлагаемой системы:

- Покрытие большей площади за меньшее время увеличивает скорость выполнения задач миссии за счет применения нескольких аппаратов вместо одного.
- Экономическая эффективность: множество дешевых аппаратов выгоднее одного дорогостоящего.
- Использование отличающихся типов БПЛА в разных подгруппах ведет к более эффективному выполнению подзадач миссии каждой подгруппой за счет различий в характеристиках динамики полета отдельного типа аппаратов, чем в патенте [21]:
- Взаимодействие для слияния сенсорных данных ведет к более эффективному обнаружению событий в сравнении с патентом [21]:

Наблюдение происходит с разных точек под различными углами; информация, получаемая отдельным БПЛА (например, с камеры) предполагает пересылку другим БПЛА в составе группы (например, соседним) для дальнейшей обработки и улучшения эффективности наблюдения и обнаружения. Также БПЛА, на основе обмена сенсорными данными, могут строить свои совместные действия для улучшения итогового сбора данных об окружающей среде.

Когда, например, нужно отнести обнаруженный объект к определенному классу (задача распознавания), то помогают и сам обмен данными между БПЛА, и то, что осмотр объекта происходит с разных углов различными бортами и, возможно, различными видами сенсоров (например, с одного борта в инфракрасном диапазоне, а с другого — с помощью компьютерного зрения).

Слияние данных с разных БПЛА можно производить на основе фильтра Байеса или фильтра Калмана. Реализация слияния может быть централизованной, децентрализованной или гибридной в зависимости от структуры обмена данными в группе и подгруппах.

- Изначальная адаптируемость системы к потере аппаратов в группе за счет децентрализации каждой подгруппы разнородного роя ведет к повышению надежности относительно патента [21].
- Возможность быстрого и эффективного перераспределения ролей за счет децентрализации каждой подгруппы разнородного роя отличает от патента [21].
- Взаимодействие подгрупп роя может происходить *в процессе* выполнения миссии, а не только после завершения задания какой-либо подгруппой. Это приводит к гибкому применению роя и более эффективному выполнению сложных миссий в динамических условиях (отличие от патента [21]).

Для оценки преимуществ и недостатков различных типов взаимодействия в гетерогенной группе БПЛА ниже приводятся детальное сравнительное моделирование и анализ. Целью этой работы является предложение и проведение предварительного сравнительного анализа трех структур взаимодействия (централизованной, децентрализованной, гибридной) специально для гетерогенного коллектива (БПЛА самолетного типа и мультироторные БПЛА). Новизна работы заключается не в разработке новых законов управления для отдельных агентов-БПЛА, а в их интеграции в рамках гетерогенной системы и сравнительном анализе различных структур взаимодействия именно для такой разнородной группы. Результаты исследования могут быть полезны для оценки возможных способов реализации гетерогенного автономного роя БПЛА на практике.

В таблице 1 представлено обобщенное сравнение ключевых характеристик рассмотренных выше работ и предлагаемого исследования, что позволяет увидеть системные отличия основных направлений существующих научных разработок.

Таблица 1. Сравнение существующих подходов по отношению к исследуемой системе

Группа работ	Ключевые особенности в контексте сравнения	Отличия нашего исследования
Работы с ограниченной или формальной гетерогенностью [11–13], [16], [18]	Гетерогенность часто сводится к разным типам навесного оборудования, разным моделям одного типа БПЛА или разделению ролей без учета динамики полета. Отсутствует глубокий анализ структур взаимодействия (централизованная/децентрализованная) и влияния различий в динамике аппаратов.	В нашем исследовании гетерогенность обеспечена принципиально разными типами БПЛА (самолетными и мультироторными) с разделением на подгруппы. Внутри подгрупп реализованы взаимодействия для построения формаций и возможность слияния сенсорных данных, что позволяет эффективно использовать динамические различия.
Работы, исследующие близкие вопросы, но на однородных группах [15], [19], [20]	Анализируются структуры взаимодействия, информационный обмен, устойчивость, но для группы, состоящей из аппаратов одного типа. Результаты не переносятся напрямую на гетерогенный рой из-за различий в динамике и требованиях к связи.	Впервые проведен сравнительный анализ гетерогенной, централизованной, децентрализованной и гибридной структуры управления роями с принципиально различной динамикой. Показано влияние характеристик аппаратов и структуры взаимодействия на надежность и эффективность связи.
Работы с разнотипными БПЛА (самолетные + мультироторы) [13] (частично), [17]	Рассматриваются гетерогенные группы, но акцент сделан на рекофигурации или ролях на разных этапах миссии. Взаимодействие между аппаратами либо отсутствует, либо ограничено, нет децентрализованного управления внутри подгрупп и возможностей слияния сенсорных данных в реальном времени.	Предложена двухуровневая структура, где каждая подгруппа однородных БПЛА функционирует в том числе в децентрализованном режиме, а взаимодействие между подгруппами осуществляется через выделенные ретрансляторы. Это обеспечивает масштабируемость, устойчивость к потере узлов и гибкое перераспределение задач.
Патент [21] (наиболее близкий аналог)	Самоорганизующийся рой из аппаратов одного типа с разным оборудованием. Взаимодействие между подгруппами (исследовательской, поисковой, координационной, прочими) носит характер оповещения о завершении этапа, отказа или смены задачи, отсутствует единое поле управления строем и возможности слияния данных в реальном времени.	Основные отличия: – Использование различных типов БПЛА (самолетных + мультироторных). – Возможность децентрализованного управления внутри каждой подгруппы. – Способность адаптироваться к потере БПЛА благодаря возможностям децентрализации. – Взаимодействие между подгруппами во время выполнения миссии, а не только после завершения этапа.

Ниже представлено описание используемых для моделирования летательных аппаратов динамических моделей. Использование общепринятых в литературе нелинейных моделей динамики твердого тела для БПЛА и учет ограничений сверху на линейные и угловые скорости повышают реалистичность этих моделей.

1. Используемые модели

1.1. Модель БПЛА самолетного типа

В земной (глобальной) системе координат положение этого БПЛА задается в виде вектора $[x_e \ y_e \ h]^T$ в метрах. Угловое положение задается через углы: курсовой угол, угол наклона траектории полета и угол крена $[\chi \ \gamma \ \varphi]^T$ в радианах.

Считаем, что БПЛА оснащен настроенным автопилотом, который успешно стабилизирует движение. Высокоуровневая модель предполагает, что БПЛА летит в режиме координированного поворота с нулевым боковым скольжением (сносом). Автопилот управляет скоростью полета, высотой и углом крена. Соответствующие уравнения движения для высокоуровневой модели имеют вид [22]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= v_g \cos \chi \cos \gamma, & \dot{y}_e &= v_g \sin \chi \cos \gamma, \\ \dot{h} &= v_g \sin \gamma, & \dot{\chi} &= \frac{g \cos(\chi - \psi)}{v_g} \tan \varphi, \\ v_g \sin(\gamma^c) &= \min(\max(k_h(h^c - h), -v_g), v_g), \\ \dot{\gamma} &= k_\gamma(\gamma^c - \gamma), & \dot{v}_a &= k_{v_a}(v_a^c - v_a), \\ \frac{g \cos(\chi - \psi)}{v_g} \tan \varphi^c &= k_\chi(\chi^c - \chi), \\ \ddot{\varphi} &= k_{P_\varphi}(\varphi^c - \varphi) + k_{D_\varphi}(-\dot{\varphi}). \end{aligned}$$

Здесь через v_a и v_g обозначены воздушная и земная скорости БПЛА; через k_* – коэффициенты регулятора (контроллера); через g – ускорение свободного падения. Как можно заметить, эта аппроксимация динамики согласуется со стандартными ПД- и П-регуляторами с соответствующими коэффициентами.

Высокоуровневая модель предполагает, что в автопилот поступают заданные значения курсового угла, угла наклона траектории и воздушной скорости $[\chi^c \ \gamma^c \ v_a^c]^T$. При этом происходит расчет задаваемого значения угла крена φ^c перед его непосредственным поступлением в автопилот.

Таким образом, состояниями данной модели являются элементы следующего вектора:

$$[x_e \ y_e \ h \ v_a \ \chi \ \gamma \ \varphi \ \dot{\varphi}]^T.$$

1.2. Модель БПЛА мультироторного типа (квадрокоптера)

В земной (глобальной) системе координат положение этого БПЛА задается в виде вектора $[x_e \ y_e \ z_e]^T$ в метрах. Угловое положение через ZYX-углы Эйлера: $[\psi \ \theta \ \varphi]^T$ в радианах. Угловые скорости обозначаются как $[p \ q \ r]^T$ в радианах в секунду. Высокоуровневая модель движения мультиротора (квадрокоптера) задается в соответствии с работой [23].

Матрица поворота, которая переводит вектор из связанной системы координат в земную систему координат, выглядит следующим образом:

$$R_b^e = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\psi s_\theta s_\psi & c_\psi s_\theta c_\psi & c_\psi s_\theta s_\psi + s_\psi s_\theta & c_\psi s_\theta c_\psi - s_\psi s_\theta & c_\psi s_\theta s_\psi - s_\psi s_\theta \\ c_\theta s_\psi & c_\psi c_\theta s_\psi & c_\psi c_\theta c_\psi & c_\psi c_\theta s_\psi + s_\psi c_\theta & c_\psi c_\theta c_\psi - s_\psi c_\theta & c_\psi c_\theta s_\psi - s_\psi c_\theta \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi \end{bmatrix}.$$

Здесь через c_* и s_* обозначены $\cos(*)$ и $\sin(*)$ соответственно.

Ускорение центра масс БПЛА в земной системе координат задается в таком виде:

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x}_e \\ \ddot{y}_e \\ \ddot{z}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} + R_b^e \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -F_{thrust} \end{bmatrix},$$

где

m – масса БПЛА,

g – ускорение свободного падения,

$-F_{thrust}$ – общая сила, создаваемая пропеллерами вдоль оси $-z_b$ связанной системы координат (указывающей вверх при горизонтальном положении БПЛА).

Замкнутый контур регулятора углового положения по углам крена-тангажа приближенно представляется через поведение двух независимых ПД-регуляторов для двух углов поворота и двумя независимыми П-регуляторами для угловой скорости рыскания и силы тяги. Угловые скорости, угловые ускорения и сила тяги задаются через следующие уравнения:

$$J = \begin{bmatrix} 1 & \sin \varphi \tan \theta & \cos \varphi \tan \theta \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \frac{\sin \varphi}{\cos \theta} & \frac{\cos \varphi}{\cos \theta} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \cos \theta \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{P_\varphi}(\varphi^c - \varphi) + K_{D_\varphi}(-\dot{\varphi}) \\ K_{P_\theta}(\theta^c - \theta) + K_{D_\theta}(-\dot{\theta}) \\ K_{P_\psi}(\psi^c - \psi) \end{bmatrix},$$

$$\dot{F}_{thrust} = K_{P_F}(F_{thrust}^c - F_{thrust}).$$

Высокоуровневая модель предполагает, что в автопилот поступают заданные значения крена, тангажа, угловой скорости рыскания

$$[\phi^c \quad \theta^c \quad \psi^c]^T,$$

а также заданная суммарная сила тяги F_{thrust}^c .

Коэффициенты (пропорциональные и по производной) контуров управления заданы в виде K_{P*} и K_{D*} соответственно, где символом * обозначены либо углы Эйлера, либо сила тяги. Эти коэффициенты наряду с массой БПЛА являются параметрами, которые могут быть заданы в свойствах модели.

Таким образом, состояниями данной модели являются элементы следующего вектора:

$$[x_e \quad y_e \quad z_e \quad \dot{x}_e \quad \dot{y}_e \quad \dot{z}_e \quad \psi \quad \theta \quad \varphi \quad p \quad q \quad r \quad F_{thrust}]^T.$$

1.3. Модель структуры взаимодействия в подгруппе БПЛА самолетного типа

В работах [24, 25] представлена и подробно описана модель структуры взаимодействия в группе БПЛА на примере кругового движения формации (данный подход может применяться и для других типов движения группы, например параллельных формаций [26]). Отметим, что в статьях [24, 25] рассматриваются однородные системы и единичная структура взаимодействия.

Пусть в группе N отдельных БПЛА самолетного типа. Определим вектор ошибок (рассогласований) относительных углов сдвига фаз $\bar{\mathbf{e}}_\theta = (\hat{e}_{i,j}) \in \mathbb{R}^{N(N-1) \times 1}$, где $\hat{e}_{i,j}$ – значение ошибки (рассогласования) для непосредственно взаимодействующих i -го и j -го агентов-БПЛА. В законах

управления скоростью полета используются элементы вектора \mathbf{e}_θ [24, 25]:

$$(1) \quad \mathbf{e}_\theta = \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_k \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{e}_{12} \\ \vdots \\ -\hat{e}_{k-1,k} + \hat{e}_{k,k+1} \\ \vdots \\ -\hat{e}_{N-1,N} \end{bmatrix} = \widehat{\mathbf{M}}_\theta \check{\mathbf{e}}_\theta + \mathbf{D},$$

где

$\mathbf{D} = -\mathbf{M}_\theta \mathbf{H}_\theta^{-1} \left(\mathbf{P}_{\theta d}^\top, \hat{P}_\theta \right)^\top$ – вектор управления системой в пространстве относительных состояний (пространство размерности $(N-1)$ порождается столбцами матрицы инцидентности графа коммуникации);

\mathbf{H}_θ – матрица, назначающая между какими агентами-БПЛА будут задаваться относительные расстояния, определяемая следующим образом:

$$\mathbf{H}_\theta = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{q}_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q}_i = \begin{bmatrix} \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ -1 \\ \vdots \end{bmatrix}^\top, \quad i < N, \quad \mathbf{q}_N = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}^\top,$$

при этом

$$\mathbf{H}_\theta \in \mathbb{R}^{N \times N} \quad \mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^{1 \times N};$$

положения «1» и «-1» в \mathbf{q}_i по сути определяют между какими бортами происходит вычисление относительного угла сдвига фаз;

это в свою очередь влияет на то, как будет задаваться $\mathbf{P}_{\theta d} \in \mathbb{R}^{(N-1) \times 1}$ – вектор желаемых относительных углов сдвига фаз;

$\hat{P}_\theta = \sum_{k=1}^N p_{\theta k}$ – сумма текущих углов сдвига фаз;

$\check{\mathbf{e}}_\theta = (\check{e}_{i,i+1})_{i=1}^{N-1} \in \mathbb{R}^{(N-1) \times 1}$ – вектор текущих углов сдвига фаз для непосредственно взаимодействующих агентов-БПЛА, вычисляемый с помощью смешанного произведения векторов. Например, при выборе конечного движения по часовой стрелке (вид сверху):

$$\check{e}_{i,i+1} = \begin{cases} \beta = \arccos \frac{(\mathbf{d}_i, \mathbf{d}_{i+1})}{\|\mathbf{d}_i\| \|\mathbf{d}_{i+1}\|}, & \mathbf{n} \cdot (\mathbf{d}_i \times \mathbf{d}_{i+1}) \geq 0 \\ 2\pi - \beta, & \text{в остальных случаях} \end{cases},$$

здесь

$\mathbf{d}_k, k \in 1, 2, \dots, N$ – вектор расстояния от центра окружности до борта в текущий момент времени,

$$\mathbf{n} = (0, 0, 1)^T;$$

$\mathbf{M}_\theta \in \mathbb{R}^{N \times N}$ – матрица взаимодействия, которая в случае децентрализованного взаимодействия «сосед с соседом», определяемого графом коммуникации, имеет вид

$$\mathbf{M}_\theta \triangleq \mathbf{M}_\theta^{ntn} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & -2 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & 1 & -2 & 1 \\ 0 & \ddots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

$\widehat{\mathbf{M}}_\theta \in \mathbb{R}^{N \times (N-1)}$ – матрица, получаемая из матрицы $\mathbf{M}_\theta \mathbf{H}_\theta^{-1}$ удалением N -го столбца.

Замечательное свойство вышеописанной модели заключается в том, что для смены структуры взаимодействия в группе достаточно скорректировать матрицу \mathbf{M}_θ , а также расстановку «1» и «-1» в \mathbf{q}_i в соответствии со структурой. Например, при структуре взаимодействия «ведущий-ведомые» с интерактивным *ведущим*, то есть участвующим в построении формации, получим

$$\mathbf{M}_\theta \triangleq \mathbf{M}_\theta^{lf} = \begin{bmatrix} -3 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Структура «ведущий-ведомые» с интерактивным *ведущим* относится к гибридным структурам, которые сочетают в себе достоинства и недостатки как децентрализованного, так и централизованного подходов.

При структуре взаимодействия «каждый с каждым» (отсутствие децентрализации) матрица \mathbf{M}_θ имеет вид

$$\mathbf{M}_\theta \triangleq \mathbf{M}_\theta^{ata} = \begin{bmatrix} -3 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & -3 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & -3 \end{bmatrix}.$$

В случае если *ведущий* не участвует в построении формации (именно такая структура будет использоваться в случае централизованной структуры), матрица $\widehat{\mathbf{M}}_\theta$ получается из матрицы $\mathbf{E} \left(\mathbf{M}_\theta^{lf} \mathbf{H}_\theta^{-1} \right)$ удалением N -го

столбца, где матрица $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ задается таким образом:

$$\mathbf{E} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}.$$

Следует отметить, что в данной статье под «децентрализованной» структурой понимается отсутствие единого центра управления всей системой в целом, а под «гибридной» структурой – сочетание централизованного и децентрализованного управления в подгруппах. В некоторых терминологиях такая система называется иерархической централизованной системой с обратной связью. Также отмечаем, что в рамках нашего исследования роли *ведущих* являются фиксированными, а возможность их динамической замены является предметом дальнейшего изучения.

2. Законы управления для построения заданной формации БПЛА самолетного типа

Выберем закон управления для скоростей БПЛА самолетного типа \mathbf{v}^c в таком виде [24, 25]:

$$\mathbf{v}^c = [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_N]^T \triangleq v \mathbf{1}_N + \mathbf{L},$$

где

$$\mathbf{1}_N \triangleq [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T,$$

$$\mathbf{L} \triangleq (v_f \left(\frac{2}{\pi}\right) \arctan(k_\theta e_i))_{i=\overline{1, N}} \in \mathbb{R}^{N \times 1} \text{ определяется с учетом (1);}$$

v – крейсерская скорость, оптимальная с точки зрения аэродинамических характеристик БПЛА;

v_f – максимальное значение нормы вектора дополнительной скорости, которое выбирается в соответствии с минимальной и максимальной возможной скоростью БПЛА;

k_θ – положительный коэффициент, от которого зависит плавность выхода бортов на заданные относительные положения.

Выберем закон управления для курсовых углов БПЛА самолетного типа χ^c в следующем виде [24, 25]:

$$\chi^c \triangleq (\varphi_i + \lambda [\pi/2 + \arctan(k_o \{d_i - \rho\})])_{i=\overline{1, N}} \in \mathbb{R}^{N \times 1},$$

где

φ_i – фазовый угол вращения i -го БПЛА;

- $\lambda = \pm 1$ – параметр, который задает направление вращения формации (по или против часовой стрелки);
- k_o – положительный коэффициент, от которого зависит плавность выхода бортов на заданную круговую линию пути;
- d_i – расстояние от i -го БПЛА до центра вращения;
- ρ – радиус вращения.

3. Структура взаимодействия в гетерогенной группе БПЛА

Гетерогенная группа БПЛА состоит из бортов двух типов: самолетных и мультироторных (квадрокоптеров). Подгруппа БПЛА самолетного типа совершает круговое движение с общим радиусом и выстраиванием заданной формации через углы сдвигов фаз. Подгруппа квадрокоптеров совершает круговое движение внутри области, очерчиваемой траекториями подгруппы БПЛА самолетного типа, причем с меньшими радиусами вращения. Отметим, что эта задача служит иллюстративным примером для тестирования алгоритма, а не описанием реальной миссии.

Считаем, что две подгруппы взаимодействуют между собой через один выбранный БПЛА-ретранслятор в каждой подгруппе (итого два БПЛА-ретранслятора). Заметим, что вследствие взаимозаменяемости бортов идентичного типа в каждой подгруппе может происходить смена аппарата, назначаемого в качестве БПЛА-ретранслятора, то есть избрание другого БПЛА в качестве ретранслятора может произойти в процессе выполнения миссии.

Предполагается способность подгруппы квадрокоптеров получать сведения о состояниях одного БПЛА-ретранслятора самолетного типа. Подразумевается, что квадрокоптер-ретранслятор стремится поддерживать такой же фазовый угол вращения φ^R , как и БПЛА-ретранслятор самолетного типа. То есть данный квадрокоптер использует этот фазовый угол в качестве управляющего воздействия для получения заданной позиции:

$$p_1^{n,quad} = \rho_1 \cos \varphi^R, \quad p_1^{e,quad} = \rho_1 \sin \varphi^R,$$

где

ρ_1 – радиус вращения первого квадрокоптера (борт-ретранслятор),

$[p_1^{n,quad}, p_1^{e,quad}]^T$ – вектор координат первого квадрокоптера в земной системе координат.

Движение рассматривается на примере подгруппы из трех квадрокоптеров. Для второго и третьего квадрокоптеров уравнения движения

выглядят таким образом:

$$p_2^{n,quad} = \rho_2 \cos(\varphi^R + \Delta\varphi^R), \quad p_2^{e,quad} = \rho_2 \sin(\varphi^R + \Delta\varphi^R),$$

$$p_3^{n,quad} = \rho_3 \cos(\varphi^R - \Delta\varphi^R), \quad p_3^{e,quad} = \rho_3 \sin(\varphi^R - \Delta\varphi^R),$$

где

ρ_* – радиусы вращения квадрокоптеров,

$[p_*^{n,quad}, p_*^{e,quad}]^T$ – вектора координат квадрокоптеров в земной системе координат,

$\Delta\varphi^R$ – задаваемый угол смещения фазового угла вращения (сдвиг фаз).

Далее рассмотрим, как происходит управление радиусами вращения в подгруппе квадрокоптеров. Считаем, что квадрокоптер-ретранслятор может назначаться в качестве *ведущего* в этой подгруппе. В случае выбора структуры взаимодействия *ведущий-ведомые* формирование управляющих воздействий по радиусу $[\rho_1^c \ \rho_2^c \ \rho_3^c]^T$ задается так:

$$\rho_1^c = \rho_1 + k_{fw,1}(\rho^{fw} - \rho_1 - \Delta_{fw,1}),$$

$$\rho_2^c = \rho_2 + k_{12}(\rho_1 - \rho_2 - \Delta_{12}),$$

$$\rho_3^c = \rho_3 + k_{13}(\rho_1 - \rho_3 - \Delta_{13}),$$

где

$k_{fw,1}, k_{12}, k_{13}$ – настраиваемые коэффициенты,

ρ^{fw} – текущий радиус вращения БПЛА-ретранслятора самолетного типа,

$\Delta_{fw,1}$ – задаваемое смещение по радиусу вращения между БПЛА-ретранслятором самолетного типа и первым квадрокоптером (*ведущий*),

Δ_{12} – задаваемое смещение по радиусу вращения между *ведущим* и вторым квадрокоптером,

Δ_{13} – задаваемое смещение по радиусу вращения между *ведущим* и третьим квадрокоптером.

Здесь предполагается, что квадрокоптер-ретранслятор получает данные о радиусе вращения БПЛА-ретранслятора самолетного типа. Поэтому данный квадрокоптер устанавливает свой радиус вращения через вычитание от этого конечного радиуса.

В случае децентрализованной структуры взаимодействия формирование управляющих воздействий по радиусу $[\rho_1^c \ \rho_2^c \ \rho_3^c]^T$ задается

так:

$$\begin{aligned}\rho_1^c &= \rho_1 + k_{fw,1}(\rho^{fw} - \rho_1 - \Delta_{fw,1}), \\ \rho_2^c &= \rho_2 + k_{12}(\rho_1 - \rho_2 - \Delta_{12}) + k_{32}(\rho_3 - \rho_2 + \Delta_{32}), \\ \rho_3^c &= \rho_3 + k_{32}(\rho_2 - \rho_3 - \Delta_{32}),\end{aligned}$$

где

k_{32} – настраиваемый коэффициент,

Δ_{12} – задаваемое смещение по радиусу вращения между первым и вторым квадрокоптерами,

Δ_{32} – задаваемое смещение по радиусу вращения между третьим и вторым квадрокоптерами.

Если БПЛА-ретранслятор самолетного типа сильно удален от конечной круговой путевой линии, для ускорения выхода подгруппы квадрокоптеров на заданные орбиты вращения целесообразно вычислять радиус вращения квадрокоптера-ретранслятора не от текущего положения самолетного ретранслятора, а от конечной круговой путевой линии.

Первый квадрокоптер при вычислении задаваемого радиуса вращения ориентируется на БПЛА-ретранслятор самолетного типа. Второй квадрокоптер ориентируется как на первый, так и на третий квадрокоптер (они считаются его *соседями*). Третий квадрокоптер ориентируется только на второй квадрокоптер (он считается его *соседом*).

4. Анализ устойчивости

В данном разделе проводится анализ устойчивости предлагаемой системы. Прежде всего, в работах [24, 25] была показана асимптотическая устойчивость в целом для подгруппы БПЛА самолетного типа. Далее проводится анализ устойчивости системы по входу-состоянию (Input-to-State Stability – ISS).

Определим динамику рассогласований по углам Эйлера для подгруппы квадрокоптеров в следующем виде, основываясь на представленной ранее модели:

$$\begin{aligned}\ddot{e}_\varphi + K_{D_\varphi} \dot{e}_\varphi + K_{P_\varphi} e_\varphi &= w_\varphi(t), \\ \ddot{e}_\theta + K_{D_\theta} \dot{e}_\theta + K_{P_\theta} e_\theta &= w_\theta(t), \\ \dot{e}_\psi + K_{P_\psi} e_\psi &= w_\psi(t), \\ \dot{e}_F + K_{P_F} e_F &= w_F(t),\end{aligned}$$

где w_φ , w_θ , w_ψ и w_F – ограниченные возмущения от взаимодействия с подгруппой БПЛА самолетного типа.

Введем в рассмотрение вектор состояний:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi \\ e_\theta \\ \dot{e}_\theta \\ e_\psi \\ e_F \end{bmatrix}.$$

Тогда система в пространстве состояний записывается следующим образом:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{w},$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{P_\varphi} & -K_{D_\varphi} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{P_\theta} & -K_{D_\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{P_\psi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{P_F} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} -$$

блочно-диагональная гурвицева матрица,

$\mathbf{B} = \mathbf{I}_6$ – матрица входа, определяемая как единичная матрица,

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} 0 \\ w_\varphi \\ 0 \\ w_\theta \\ w_\psi \\ w_F \end{bmatrix} - \text{вектор ограниченных возмущений.}$$

Поскольку матрица \mathbf{A} гурвицева, то для любой матрицы $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0$ существует единственное решение $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$ для уравнения Ляпунова

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q}.$$

Выбирается квадратичная форма в качестве функции Ляпунова

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}.$$

Производная функции Ляпунова

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{x}) &= (\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{w})^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P} (\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{w}) \\ &= \mathbf{x}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{x} + 2\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{w} \\ &= -\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + 2\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{w}. \end{aligned}$$

Используя неравенство Юнга, для любого $\epsilon > 0$ можно получить

$$2\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{w} \leq \frac{1}{\epsilon} \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \epsilon \|\mathbf{w}\|^2.$$

Тогда производная функции Ляпунова может быть оценена следующим

образом:

$$\dot{V} \leq -\mathbf{x}^T \left(\mathbf{Q} - \frac{1}{\epsilon} \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right) \mathbf{x} + \epsilon \|\mathbf{w}\|^2.$$

Введем обозначение $\mathbf{M} \triangleq \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{B}^T \mathbf{P}$ (симметричная положительно полуопределенная матрица).

Выбираем ϵ достаточно большим, чтобы матрица $\mathbf{Q} - \frac{1}{\epsilon} \mathbf{M}$ оставалась положительно определенной. Так как $\mathbf{M} \geq 0$, то

$$\mathbf{x}^T \left(\mathbf{Q} - \frac{1}{\epsilon} \mathbf{M} \right) \mathbf{x} \geq \left(\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) - \frac{1}{\epsilon} \lambda_{\max}(\mathbf{M}) \right) \|\mathbf{x}\|^2.$$

Поэтому достаточно выбрать $\epsilon > \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{M})}{\lambda_{\min}(\mathbf{Q})}$, чтобы обеспечить выполнение

$$\lambda_{\min} \left(\mathbf{Q} - \frac{1}{\epsilon} \mathbf{M} \right) > 0.$$

Введем новые обозначения:

$$\lambda_m \triangleq \lambda_{\min} \left(\mathbf{Q} - \frac{1}{\epsilon} \mathbf{M} \right) > 0, \quad \lambda_p \triangleq \lambda_{\min}(\mathbf{P}) > 0, \quad \Lambda_p \triangleq \lambda_{\max}(\mathbf{P}) > 0.$$

Тогда оценка для производной функции Ляпунова записывается как

$$(2) \quad \dot{V} \leq -\lambda_m \|\mathbf{x}\|^2 + \epsilon \|\mathbf{w}\|^2 \leq -\frac{\lambda_m}{\Lambda_p} V + \epsilon \|\mathbf{w}\|^2.$$

Пусть $\alpha = \frac{\lambda_m}{\Lambda_p} > 0$, $\beta = \epsilon > 0$. Тогда, умножая обе части последнего неравенства (2) на $e^{\alpha t}$ и интегрируя, можно получить

$$V(t) \leq e^{-\alpha t} V(0) + \frac{\beta}{\alpha} \sup_{0 \leq \tau \leq t} \|\mathbf{w}(\tau)\|^2.$$

Используя $\lambda_p \|\mathbf{x}\|^2 \leq V(\mathbf{x})$ и $V(0) \leq \Lambda_p \|\mathbf{x}(0)\|^2$, данное неравенство сведем к

$$(3) \quad \|\mathbf{x}(t)\|^2 \leq \frac{\Lambda_p}{\lambda_p} e^{-\alpha t} \|\mathbf{x}(0)\|^2 + \frac{\beta}{\alpha \lambda_p} \sup_{0 \leq \tau \leq t} \|\mathbf{w}(\tau)\|^2.$$

Определим функции класса \mathcal{KL} и класса \mathcal{K}_∞

$$\beta_{\text{ISS}}(s, t) = \sqrt{\frac{\Lambda_p}{\lambda_p}} e^{-\frac{\alpha}{2} t} s \in \mathcal{KL}, \quad \gamma_{\text{ISS}}(s) = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha \lambda_p}} s \in \mathcal{K}_\infty.$$

Через извлечение квадратного корня из обеих частей (3) получаем стандартную форму оценки по входу-состоянию:

$$\|\mathbf{x}(t)\| \leq \beta_{\text{ISS}}(\|\mathbf{x}(0)\|, t) + \gamma_{\text{ISS}} \left(\sup_{0 \leq \tau \leq t} \|\mathbf{w}(\tau)\| \right).$$

Таким образом, система устойчива по состоянию \mathbf{x} при ограниченном входе \mathbf{w} . Это означает, что внешние входы, вводимые взаимодействием с подгруппой БПЛА самолетного типа, не вызовут нежелательных эффектов в работе системы.

Вышеизложенный анализ был проведен в обобщенном виде, поэтому выделим некоторые особенности, возникающие в случае использования конкретного варианта структуры взаимодействия. В случае децентрализованной структуры возмущение от самолетного ретранслятора проходит через несколько каскадов взаимодействия (цепочку квадрокоптеров), каждый из которых обладает своей динамикой. Это приводит к тому, что влияние возмущения на квадрокоптеры, находящиеся дальше по цепочке, дополнительно фильтруется. В централизованной структуре квадрокоптеры получают информацию напрямую от квадрокоптера-ретранслятора своей подгруппы, поэтому фильтрация возмущения происходит только один раз (динамикой данного ретранслятора). Следовательно, децентрализованная структура обладает лучшими фильтрующими свойствами по отношению к высокочастотным компонентам возмущения. В терминах устойчивости по входу-состоянию (ISS) это означает, что коэффициент усиления γ_{ISS} для децентрализованной структуры меньше, чем для централизованной, по крайней мере для тех компонент состояния, которые соответствуют квадрокоптерам в конце цепочки. Данный аспект объясняется взаимосвязью γ_{ISS} и \mathcal{H}_∞ -нормы системы:

$$\gamma_{ISS} \propto \|\mathbf{G}(s)\|_\infty = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \sigma_{\max} |\mathbf{G}(j\omega)|,$$

где $\mathbf{G}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}$, и матрица \mathbf{A} является гурвицевой [27]. Что касается гибридной структуры, то в ней топология взаимодействия такая же, как в централизованной, но из-за активного участия самолетного ретранслятора в построении формации его состояние изменяется более интенсивно, что эквивалентно увеличению амплитуды возмущения $\mathbf{w}(t)$. Поэтому, несмотря на одинаковые передаточные функции, итоговое возмущающее воздействие может оказаться более значительным.

Пусть возмущение $\mathbf{w}(t)$ содержит ограниченную переменную задержку $\tau(t) \leq \tau_{\max}$, то есть $\mathbf{w}(t) = \widehat{\mathbf{w}}(t - \tau(t))$. Система с запаздывающим входом получается композицией исходной ISS-системы (оператора $\mathbf{G} : \mathbf{w} \mapsto \mathbf{x}$) и оператора чистой задержки ($\Delta_\tau : \widehat{\mathbf{w}} \mapsto \mathbf{w}$). Поскольку оператор задержки не усиливает сигнал в \mathcal{L}_∞ -норме ($\|\Delta_\tau\|_\infty = 1$), из ISS-оценки для \mathbf{G} непосредственно следует ISS-оценка для композиции $\mathbf{G} \circ \Delta_\tau$ относительно исходного входа $\widehat{\mathbf{w}}$. Таким образом, ограниченные задержки в данном случае не нарушают ISS-устойчивость.

5. Сравнение централизованной, децентрализованной и гибридной структур

Для экспериментальной проверки структур взаимодействия, схемы которых показаны на рисунке 2, была создана в MATLAB/Simulink модель

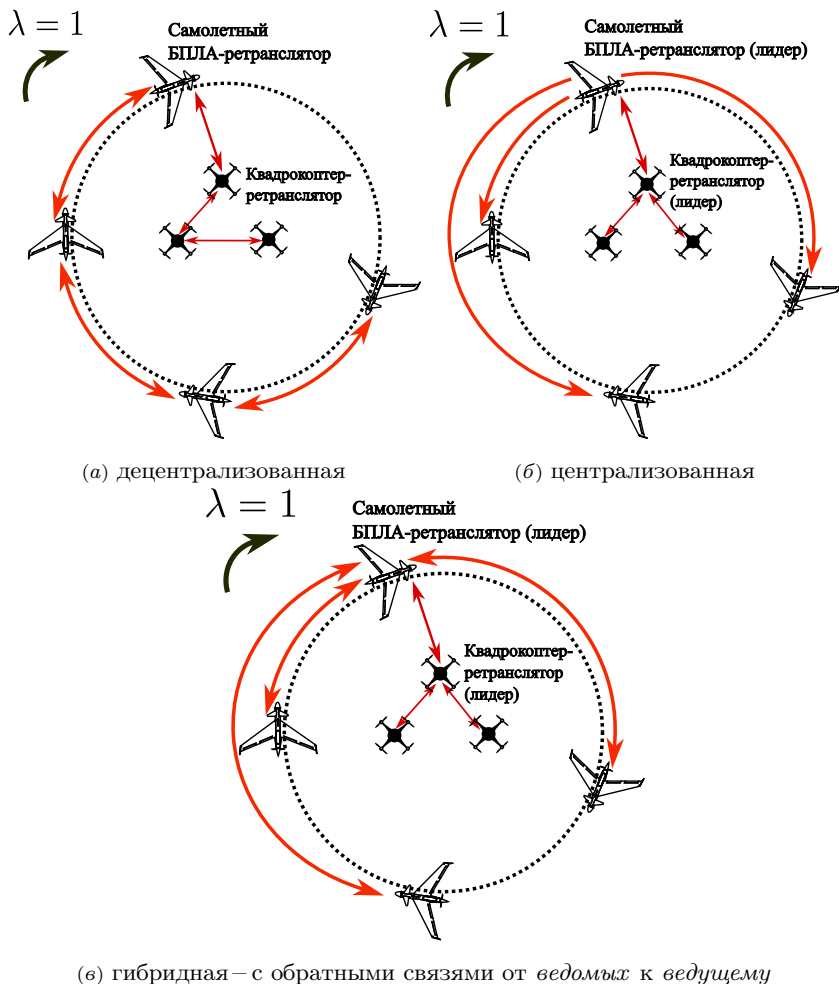


Рисунок 2. Структуры взаимодействия в гетерогенной группе гетерогенной группы БПЛА, фрагменты которой показаны на рисунках 3 и 4, а используемые параметры моделирования полета – в таблице 2.

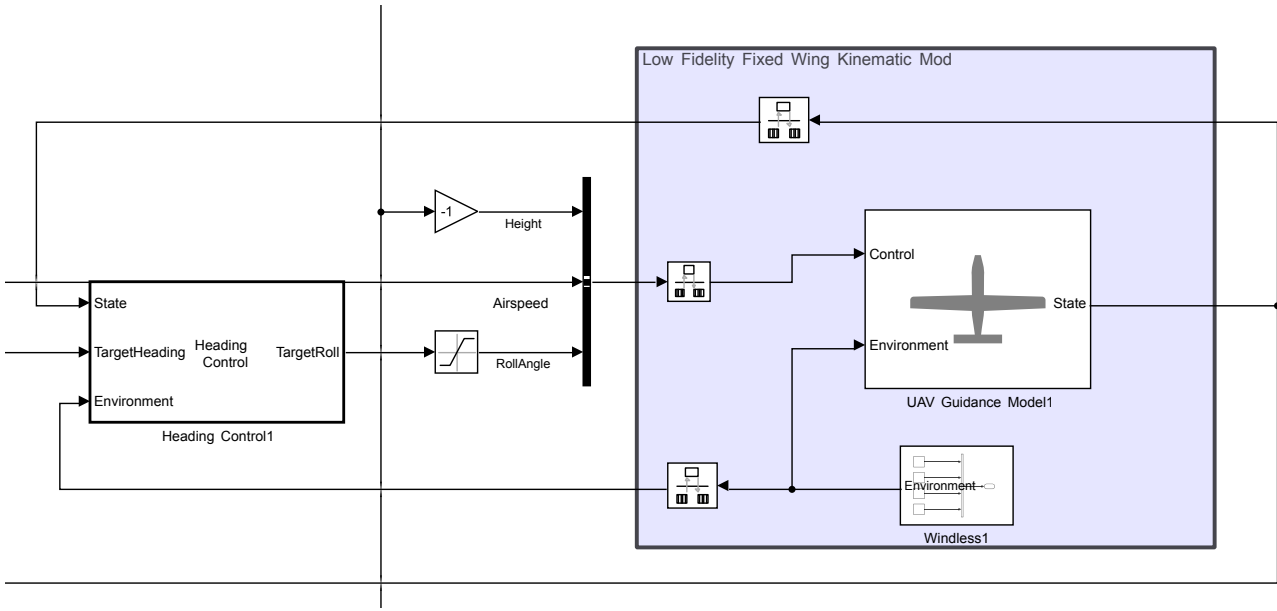


Рисунок 3. Фрагмент структурной модели в MATLAB/Simulink, описывающий конкретный БПЛА самолетного типа

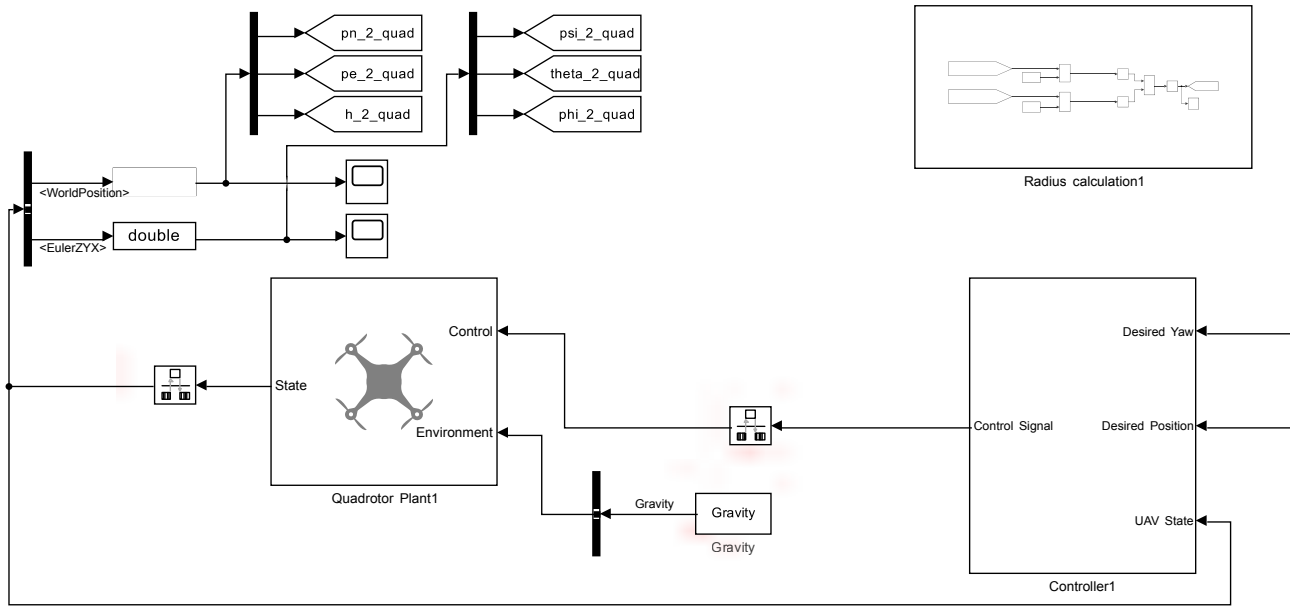


Рисунок 4. Часть структурной модели в MATLAB/Simulink, описывающая конкретный мультироторный БПЛА

ТАБЛИЦА 2. Параметры моделирования

Параметр	Значение
Начальные положения БПЛА самолетного типа, [м]	$\mathbf{x}_1^0 = [190 \ 920 \ 100]^T$, $\mathbf{x}_2^0 = [255 \ 250 \ 100]^T$, $\mathbf{x}_3^0 = [720 \ 145 \ 100]^T$, $\mathbf{x}_4^0 = [920 \ 770 \ 100]^T$
Начальные положения квадрокоптеров, [м]	$\mathbf{x}_{1Q}^0 = [430 \ 450 \ 100]^T$, $\mathbf{x}_{2Q}^0 = [420 \ 440 \ 100]^T$, $\mathbf{x}_{3Q}^0 = [410 \ 430 \ 100]^T$
Вектор начальных курсовых углов БПЛА самолетного типа, [рад]	$\chi^0 = [0 \ 0 \ 0]^T$
Вектор начальных скоростей БПЛА самолетного типа, [м/с]	$\mathbf{v}^0 = [13 \ 13 \ 13 \ 13]^T$
Финальная крейсерская скорость формации БПЛА самолетного типа, [м/с]	$v = 13$
Радиус круговой путевой линии, [м]	$\rho = 200$
Коэффициенты усиления	$k_\theta = 10, \quad k_o = 0.02$
Вектор желаемых углов сдвига фаз между БПЛА самолетного типа, [рад]	$\mathbf{P}_{\theta d} = \begin{bmatrix} \frac{3\pi}{2} & \frac{13\pi}{9} & \frac{29\pi}{18} \end{bmatrix}^T$
Задаваемый угол смещения фазового угла вращения для подгруппы квадрокоптеров, [рад]	$\Delta\varphi^R = \frac{\pi}{6}$
Задаваемое смещение по радиусу вращения между квадрокоптерами, [м]	$(\Delta_{12}, \Delta_{13}, \Delta_{32}) = (20, 35, 15)$
Задаваемое смещение по радиусу вращения между БПЛА-ретрансляторами, [м]	$\Delta_{fw,1} = 150$
Масса квадрокоптера, [кг]	$m = 0.1$
Ускорение свободного падения, [м/с ²]	$g = 9.81$
Коэффициенты усиления в контурах управления БПЛА самолетного типа	$k_h = k_{D\varphi} = 3.9, \quad k_\gamma = 39,$ $k_{v_a} = 1, \quad k_\chi = 0.39, \quad k_{P_\varphi} = 5.9414,$
Коэффициенты усиления в контурах управления квадрокоптером	$K_{P_\varphi} = K_{P_\theta} = 3402.97, \quad K_{P_\psi} = 1950$ $K_{D_\varphi} = K_{D_\theta} = 116.67, \quad K_{P_F} = 3900$
Минимальное и максимальное значение угла крена БПЛА самолетного типа, [рад]	$\varphi^{\min} = -\frac{\pi}{9}, \quad \varphi^{\max} = \frac{\pi}{9}$

В процессе моделирования вычисляются следующие метрики, которые служат для оценки эффективности работы алгоритмов управления.

Интегральная квадратичная путевая ошибка (рассогласование) I^{path} :

$$I^{path} = \int_{t_0}^T \sum_{i=1}^4 \left(e_i^{path} \right)^2 dt,$$

где t_0 – момент времени начала моделирования; T – момент времени завершения моделирования; e_i^{path} – путевая ошибка (рассогласование) i -го БПЛА (расстояние до заданной путевой линии).

Интегральная квадратичная угловая ошибка (рассогласование) I^{angle} :

$$I^{angle} = \int_{t_0}^T \sum_{i=1}^3 \left(e_i^{angle} \right)^2 dt,$$

где e_i^{angle} – угловая ошибка (рассогласование) i -го БПЛА (разница между желаемым и текущим углами сдвига фаз). Интегральное квадратичное управляющее воздействие по курсовому углу $I^{angleEffort}$ (затраты на управление по курсовому углу):

$$I^{angleEffort} = \int_{t_0}^T \sum_{i=1}^4 (\chi - \chi^c)^2 dt.$$

Интегральное квадратичное управляющее воздействие по скорости $I^{speedEffort}$ (затраты на управление по скорости):

$$I^{speedEffort} = \int_{t_0}^T \sum_{i=1}^4 (v_a - v_a^c)^2 dt.$$

Интегральные квадратичные координатные ошибки (рассогласования) для подгруппы квадрокоптеров по осям x_e, y_e, z_e соответственно:

$$I^{Qx} = \int_{t_0}^T \sum_{i=1}^3 \left(e_i^{Qx} \right)^2 dt$$

$$I^{Qy} = \int_{t_0}^T \sum_{i=1}^3 \left(e_i^{Qy} \right)^2 dt$$

$$I^{Qz} = \int_{t_0}^T \sum_{i=1}^3 \left(e_i^{Qz} \right)^2 dt.$$

Достаточно важным фактором работы и централизованных, и децентрализованных алгоритмов управления являются временные задержки [28]. В работе [29] для реализации обмена данными в круговой формации реальных БПЛА самолетного типа были использованы 900 МГц RF-модемы. Для такого типа модемов задержка обычно находится в диапазоне 10–100 мс. Эта задержка включает время на кодирование/

декодирование сигнала, передачу по радиоканалу и обработку данных. В работе [29] экспериментально было получено время задержки менее 30 мс. Поэтому данное время при моделировании было выбрано равным 30 мс, а время моделирования – равным 180 с. Задержка была введена в модели Simulink в каналы связи между БПЛА-ретранслятором самолетного типа и квадрокоптером-ретранслятором, а также между бортами в подгруппах.

6. Обсуждение результатов моделирования

6.1. Основные результаты

Централизованная структура взаимодействия по сравнению с децентрализованной приводит к значительно большей интегральной квадратичной угловой ошибке (35.7-39%). При наличии задержки в каналах взаимодействия для децентрализованной структуры происходит рост этой метрики на 2.8%, а при централизованной структуре – на 5.2%. Этот факт свидетельствует о меньшей чувствительности децентрализованных алгоритмов управления к наличию временных задержек.

Интегральная квадратичная путевая ошибка на 7.4% больше для централизованной структуры взаимодействия. Она не растет при введении временных задержек, что объясняется отсутствием учета взаимодействия между бортами в законе управления выхода на круговую путевую линию.

Затраты на управление по скорости существенно выше для децентрализованной структуры – главным образом объясняется тем, что БПЛА-ведущий не участвует в построении формации в случае централизованной структуры, то есть его скорость полета остается постоянной. Затраты на управление по курсовому углу незначительно выше для централизованной структуры, что обусловлено независимостью законов управления по выходу на путевую линию от взаимодействия между бортами.

Существенный рост затрат на управление в случае введения временных задержек определяется повышением колебательности переходных процессов в этом контуре управления. Снижение колебательности может быть достигнуто через уменьшение коэффициента усиления k_{θ} .

В таблице 3 сведены результаты моделирования. Окончательные траектории гетерогенной группы при различных структурах управления показаны на рисунках 5–7, а угловые рассогласования в подгруппе БПЛА самолетного типа и координатные рассогласования квадрокоптеров – на рисунках 8–10.

Таблица 3. Результаты моделирования

Задержка	Интегральная квадратичная ошибка					Затраты на управление (интегральное квадратичное управляющее воздействие)	
	путевая I^{path} , км	угловая I^{angle} , градусы	координатная квадрокоптеров			по курсовому углу $I^{\text{angleEffort}}$, рад/с	по скорости $I^{\text{speedEffort}}$, м/с ²
	I^{Qx} , км	I^{Qy} , км	I^{Qz} , мкм				
Децентрализованная структура							
0 мс	3421	184900	467.5	81.4	0.043	60.18	141.9
30 мс	3422	190100	467.9	81.7	0.048	60.19	256.6
Централизованная структура							
0 мс	3674	251000	294.6	137.3	0.036	62.46	81.5
30 мс	3675	264200	294.7	137.6	0.037	62.48	88.5
Гибридная структура							
0 мс	3597	114900	292.0	133.4	0.046	60.08	198.3
30 мс	3595	127900	291.6	133.8	0.049	60.09	456.4

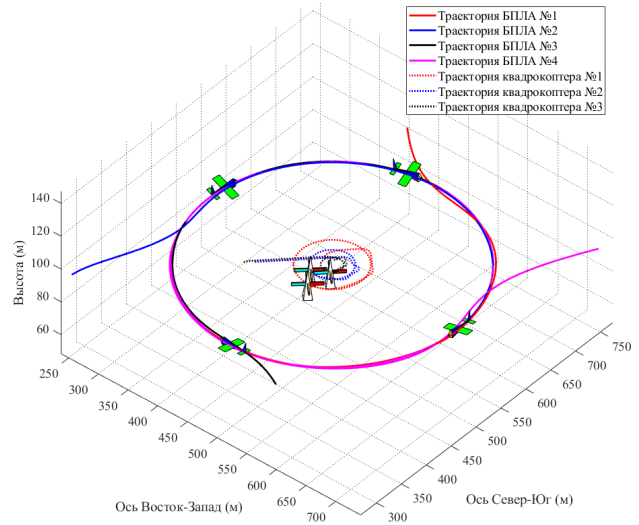
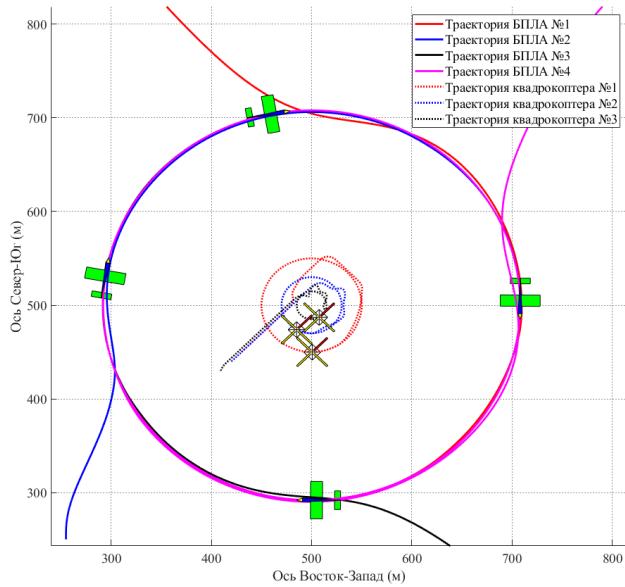


РИСУНОК 5. Окончательные траектории группы с децентрализованной структурой

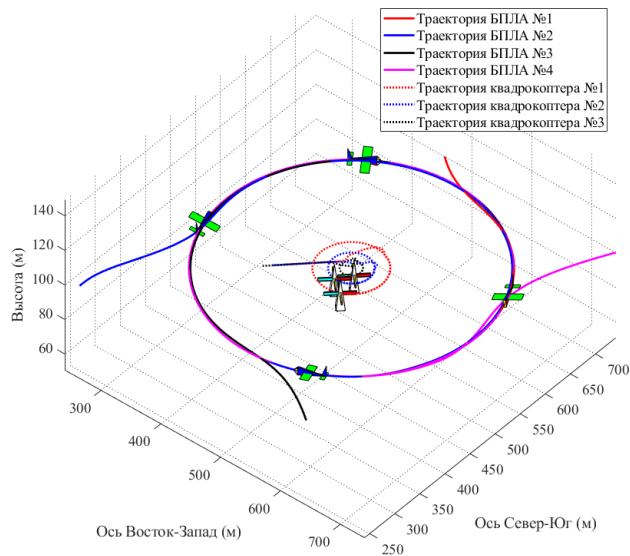
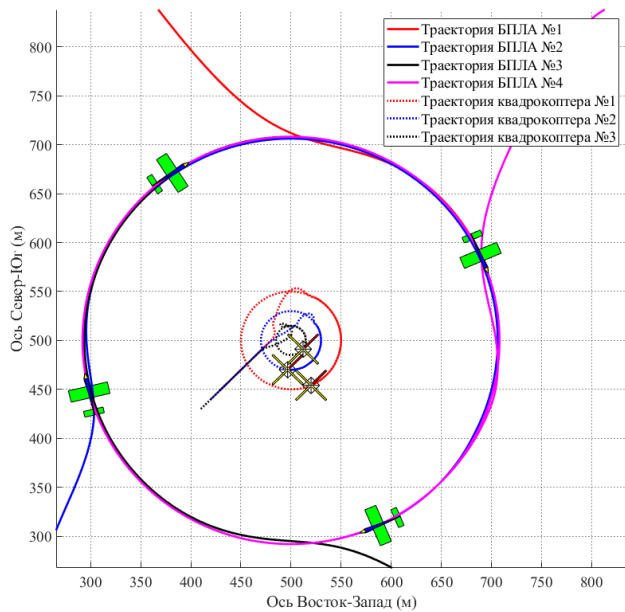


Рисунок 6. Окончательные траектории группы с централизованной структурой

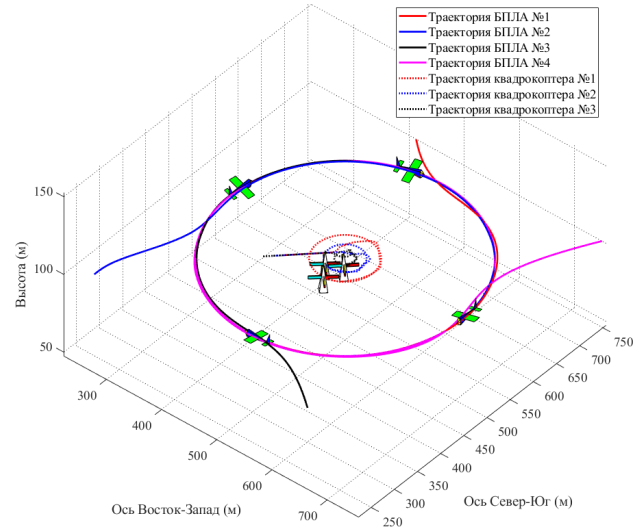
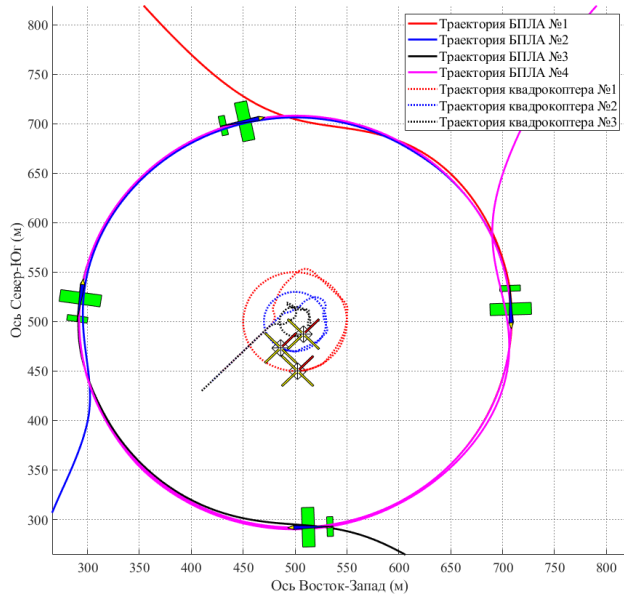
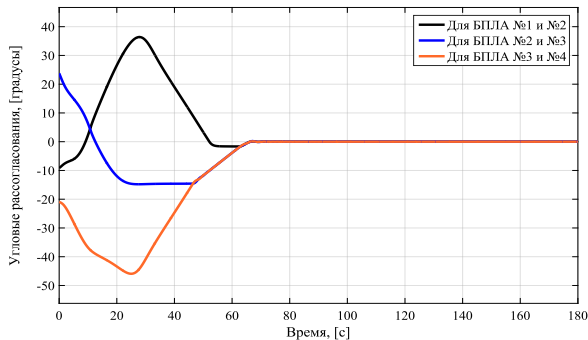
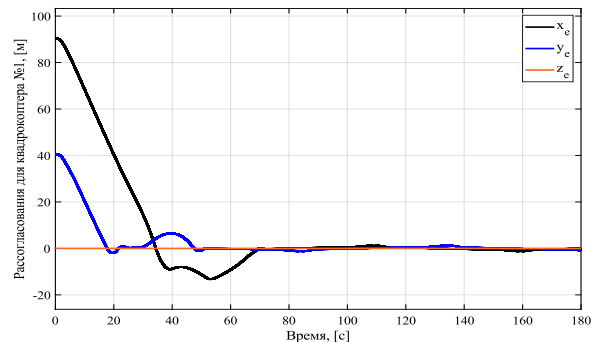


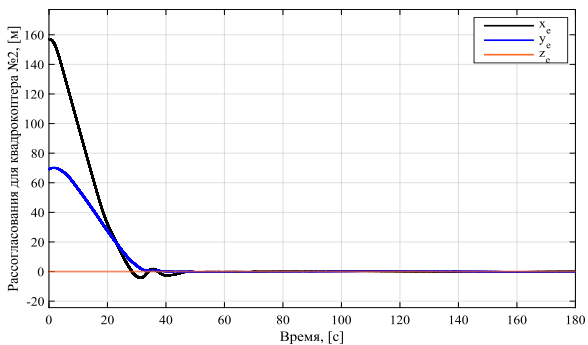
Рисунок 7. Окончательные траектории группы с гибридной структурой



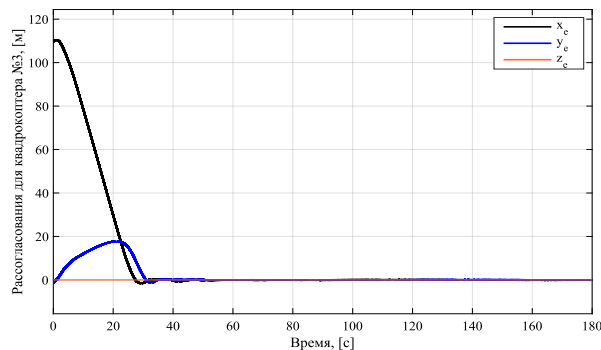
(а) Угловые в подгруппе БПЛА самолетного типа



(б) Координатные для первого квадрокоптера

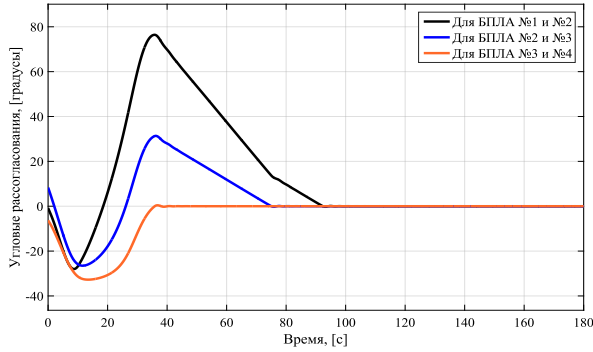


(в) Координатные для второго квадрокоптера

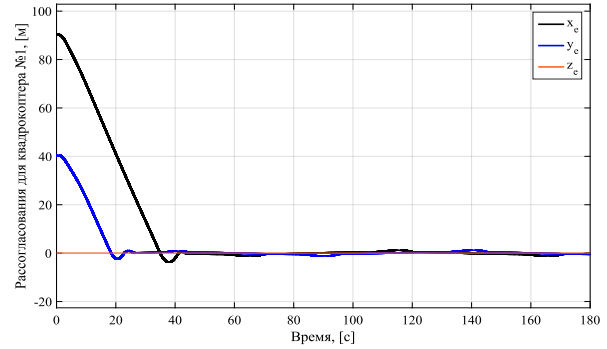


(г) Координатные для третьего квадрокоптера

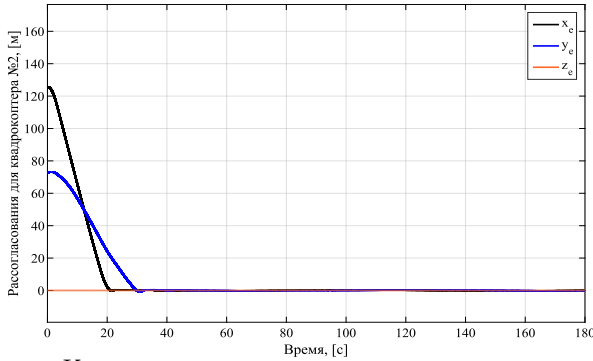
РИСУНОК 8. Рассогласования в случае децентрализованной структуры



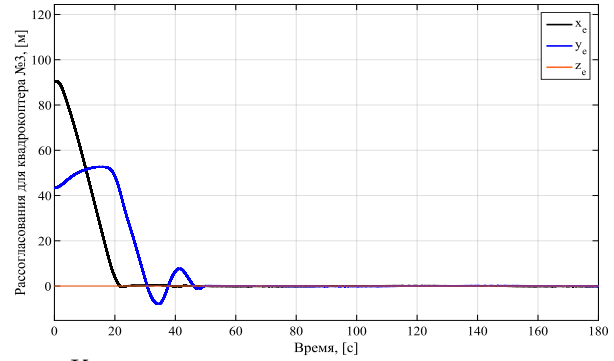
(а) Угловые в подгруппе БПЛА самолетного типа



(б) Координатные для первого квадрокоптера

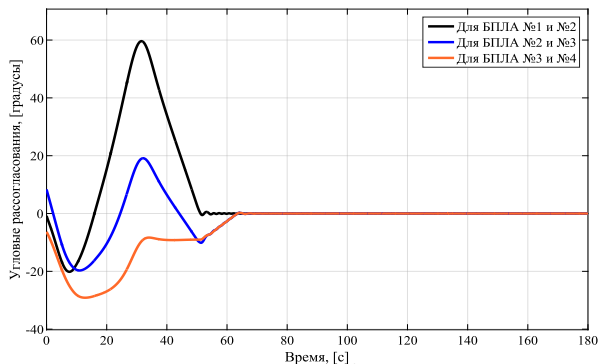


(в) Координатные для второго квадрокоптера

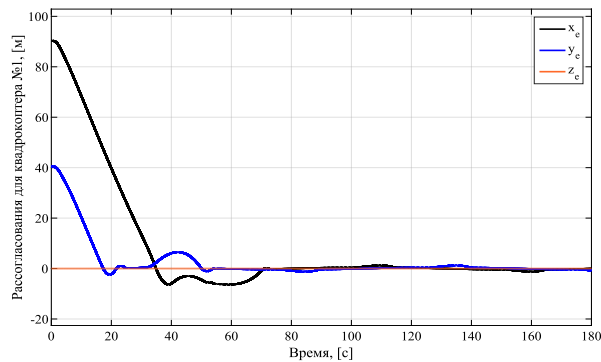


(г) Координатные для третьего квадрокоптера

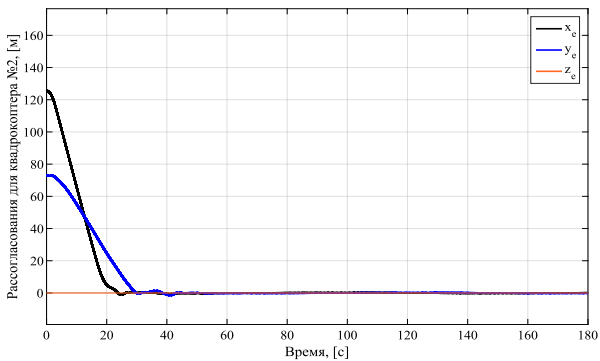
Рисунок 9. Рассогласования в случае централизованной структуры



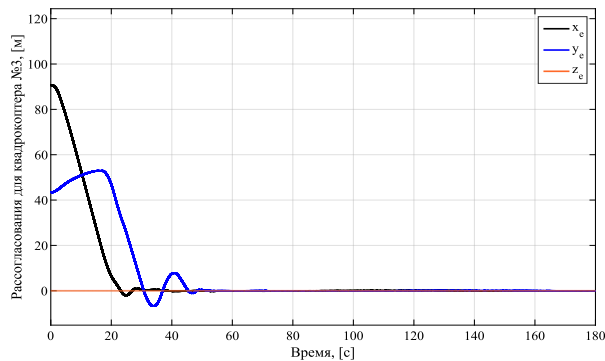
(а) Угловые в подгруппе БПЛА самолетного типа



(б) Координатные для первого квадрокоптера



(в) Координатные для второго квадрокоптера



(г) Координатные для третьего квадрокоптера

Рисунок 10. Рассогласования в случае гибридной структуры

Интегральные квадратичные координатные ошибки для подгруппы квадрокоптеров практически не меняются при введении временных задержек, что обосновано значительно более низкой динамикой их движения и значительно более высокой маневренностью.

При этом можно заметить, что по оси x_e данная метрика ощутимо выше ($\approx 59\%$) для децентрализованной структуры. Такое отличие обусловлено тем, что в случае децентрализованного взаимодействия БПЛА-ведущий самолетного типа участвует в построении формации и в значительной мере меняет скорость своего движения. Поэтому квадрокоптер-ретранслятор, подстраивающийся под этот борт, также вынужден в большей мере варьировать свою траекторию движения. В итоге остальные квадрокоптеры в подгруппе подстраиваются под квадрокоптер-ретранслятор и его переменчивое движение.

Однако, как можно заметить, интегральная квадратичная координатная ошибка по оси y_e существенно выше ($\approx 69\%$) уже для централизованной структуры. Понять причину такого отличия можно из графиков – основной вклад в эту метрику вносит третий квадрокоптер, движение которого обладает значительной колебательностью. Заметим, что данный третий БПЛА был наиболее удален от борта-ведущего.

В централизованной структуре третий квадрокоптер ориентируется по квадрокоптеру-ведущему, который не участвует в построении формации. В децентрализованной структуре третий борт ориентируется по второму, который в свою очередь взаимодействует с первым (*ведущим*) и третьим. Квадрокоптер-ведущий также вносит свой вклад в построение формации. В результате, из-за наличия обратной связи от *ведущего* и второго квадрокоптера, траектория движения третьего БПЛА становится плавной с быстрым выходом в требуемые координаты. Интегральная квадратичная координатная ошибка по оси z_e незначительна из-за того, что построение формации происходит в проекции на горизонтальную плоскость, поэтому высота полета сохраняется близкой к заданному значению.

Гибридная структура показывает наименьшее значение интегральной квадратичной угловой ошибки из трех выбранных вариантов структур. Однако наряду с этим сильно растут затраты на управление по скорости, особенно при введении временных задержек. Такой рост связан со значительным увеличением колебательности в контурах управления скоростью полета. Отметим также, что для гибридной структуры интегральная квадратичная путевая ошибка выше примерно на 5% по сравнению с децентрализованной структурой, что говорит о незначительном снижении скорости выхода на заданную путевую линию.

Что касается интегральных квадратичных координатных ошибок для подгруппы квадрокоптеров, то для гибридной структуры значения этой метрики сопоставимы с вариантом централизованной структуры по осям x_e (меньше примерно на 1%) и y_e (меньше примерно на 3%). Графики координатных ошибок существенно схожи с централизованным вариантом для второго и третьего квадрокоптеров (некоторые отличия в графиков все же есть). Графики для первого квадрокоптера ближе к графикам первого квадрокоптера в случае децентрализованной структуры, однако рассогласования все же значительно меньше для гибридного варианта. Такой характер графиков объясняется тем, что в случае гибридной структуры квадрокоптер-ретранслятор (*ведущий*) отслеживает угловое положение БПЛА-ретранслятора самолетного типа, который в свою очередь участвует в построении формации в своей подгруппе.

6.2. Анализ энергопотребления на основе имеющихся результатов моделирования и проверки устойчивости

Энергопотребление БПЛА напрямую связано с характером их движения: резкие изменения скорости, частые маневры и колебания траектории приводят к повышенным энергозатратам. В контексте данной работы ключевыми индикаторами, позволяющими косвенно оценить энергоэффективность, являются:

- Интегральные затраты на управление скоростью ($I_{speedEffort}$) – эта метрика отражает, насколько активно система управления изменяла скорость БПЛА относительно заданной. Для БПЛА самолетного типа потребляемая мощность в установившемся режиме приблизительно пропорциональна кубу скорости. Поэтому даже незначительные, но частые отклонения скорости от оптимального крейсерского значения могут существенно увеличивать энергопотребление всей группы.
- Интегральные затраты на управление курсом ($I_{angleEffort}$) – характеризует активность маневров по крену и курсу. Выполнение маневров требует создания дополнительной подъемной силы и преодоления возросшего лобового сопротивления, что также ведет к росту энергозатрат.
- Характер траекторий и ошибок координат – «неровные», колеблющиеся траектории, особенно для мультикоптеров, свидетельствуют о постоянных разгонах и торможениях. Для мультикоптера энергозатраты на такое движение значительно выше, чем на плавное перемещение или зависание.

Децентрализованная структура демонстрирует меньшие значения интегральной угловой ошибки (рассогласования) (I^{angle}) по сравнению с централизованной структурой, что говорит о быстром и точном построении формации с приемлемыми по длительности маневрами. Хотя затраты на управление по скорости ($I^{speedEffort}$) у этой структуры выше, чем у централизованной структуры без задержек, при введении задержки в 30 мс рост этого показателя не столь значителен, как у гибридной структуры. Это указывает на робастность и стабильность децентрализованного управления. Плавные траектории мультикоптеров с малыми колебаниями также свидетельствуют об энергоэффективном движении данной подгруппы. Можно сделать вывод, что децентрализованная структура обеспечивает наиболее сбалансированное и предсказуемое энергопотребление, особенно в условиях несовершенства каналов связи.

Централизованная структура имеет наибольшую угловую ошибку (рассогласование), что подразумевает более длительный и энергозатратный процесс построения формации. Вместе с тем затраты на управление скоростью у этой структуры заметно ниже в отсутствие задержек, так как *ведущий* не участвует в построении формации и летит с постоянной скоростью. Однако такое преимущество снижается при введении задержки: $I^{speedEffort}$ растет на 8.5%. Более того, для подгруппы мультикоптеров наблюдается выраженная колебательность траектории третьего БПЛА (рисунок 9г), что указывает на высокие энергозатраты данного квадрокоптера. Таким образом, централизованная структура может оказаться менее энергоэффективной в реальных условиях из-за возникновения траекторных колебаний у *ведомых* бортов.

Гибридная структура показывает наилучший результат по точности построения угловой формации (минимальное значение I^{angle}), что может соответствовать эффективному с энергетической точки зрения процессу выхода в заданный строй. Однако ключевым недостатком является крайне высокая чувствительность контура управления скоростью к задержкам: при введении задержки в 30 мс метрика $I^{speedEffort}$ возрастает в 2.3 раза (со 198.3 до 456.4). Столь значительные колебания скорости требуют от БПЛА самолетного типа постоянных режимов разгона и торможения, что, согласно кубической зависимости мощности от скорости, приводит к значительному росту энергопотребления этой подгруппы. С энергетической точки зрения гибридная структура в условиях реальных задержек связи представляется наименее эффективной.

На основе косвенных метрик, представленных в работе, можно утверждать, что децентрализованная структура взаимодействия обладает наибольшим потенциалом энергоэффективности для одновременных

автономных миссий гетерогенного роя. Преимущества данной структуры в виде малой чувствительности к задержкам связи, плавности траекторий и отсутствия значительного роста управляющих усилий делают потребление энергии более предсказуемым по сравнению с централизованным и, особенно, гибридным подходами. Этот качественный вывод хорошо согласуется с общими преимуществами децентрализованных систем, отмеченными в статье, и добавляет важный практический аспект их сравнения с другими решениями.

Выводы

В статье представлен предварительный анализ структур взаимодействия в гетерогенной (разнородной) группе БПЛА в отличие от предыдущих работ [24, 25], где изучались однородные системы. Для предложенной разнородной группы БПЛА проведен анализ устойчивости системы по входу-состоянию (Input-to-State Stability – ISS), установивший сохранение данного типа устойчивости. По результатам моделирования было выявлено, что, несмотря на более высокую структурную сложность, децентрализованное управление имеет ряд преимуществ:













- более высокую точность и скорость выхода в заданную формацию;
- меньшая чувствительность к задержкам в каналах связи;
- меньшая склонность бортов, более удаленных от БПЛА-ретранслятора (*ведущего*), к возникновению траекторных колебаний со значительной амплитудой.

Гибридная структура имеет как преимущества, так и недостатки:








- наименьшее значение интегральной квадратичной угловой ошибки (рассогласования), что указывает на более высокую скорость и точность построения формации по угловым положениям;
- некоторое снижение скорости и точности выхода группы на заданную путевую линию по сравнению с децентрализованной структурой;
- крайне высокая чувствительность контура группового управления скоростью полета к задержкам в каналах связи.

Отметим, что выбор именно децентрализованной структуры обуславливается также измерительным оборудованием, используемым для реализации полета группы. Здесь имеет значение, какие параметры относительного положения бортов применяются в законах управления. Данное исследование содержит ограничение: моделирование строится на одном наборе начальных условий, однако проведенный перед этим анализ устойчивости обосновывает такой выбор.

Список использованных источников

- [1] Кутахов В. П., Мещеряков Р. В. *Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта* // Проблемы управления.– 2022.– № 1.– С. 67–74.  [↑44](#)
- [2] Фролов О. В., Сафин Р. Н., Цой Т. Г., Мартинез-Гарсия Э. А., Магид Е. А. *Управление роем беспилотных летательных аппаратов для мониторинга открытой местности при поисково-спасательных операциях* // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки.– 2025.– Т. 167.– № 4.– С. 786–805 (на англ.).  [↑44](#)
- [3] Гейс Э. А., Морозов О. О., Козырь А. В., Ефромеев А. Г. *Методика синтеза регулятора мультикоптера, функционирующего в качестве агента роевой системы по методу квазитеплового движения* // Мехатроника, автоматизация, управление.– 2024.– Т. 25.– № 1.– С. 43–52.  [↑44](#)
- [4] Бойко А. М., Гиргидов Р. А. *Ключевые особенности алгоритмов формирования роя автономных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в условиях отсутствия ГНСС и устойчивой радиосвязи* // Робототехника и техническая кибернетика.– 2022.– Т. 10.– № 1.– С. 25–31.  [↑44](#)
- [5] Саенко И. Б., Митяков Е. С., Лаута О. С., Соколов А. П. *Алгоритм роевого управления БПЛА с элементами кластерного анализа* // Информация и космос.– 2024.– № 4.– С. 68–75.  [↑44](#)
- [6] Abaunza H., Castillo P., Drakunov S. V. *Quadrotor fleet autonomous navigation: fusing virtual points control and nonlinear potential fields* // IEEE Trans. Control Syst. Technol.– 2025.– Т. 33.– № 3.– С. 903–914.  [↑44](#)
- [7] Bui D.-N., Phung M. D. *Radial basis function neural networks for formation control of unmanned aerial vehicles* // Robotica.– 2024.– Т. 42.– № 6.– С. 1842–1860.  [↑44](#)
- [8] Riboldi C. E. D., Tomasoni M. *Formation flight of fixed-wing UAVs: dynamic modeling, guidance design, and testing in realistic scenarios* // Aerospace.– 2025.– Т. 12.– № 3.– ид. 260.– 49 с.  [↑44](#)
- [9] Серов В. А., Трубиенко О. В. *Гибридная модель формирования коалиций в сетевых системах группового управления* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение.– 2025.– № 1(150).– С. 137–161.  [↑44](#)
- [10] Xu X., Xie Ch., Ma L., Yang L., Zhang T. *Multi-objective evolutionary algorithm with two balancing mechanisms for heterogeneous UAV swarm path planning* // Appl. Soft Comput.– 2025.– Т. 173.– ид. 112927.  [↑44](#)
- [11] Ghaderi F., Toloei A., Ghasemi R. *NMPC formation control for heterogeneous multi-air vehicles with obstacle avoidance and connectivity maintenance* // Intell. Serv. Robot.– 2025.– Т. 18.– № 1.– С. 27–41.  [↑44](#)
- [12] Caballero A., Roman-Escorza F. J., Maza I., Ollero A. *Multi-UAV approach for fast inspection of overhead power lines: from route planning to field operation* // J. Intell. Robot. Syst.– 2025.– Т. 111.– № 2.– ид. 67.– 21 с.  [↑44](#)

- [13] Saffre F., Karvonen H., Hildmann H. *The why and how of polymorphic artificial autonomous swarms* // Drones.– 2025.– Т. 9.– № 1.– С. 53. doi ↑44, 46, 47
- [14] Абросимов В. К., Михайлова Е. С. *Классификация прецедентов группового управления* // Информационно-управляющие системы.– 2025.– № 2(135).– С. 27–36. doi URL ↑44
- [15] Пантенков Д. Г. *Оптимизация централизованного, иерархического и ведущего управлений оператором группы распределенных беспилотных летательных аппаратов* // Полет. Общероссийский научно-технический журнал.– 2022.– № 8–9.– С. 40–62. * ↑46
- [16] Mukhamediev R. I., Yakunin K., Aubakirov M., Assanov I., Kuchin Y. , Symagulov A. *Coverage path planning optimization of heterogeneous UAVs group for precision agriculture* // IEEE Access.– 2023.– Т. 11.– С. 5789–5803. doi ↑46
- [17] Подвесовский А. Г., Филонов А. А., Венец В. И., Настас Г. Н., Захарова А. А. *Модель принятия решений для задачи реконфигурации гетерогенной группы взаимодействующих объектов киберфизической системы* // Управление большими системами.– 2025.– № 113.– С. 346–379. URL □ ↑46
- [18] Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Антонов В. О., Сакольчик А. В. *Распределение задач в кластеризованном поле целей для гомогенных и гетерогенных групп БПЛА* // Робототехника и техническая кибернетика.– 2023.– Т. 11.– № 2.– С. 99–109. doi ↑46
- [19] Казаков Л. Н., Кубышкин Е. П., Палей Д. Э. *Построение оптимальной схемы информационного обмена системы адаптивного управления движением группы беспилотных летательных аппаратов* // Моделирование и анализ информационных систем.– 2023.– Т. 30.– № 1.– С. 16–26. doi ↑46
- [20] Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю. *Сравнительный анализ централизованного и децентрализованного алгоритмов движения строем БЛА мультикоптерного типа* // Известия ЮФУ. Технические науки.– 2022.– № 1(225).– С. 121–139. doi ↑46
- [21] Фомичев А. А., Сидоров А. А. *Самоорганизующийся и самоуправляемый рой БПЛА и способ контроля территории на наличие установленного события посредством такого роя*, Патент № 2805431 С1 Российская Федерация, МПК G08G 5/00, G05D 1/10, B64C 39/00. № 2022135382 : заявл. 30.12.2022 : опубл. 16.10.2023.– 2023.– 12 с. URL ↑46, 47, 48, 49
- [22] Beard R. W., McLain T. W. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice.*– Princeton and Oxford: Princeton University Press.– 2012.– ISBN 978-0-691-14921-9.– 320 с. ↑51
- [23] Mellinger D., Michael N., Kumar V. *Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors* // Int. J. Rob. Res.– 2012.– Т. 31.– № 5.– С. 664–674. doi ↑52

- [24] Муслимов Т. З., Мунасыпов Р. А. *Децентрализованное управление круговыми формациями беспилотных летательных аппаратов на основе метода векторного поля* // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета.– 2019.– Т. **23**.– № 3(85).– С. 112–121.   ↑53, 54, 56, 59, 79
- [25] Muslimov T. Z., Munasyrov R. A. *Consensus-based cooperative circular formation control strategy for multi-UAV system* // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (Sochi, Russia, 08–14 September 2019).– IEEE.– 2019.– ISBN 978-1-7281-0265-8.– С. 1–8.  ↑53, 54, 56, 59, 79
- [26] Муслимов Т. З. *Методы и алгоритмы группового управления беспилотными летательными аппаратами самолетного типа* // Системная инженерия и информационные технологии.– 2024.– Т. **6**.– № 1(16).– С. 3–15.  ↑53
- [27] Khalil H. K. *Nonlinear Control*, third ed.– Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.– 2015.– ISBN 0-13-067389-7.– 767 с.  ↑62
- [28] Александров А. Ю., Рузин С. Б. *Децентрализованные алгоритмы управления группой мобильных агентов на прямой при распределенном коммуникационном запаздывании* // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления.– 2025.– Т. **21**.– № 1.– С. 139–150.  ↑67
- [29] Kim S., Cho H., Jung D. *Circular formation guidance of fixed-wing UAVs using mesh network* // IEEE Access.– 2022.– Т. **10**.– С. 115295–115306.  ↑67, 68

Поступила в редакцию	23.09.2025;
одобрена после рецензирования	18.03.2026;
принята к публикации	01.04.2026;
опубликована онлайн	18.04.2026.

Рекомендовал к публикации

к.т.н. В. П. Фраленко


Информация об авторе:



Foto by T. Muslimov, CC-BY-SA

Тагир Забирович Муслимов

кандидат технических наук, научный сотрудник Университета ИТМО, доцент УУНиТ. Область научных интересов: робототехника, теория управления, беспилотные летательные аппараты, роевое и групповое управление автономными роботами.

 0000-0002-9264-529X

e-mail: tagir.muslimov@gmail.com

Декларация об отсутствии личной заинтересованности: *благополучие автора не зависит от результатов исследования.*