

На правах рукописи

УДК 681.5.01

Галустян Нарек Каренович

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ КВАДРОКОПТЕРОВ

Специальность 05.02.05

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2017

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

Научный руководитель: **Зенкевич Станислав Леонидович**,
доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехнических систем и мехатроники ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана».

Официальные оппоненты: **Ермолов Сергей Михайлович**,
доктор технических наук, доцент, профессор РАН, профессор кафедры робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Романов Алексей Михайлович,
кандидат технических наук, доцент кафедры проблем управления Института кибернетики ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (МИРЭА).

Ведущая организация: ФГУ «Федеральный исследовательский центр Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Защита состоится 21 марта 2017 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, д.10, ауд. 613м.

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

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземпляре, заверенный печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент

И.В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Работа посвящена актуальной задаче децентрализованного управления мультиагентной системой (МАС), состоящей из автономных агентов – квадрокоптеров, с целью коллективного движения в двух режимах: строевом, подразумевающим сохранение заданной геометрической топологии группы с двухуровневой иерархией, и роевом, предполагающим хаотичное стайное движение.

Растущая популярность мультикоптеров в классе мини-БПЛА объясняется достоинствами этих винтокрылых аппаратов. Обладая всеми преимуществами летательных аппаратов вертолетного типа, мультикоптеры, в отличии от вертолетов, имеют простой и экономичный механизм с фиксированными осями пропеллеров, не требующий сложного технического обслуживания. Прогрессирующая популярность наглядно подтверждает глобальный рост рынка БПЛА. Во многом это обусловлено стремительным ростом 22% в год сегмента мультикоптеров за счет расширения областей применения, в первую очередь в гражданском секторе. Сегодня, мультикоптеры активно используются в кинопроизводстве и аэрофотосъемке, в инспекции инфраструктурных объектов, в сельском хозяйстве. В качестве примера коммерческого применения можно отметить процесс доставки мультикоптерами малогабаритных грузов до клиентов компанией Amazon.

Идея создания МАС на базе мультикоптеров начала развиваться совсем недавно и имеет перспективы для широкого применения. В сравнении с одиночным квадрокоптером, МАС, состоящая из группы квадрокоптеров, имеет расширенное знание окружающей среды за счет коммуникации внутри группы, повышенную надежность за счет взаимозаменяемости агентов, и способность коллективно быстрее выполнять более сложные задачи. Указанные преимущества явно выражаются в задачах мониторинга и аэросъемки (например, в обследовании сельскохозяйственных площадей).

В мировой литературе большое количество трудов, посвященных управлению одиночным квадрокоптером. Одним из таких работ является статья по управлению параметрами полета квадрокоптера при заданной траектории научных сотрудников из ИАиЭ СО РАН в Новосибирске.

Тем не менее, можно отметить лишь несколько работ, направленных на создание и апробацию способов группового управления летающими агентами в трехмерном пространстве. Например, в НИИ МВС ЮФУ решили задачу формирования целевого строя произвольной геометрической топологии группы квадрокоптеров. Исследователи из ВМК МГУ привнесли значительный вклад в развитие общих принципов децентрализованного управления. Другими ключевыми российскими организациями, вносящими вклад в развитие методов управления мультиагентными системами, являются: МГТУ им. Баумана, ЦНИИ РТК, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГТУ «Станкин», МИРЭА. В Университете Пенсильвании США была реализована и апробирована система централизованного управления группой из 20 квадрокоптеров. Научные

сотрудники из Будапештского Университета разработали алгоритм децентрализованного управления группой квадрокоптеров на базе правил К. Рейнольдса и существующих систем управления скоростью движения квадрокоптера, и создали MAC из десяти автономных квадрокоптеров, способных выполнять реальные коллективные задачи. В Стенфордском Университете создан и апробирован алгоритм управления квадрокоптером в MAC, построенный на базе решения задачи о переговорах Дж. Ф. Нэша.

Анализ литературы выявил крайне ограниченный список работ, посвященных децентрализованному управлению группой квадрокоптеров, а также отсутствие методов, позволяющих в ходе движения менять лидера и режим полета между строевым и роевым движением группы.

Резюмируя, децентрализованное управление квадрокоптерами в MAC является новым этапом развития систем управления мультикоптерами, и в силу новизны задачи, востребованности в практическом применении и ограниченности научных работ на эту тему, является актуальной проблемой.

Цели и задачи

Целью диссертационной работы является разработка способов децентрализованного управления группой автономных квадрокоптеров для роевого и строевого движения.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Вывод уравнения движения квадрокоптера.
2. Разработка алгоритмов управления движением одиночного квадрокоптера по скорости и по траектории.
3. Исследование алгоритмов управления мультиагентными системами и выработка критериев согласованного и безопасного движения группы квадрокоптеров.
4. Решение кинематической и динамической задачи группового управления MAC в плоскости.
5. Разработка способа децентрализованного управления квадрокоптерами в мультиагентной системе в трехмерном пространстве.
6. Создание модели системы управления и среды моделирования.
7. Проведение компьютерного моделирования коллективного движения десяти квадрокоптеров с независимыми системами управления для проверки работоспособности разработанных алгоритмов и способов управления. В частности, апробация способа управления в задаче картирования сельскохозяйственных площадей группой квадрокоптеров. Анализ результатов исследований на соответствие критериям согласованного и безопасного коллективного движения.

Методы исследования

Поставленные задачи были решены на базе классических методов теории автоматического управления, алгебры С. Ли и методов управления мультиагентными системами. Верификация математической модели движения квадрокоптера, проверка работоспособности алгоритма управления по

скорости, алгоритма управления по траектории и способа децентрализованного управления в МАС реализованы средствами компьютерного моделирования. Оценка производилась на основе результатов экспериментов, а также с помощью симуляции среды моделирования.

Научная новизна

Заключается в следующем:

1. Разработан способ децентрализованного управления квадрокоптером в мультиагентной системе на базе модифицированных правил Рейнольдса, позволяющий в ходе коллективного движения менять лидера и режим полета между строевым движением и роевым движением.
2. Предложена система критериев, определяющих качество коллективного движения группы квадрокоптеров.
3. Разработан метод управления одиночным квадрокоптером, сочетающий управление по скорости и управление по траектории.

Практическая ценность.

В настоящее время интерес к мультикоптерным МАС проявляют организации, работающие в отрасли сельского хозяйства и энергетики, спасательные службы и силовые органы для выполнения задач мониторинга, аэрофотосъемок, грузоперевозок, патрулирования, а также поисково-спасательных работ. Выполнение подобных задач на расстояниях десятки тысяч гектар с/х посевов, лесных массивов, энергетической или городской инфраструктуры требует согласованной работы группы автономных летающих агентов. При спасательных работах и задач патрулирования границ нужна высокая надежность, что может быть обеспечено взаимозаменяемостью агентов. Данная работа имеет научную значимость в теории управления МАС благодаря разработанным новым подходам к децентрализованному управлению и прикладную значимость, поскольку может лечь в основу систем управления автономными квадрокоптерами для решения перечисленных задач. В качестве примера практического применения способа группового управления, была решена задача картирования с/х площадей группой квадрокоптеров.

Основные положения. На защиту выносятся:

1. Алгоритмы управления одиночным квадрокоптером по скорости и по траектории.
2. Методы кинематического и динамического управления МАС для строевого и роевого движения в двумерном пространстве.
3. Способ децентрализованного управления квадрокоптером в мультиагентной системе на базе модифицированных правил К. Рейнольдса для полета в строевом и роевом режиме в трехмерном пространстве.
4. Модель системы управления квадрокоптером и масштабируемая среда моделирования.
5. Результаты моделирования, подтверждающие работоспособность разработанных алгоритмов и методов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и научных семинарах:

1. Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2012);
2. Научная конференция для студентов, молодых ученых и аспирантов МГТУ им. Н. Э. Баумана, посвященная 100-летию Е. П. Попова (Москва, 2014);
3. Научные семинары кафедры «Роботы и робототехнические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012–2016 гг.

Публикации. Результаты диссертационной работы нашли отражение в 4 научных статьях, в том числе 3 публикациях в изданиях из перечня ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Объем работы составляет 124 печатных страниц (включая 16 страниц приложений), 66 рисунков, 5 таблиц. Библиография содержит 71 наименование, из них 46 иностранных источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены принцип полета и функциональная схема квадрокоптера, включая основные составные части, в том числе датчики для связи между агентами. Проведен обзор существующих решений в области управления одиночным квадрокоптером и в области управления группой квадрокоптеров с оценкой их достоинств и недостатков. Рассмотрены исследуемые режимы полета и стратегии управления MAC, состоящей из квадрокоптеров. Приведены современные способы мониторинга с/х площадей и проиллюстрирована возможность улучшения процесса мониторинга с помощью картирования с/х посевов (получения и склеивания NDVI снимков для анализа растительного покрова на основе вегетативного индекса) группой автономных квадрокоптеров, оснащенных специализированными камерами. Заканчивается глава конкретизацией задачи исследования.

Вторая глава посвящена алгоритмам управления одиночным квадрокоптером. Рассмотрен вывод уравнений движения квадрокоптера, приведены результаты синтеза алгоритма управления движением квадрокоптера по скорости и по траектории на основе методов классической теории автоматического управления и алгебры Ли.

Движение квадрокоптера рассматривается в двух системах координат: абсолютной системе координат (СК), связанной с землей, и подвижной системой координат (ПСК), связанной с квадрокоптером (Рис. 1). Начало координат ПСК совпадает с центром масс квадрокоптера. В движении

квадрокоптера учитываются 12 параметров: $[\phi, \theta, \psi]$ – углы ориентации; $\Omega = [p \ q \ r]^T$ – вектор угловой скорости (проекции на оси ПСК); $\mathbf{r} = [x \ y \ z]^T$ – вектор положения центра масс квадрокоптера; $\dot{\mathbf{r}} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T$ – вектор линейной скорости.

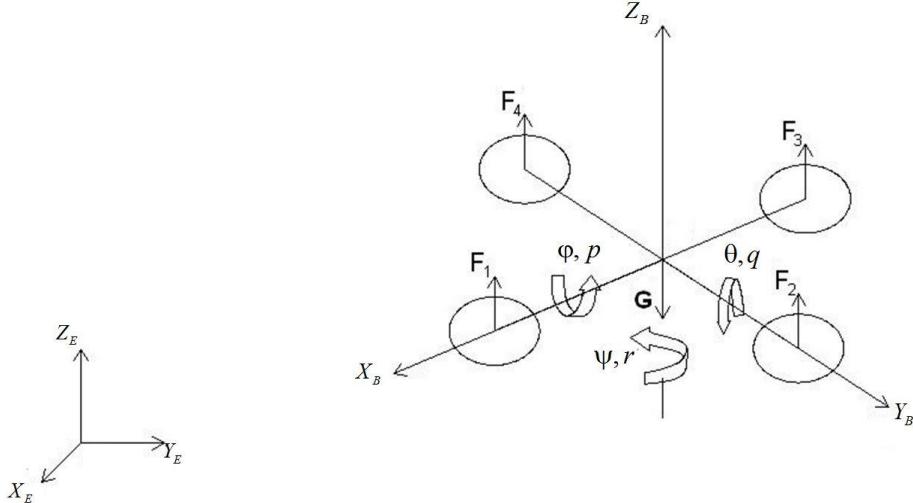


Рис.1. Системы координат и силы, действующие на квадрокоптер

Матрица поворота \mathbf{R}_{BE} между ПСК и абсолютной СК имеет вид:

$$\mathbf{R}_{BE} = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\phi s_\theta - c_\phi s_\psi & s_\phi s_\psi + c_\phi c_\psi s_\theta \\ c_\theta s_\psi & c_\phi c_\psi + s_\phi s_\psi s_\theta & c_\phi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\phi c_\theta \end{bmatrix},$$

где, для компактности, используются следующие обозначения:
 $\sin \alpha = s_\alpha$, $\cos \alpha = c_\alpha$, $\alpha \in \{\phi, \theta, \psi\}$.

Пропеллеры квадрокоптера вращаются со скоростью ω_i , где $i \in \{1, 2, 3, 4\}$. При вращении пропеллеров возникают подъемные силы F_i и моменты M_i (аналогично несущему винту вертолета), вращающие квадрокоптер вокруг собственной оси (Рис. 1):

$$F_i = K_F \omega_i^2, \quad M_i = K_M \omega_i^2,$$

где K_F и K_M – константы. Система сил и моментов приведена к главному вектору и главному моменту:

$$\begin{bmatrix} F_{Z_B} \\ M_{X_B} \\ M_{Y_B} \\ M_{Z_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_F & K_F & K_F & K_F \\ 0 & K_F L & 0 & -K_F L \\ -K_F L & 0 & K_F L & 0 \\ K_M & -K_M & K_M & -K_M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix},$$

где L – расстояние между центром масс и осями пропеллеров. В работе в качестве допущения при синтезе системы управления принимается, что угловые скорости вращения пропеллеров можно изменять моментально, пренебрегая динамикой привода с пропеллером. Такое допущение находится в соответствии с работами других авторов и связано с тем, что динамические

изменения привода и пропеллера происходят значительно быстрее в сравнении с изменениями в динамике движения квадрокоптера. Таким образом, управление осуществляется с помощью четырех силомоментных параметров:

$$\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T = [F_{Z_B} \ M_{X_B} \ M_{Y_B} \ M_{Z_B}]^T. \quad (1)$$

Некоторые аэродинамические эффекты не учтены в силу их незначительного воздействия при невысоких скоростях полета: изменение подъемной силы за счет дополнительного набегающего воздуха при полете квадрокоптера; изменение вектора подъемных сил за счет эффекта биения лопастей; сопротивление воздуха; ветер; гироскопический момент; эффект земли при посадке и взлете.

Система уравнений движения получается из совокупности второго закона Ньютона, уравнения, устанавливающего взаимосвязь вектора угловой скорости с матрицей поворота, и уравнения Эйлера:

$$\begin{cases} m[\ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z}]^T = \mathbf{R}_{BE} [0 \ 0 \ u_1]^T + [0 \ 0 \ -mg]^T \\ \hat{\Omega} = \dot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R}^T \\ \mathbf{I}_B \dot{\Omega}_B = -\Omega_B \times \mathbf{I}_B \Omega_B + [u_2 \ u_3 \ u_4]^T \end{cases}, \quad (2)$$

где m – масса квадрокоптера, g – ускорение свободного падения, \mathbf{I}_B – тензор момента инерции, Ω_B – вектор угловой скорости в ПСК, $\dot{\Omega}_B$ – относительная производная вектора угловой скорости (производная в ПСК), $\hat{}$ – оператор перевода \mathbb{R}^3 в кососимметрическую матрицу. Система уравнений движения в скалярном виде будет следующей:

$$\begin{cases} \ddot{x} = (1/m) \cdot u_1 \cdot (s_\phi s_\psi + c_\phi c_\psi s_\theta) \\ \ddot{y} = (1/m) \cdot u_1 \cdot (c_\phi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\phi) \\ \ddot{z} = (1/m) \cdot u_1 \cdot (c_\phi c_\theta) - g \\ \dot{\phi} = p + (s_\phi \cdot \operatorname{tg}\theta) \cdot q + (c_\phi \cdot \operatorname{tg}\theta) \cdot r \\ \dot{\theta} = (c_\phi) \cdot q + (-s_\phi) \cdot r \\ \dot{\psi} = (s_\phi / c_\theta) \cdot q + (c_\phi / c_\theta) \cdot r \\ \dot{p} = (u_2 - qr \cdot (I_{zz} - I_{yy})) / I_{xx} \\ \dot{q} = (u_3 + pr \cdot (I_{zz} - I_{xx})) / I_{yy} \\ \dot{r} = u_4 / I_{zz} \end{cases}, \quad (3)$$

где I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} – осевые моменты инерции. Область действия динамической модели ограничена при угловых ориентациях, когда $\theta = \pi/2 + \pi k$, где $k \in \mathbb{Z}$.

После вывода уравнений движения была решена задача управления квадрокоптером по траектории. В общем случае, траектория задается четырьмя параметрами – три координаты положения квадрокоптера и угол поворота относительно вертикальной оси: $[\mathbf{r}_T(t), \psi_T(t)] = [x_T(t), y_T(t), z_T(t), \psi_T(t)]$.

Система управления объединяет три уровня:

Первый – управление положением. В этом блоке на основе обратных связей ПД регулятора определяются ошибки по положению и по скорости для расчета программных (желаемых на текущий момент) ускорений:

$$\begin{cases} \mathbf{e}_p = \mathbf{r} - \mathbf{r}_T \\ \mathbf{e}_v = \dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_T \\ \ddot{\mathbf{r}}_d = \ddot{\mathbf{r}}_T - \mathbf{K}_p \mathbf{e}_p - \mathbf{K}_d \mathbf{e}_v \end{cases}, \quad (4)$$

где \mathbf{K}_p и \mathbf{K}_d – положительно определенные матрицы усиления,

Второй уровень – управление ориентацией. Расчет ошибки угловой ориентации базируется на основе матрицы поворота. Такое решение основано на методах алгебры Ли и исключает возможную сингулярность в отличии от линейно-квадратичного регулятора угловой стабилизации, где осуществляется вычитание углов. Система уравнений второго уровня управления имеет вид:

$$\begin{cases} \mathbf{e}_R = 1/2 \cdot (\mathbf{R}_d^T \mathbf{R} - \mathbf{R}^T \mathbf{R}_d)^{\vee} \\ \mathbf{e}_{\Omega} = \boldsymbol{\Omega} - \boldsymbol{\Omega}_T \\ [u_2 \ u_3 \ u_4]^T = -\mathbf{K}_R \mathbf{e}_R - \mathbf{K}_{\Omega} \mathbf{e}_{\Omega} \end{cases}, \quad (5)$$

где \mathbf{R}_d – матрица поворота, рассчитанная на основе программных углов; \mathbf{R} – матрица поворота, рассчитанная на основе текущих углов $[\phi, \theta, \psi]$; ${}^{\vee}$ – оператор перевода кососимметрической матрицы в \mathbb{R}^3 .

Третий уровень, управление высотой, регулирует подъемную силу в зависимости от желаемого вертикального ускорения:

$$u_1 = m \cdot (\ddot{z}_d + g) / c_{\varphi} c_{\theta}. \quad (6)$$

Общая схема управления представлена на Рис. 2.

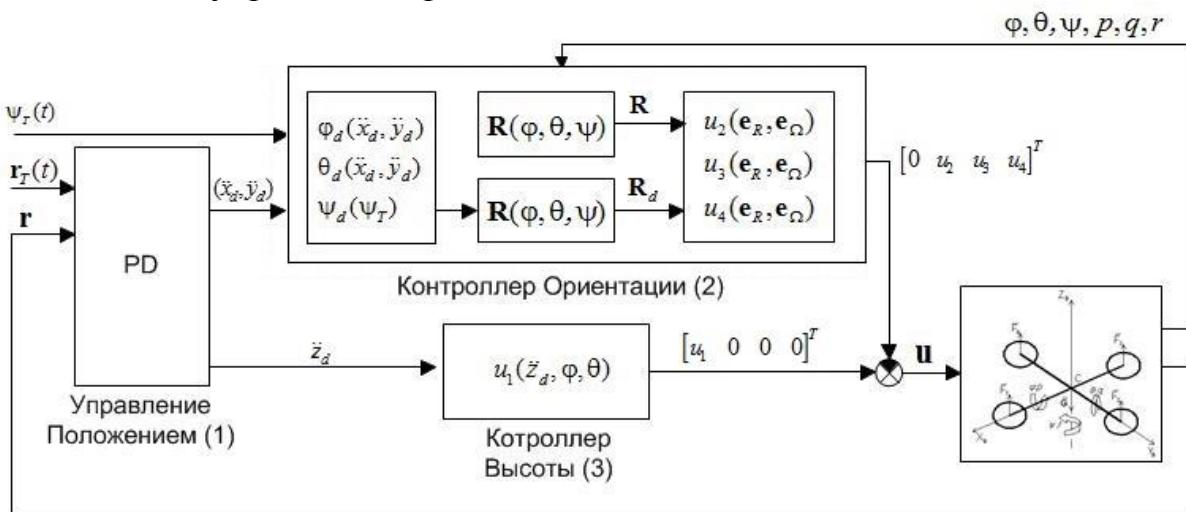


Рис. 2. Схема управления

Третья глава посвящена разработке метода децентрализованного управления квадрокоптерами в мультиагентной системе.

Изучив подходы при разработке алгоритмов управления MAC профессоров B. Кумара (Small, Safe, Smart, Speed, Swarm – 5S) и M. Эгерштедта (Local, Simple, Scalable, Safe and Reactive, Emergent (but not too much)) и стремясь

создать МАС, осуществляющее коллективное движение по аналогии со стайным поведением животных в природе, автор обобщил ряд принципов в виде структуры требований и критериев для оценки качества коллективного движения и способа группового управления:

Первое требование заключается в том, что способ управления агентом должен соответствовать 6 критериям, приведенным в таблице 1.

Таблица. 1.
Набор критериев для оценки качества группового движения.

Критерий	Определение
1 Безопасность	Агенты держатся на безопасном расстоянии друг от друга.
2 Сплоченность	Двигаются на относительно близких и схожих дистанциях.
3 Локальность	Агенты получают лишь локальную информацию в зоне слышимости, которая определяется дальностью связи.
4 Масштабируемость	Алгоритм работает вне зависимости от количества агентов.
5 Децентрализованность	Каждый агент имеет свою независимую систему управления.
6 Взаимозаменяемость	Агенты взаимозаменяемы. Допускается потеря или приобретение новой связи.

Второе требование заключается в том, что МАС, состоящая из квадрокоптеров, должна быть способна осуществлять групповой полет в трехмерном пространстве в двух режимах: строевое и роевое движение. Такая возможность позволяет использовать преимущества каждого режима в зависимости от миссии.

Третье требование является условием смешанной стратегии управления группой квадрокоптеров и заключается в том, чтобы предусмотреть возможность выбирать одного произвольного агента для удаленного управления по траектории или по скорости с координационного центра. В режиме роевого движения такой подход позволяет влиять на поведение группы «изнутри» с помощью агента, управляемого оператором. В режиме строевого движения возможность смены и управления лидером, относительно которого ведомые агенты рассчитывают своё местоположение в формации, позволил нивелировать риск потери лидера и более гибко управлять строем в режиме реального времени.

В соответствии с этими требованиями, решены задачи кинематического и динамического управления МАС в плоскости, а также задача децентрализованного управления группой квадрокоптеров.

За основу алгоритма децентрализованного управления в МАС были взяты правила К. Рейнольдса, который в своей работе “Boids”, посвященной симуляции стайного движения птиц, алгоритмизовал поведение каждой птицы

в отдельности на основе трех простых правил. Первое правило «Спленченность» заключается в том, что агенты стараются держаться как можно ближе друг к другу. Второе правило «Разделение» обеспечивает, чтобы агенты стремились разойтись и сохранить безопасное расстояние друг от друга. Третье правило «Выравнивание скоростей» заключается в том, что агенты из одной группы стремятся двигаться с одинаковой скоростью (Рис. 3).

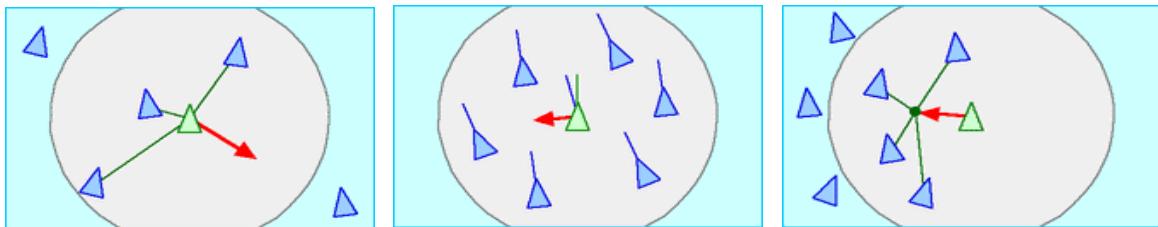


Рис. 3. Визуализация трех правил К. Рейнольдса (слева – направо): «Разделение», «Выравнивание скоростей», «Спленченность».

Модель Рейнольдса применима в случаях, когда допустимо «роевое» поведение группы. Исходя из этого, путем модификации алгоритма и добавления четвертого правила «Формация» обеспечивается строевое движение, подобно системе из материальных точек связанных упругими пружинами (Рис. 4). В такой модели при отклонении материальной точки, возникают силы, возвращающие его в исходную позицию, сохраняя геометрическую топологию. Четвертое правило замещает правило «Спленченности» при режиме полета строем. Очевидно, что агент, как твердое тело, в отличии от материальной точки, кроме координат положения имеет угловую ориентацию. Решение задачи регулирования угловой ориентации при строевом движении производится отдельно и заключается в том, что агенты стремятся выровнять угол рыскания относительно лидера.

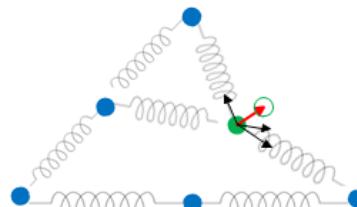


Рис. 4. Четвертое правило «Формация».

Существуют ограничения по применению модифицированного алгоритма для некоторых видов строя, связанные с особенностями пружин.

Для начала производится решение менее сложной плоской кинематической задачи. Рассматривается МАС, состоящая из идентичных агентов со следующим вектором состояния и управляемым воздействием:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [x \ y \ \phi] \\ \mathbf{u} = [V_x \ V_y \ \omega] \end{cases},$$

где x и y – координаты агента, V_x и V_y – проекции скорости агента на ПСК, ϕ и ω – угол и угловая скорость вокруг собственной оси. Уравнения движения для агента имеет вид: $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{u}$.

Агент получает информацию о положении других агентов, находящихся в его зоне слышимости. На основе этого агент регулирует скорость движения в соответствии с модифицированным алгоритмом Рейнольдса (Рис. 5).

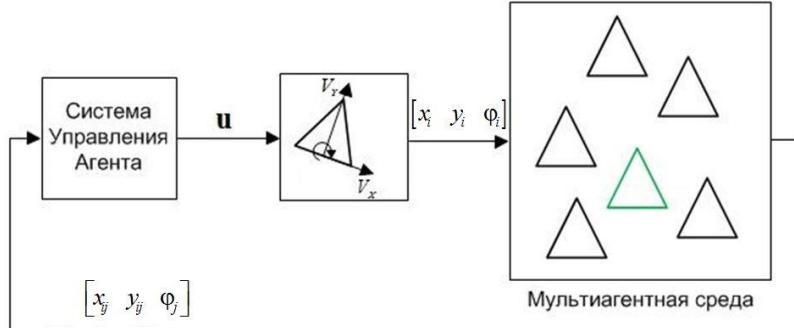


Рис. 5. Кинематическое управление агентом при двумерном групповом движении.

Управляющее действие по скорости для i -го агента задается как сумма четырех корректирующих компонентов, соответствующих четырем правилам:

$$\mathbf{u} = \mathbf{q}_V + \mathbf{q}_C + (1-\gamma) \cdot \mathbf{q}_{P_1} + \gamma \cdot \mathbf{q}_{P_2},$$

где $\mathbf{q}_V, \mathbf{q}_C, \mathbf{q}_{P_1}, \mathbf{q}_{P_2}$ – компоненты управления согласно соответствующим правилам «Выравнивание скорости», «Разделение», «Сплоченность», «Формация». Параметр γ определяет режим полета группы: 0 – роевое движение, 1 – строевое движение. В развернутом виде управляющие сигналы рассчитываются по следующим выражениям:

$$\begin{cases} u_1 = k_V V_{C_i x} + k_C \sum_{|r_{ij}| < l_{\min}, |x_{ij}| < l_{\min}} \left(-\frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} (l_{\min} - |x_{ij}|) \right) + (1-\gamma) k_{P_1} r_{C_i x} + \gamma k_{P_2} \varepsilon_{P_x} \\ u_2 = k_V V_{C_i y} + k_C \sum_{|r_{ij}| < l_{\min}, |y_{ij}| < l_{\min}} \left(-\frac{y_{ij}}{|y_{ij}|} (l_{\min} - |y_{ij}|) \right) + (1-\gamma) k_{P_1} r_{C_i y} + \gamma k_{P_2} \varepsilon_{P_y} \\ u_3 = k_\phi ((1-\gamma)(\bar{\phi} - \phi_i) + \gamma \varepsilon_\phi) \end{cases}$$

где k_V, k_C, k_{P_1} – коэффициенты усиления, k_{P_2} – коэффициент жесткости пружины, r_{C_i} и V_{C_i} – вектор положения и скорости центра масс группы агентов в зоне слышимости и системе координат i -го агента, x_{ij} и y_{ij} – координаты соседнего j -го агента в системе координат i -го агента, l_{\min} – минимальное безопасное расстояние между агентами, ε_p – ошибка текущего положения агента относительно заданного. Способ управления угловой скоростью также зависит от режима полета: $\bar{\phi}$ – среднее значение угла поворота среди агентов в зоне слышимости, ε_ϕ – ошибка текущего угла поворота агента относительно заданного. Заданная относительная позиция и угол поворота определяются выбранной геометрической топологией строя (например, клин, колонна, цепочка). При этом $r_{C_i x}, r_{C_i y}, V_{C_i x}, V_{C_i y}, \varepsilon_{P_x}, \varepsilon_{P_y}$ – проекции соответствующих векторов на ПСК рассматриваемого i -го агента.

В плоской динамической задаче группового управления рассматривается аналогичная МАС, состоящая из идентичных агентов со следующим вектором состояния и управляющим воздействием:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [x \ y \ \varphi \ V_x \ V_y \ \omega] \\ \mathbf{u} = [F_x \ F_y \ L_z] \end{cases},$$

где F_x и F_y – проекции равнодействующей силы на оси ПСК агента, L_z – момент вокруг оси Z. Уравнения движения агента будут иметь вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = (1/m) F_x \\ \ddot{y} = (1/m) F_y \\ \ddot{\varphi} = (1/I_{zz}) L_z \end{cases}.$$

где m – масса агента, I_{zz} – момент инерции вокруг оси Z.

Управляющее воздействие по ускорению вычисляется аналогичным образом с учетом динамических свойств:

$$\mathbf{u} = [m \ m \ 0]^T \cdot (\mathbf{q}_v + \mathbf{q}_c) + [m \ m \ I_{zz}]^T \cdot ((1-\gamma) \cdot \mathbf{q}_{P_1} + \gamma \cdot m \mathbf{q}_{P_2}), \quad (7)$$

В задаче группового управления квадрокоптерами в трехмерном пространстве рассматривается МАС, состоящая из автономных квадрокоптеров, состоящая из идентичных квадрокоптеров с управляющим воздействием (1), уравнением движения (2) и вектором состояния $\mathbf{x} = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \varphi \ \theta \ \psi \ p \ q \ r]$. Квадрокоптеры способны обмениваться в зоне слышимости с соседними агентами информацией о своем положении и угле рыскания (техническая реализация внутренней коммуникации может быть на базе радиомодулей XBee).

Для постановки задач перед группой квадрокоптеров предлагается ввести роль оператора (Рис. 6), который в зависимости от конкретной ситуации принимает оперативные решения по выбору лидера, траектории его движения и параметров движения группы. Оператор выбирает режим поведения квадрокоптера: при $h=1$ включается режим лидера, тогда управление по скорости или по траектории производится оператором, при $h=0$ включается режим ведомого, тогда агент полностью автономен и регулирует своё движение в соответствии с модифицированными правилами Рейнольдса, внешней средой и режимом движения группы. Оператор может назначать режим полета группы γ (строевое или роевое) и тип строя f .

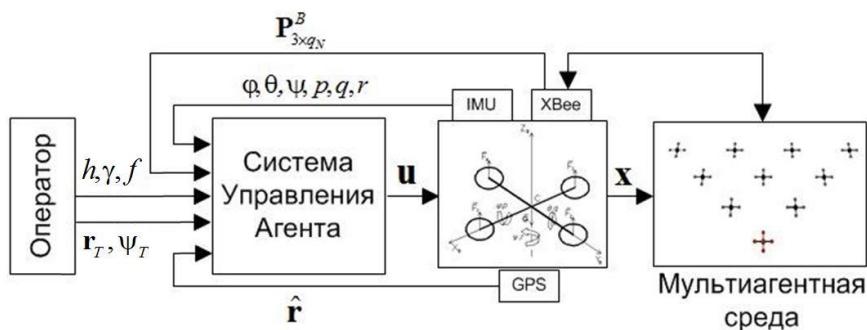


Рис. 6. Взаимодействие квадрокоптера с внешней средой.

В основе алгоритма управления квадрокоптером в МАС (Рис. 7) лежат ранее разработанные модули (4-6) управления одиночным квадрокоптером (Рис. 2) и модуль (7) управления агентом в МАС в плоской динамической задаче.

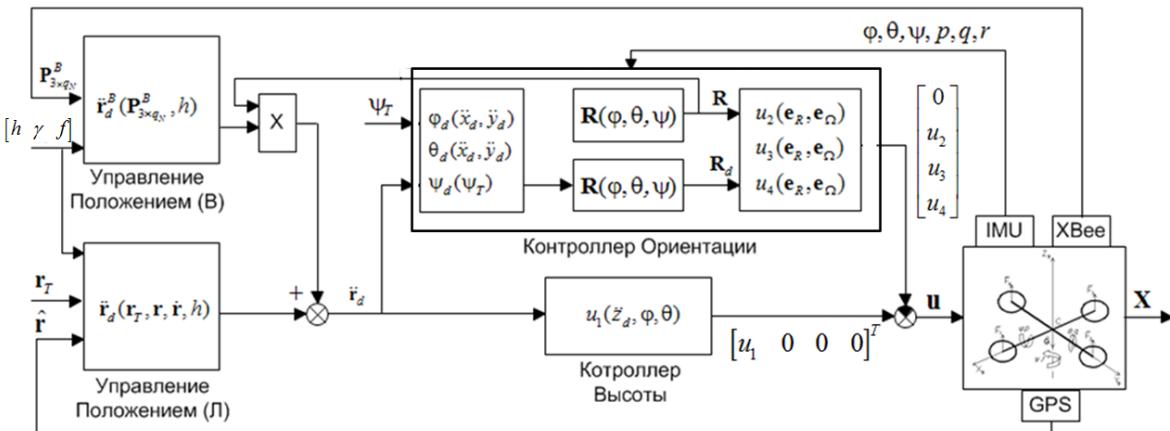


Рис. 7. Схема управления квадрокоптером в МАС.

Квадрокоптер в зависимости от γ переключает блок управления положением. Если квадрокоптер является лидером, то включен Блок Управления (Л), где выходной сигнал формируется согласно (4). Если же квадрокоптер является ведомым, то включен Блок Управления (В) и желаемое ускорение формируется по аналогии с уравнением (7) для плоской динамической задачи с учетом перехода в трехмерное пространство:

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{r}}_d^B = \mathbf{a}_V + \mathbf{a}_C + (1-\gamma)\mathbf{a}_{P_1} + \gamma\mathbf{a}_{P_2} + \mathbf{K}_d\varepsilon_d \\ \mathbf{a}_V = \mathbf{K}_V \mathbf{V}_C \\ \mathbf{a}_C = \mathbf{K}_C \sum_{|r_{ij}| < l_{\min}} \left(-\frac{\mathbf{r}_{ij}}{|r_{ij}|} (l_{\min} - |r_{ij}|) \right) \\ \mathbf{a}_{P_1} = \mathbf{K}_{P_1} (1-\gamma) \mathbf{r}_C \\ \mathbf{a}_{P_2} = \mathbf{K}_{P_2} \gamma \varepsilon_P \end{cases} . \quad (8)$$

Четвертая глава посвящена разработке моделей системы управления и среды моделирования, а также анализу результатов компьютерной апробации алгоритма управления одиночным квадрокоптером и способов децентрализованного управления группой квадрокоптеров.

Для апробации алгоритма управления одиночным квадрокоптером по траектории использовалась связка программных пакетов Matlab и Universal Mechanism (UM). Для компьютерного моделирования использовался прототип квадрокоптера со следующими масс-инерционными и геометрическими характеристиками: $\mathbf{I} = \text{diag}(0.002352, 0.002352, 0.004704)$, $m = 0.32\text{kg}$, $L = 0.209\text{m}$.

Согласно указанным параметрам квадрокоптер задан в UM как твердое тело. Модель системы управления построена в Matlab на основе соотношений (4-6) и схемы управления на Рис. 2. Для моделирования движения квадрокоптера между Matlab (модель системы управления) и UM (среда моделирования) установлена двухсторонняя связь согласно Рис. 8.

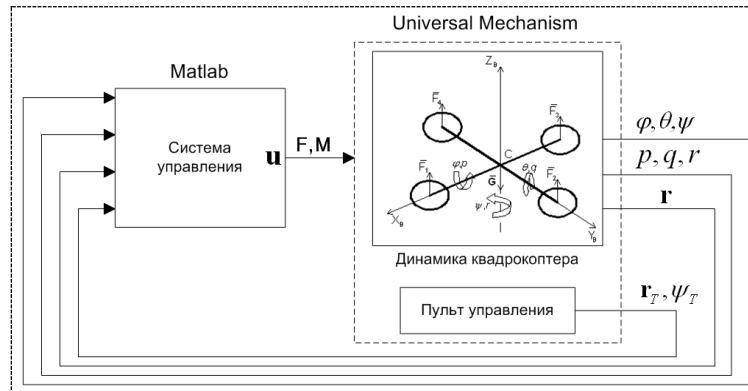


Рис. 8. Схема подключения «Matlab» и «Universal Mechanism».

Экспериментальная настройка ПД регулятора включила последовательные этапы подбора пропорциональной и дифференциальной составляющей на основе анализа влияния изменений коэффициентов на динамику системы:

$$\mathbf{K}_p = \text{diag}(2, 2, 2), \mathbf{K}_d = \text{diag}(2, 2, 2), \mathbf{K}_R = \text{diag}(20, 20, 20), \mathbf{K}_\Omega = \text{diag}(5, 5, 5).$$

В среде моделирования был разработан пульт управления (ПУ), позволяющий оператору управлять ведущим квадрокоптером и задавать параметры группового движения (Рис. 9). Схожая комбинация органов управления мультикоптером применяется в мировой практике.

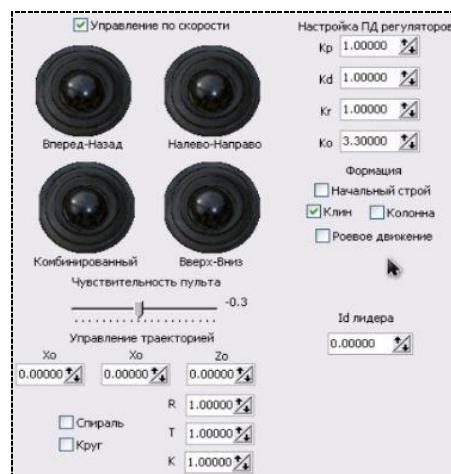


Рис. 9. Пульт управления.

В ходе моделирования управления движением одиночного квадрокоптера исследованы различные режимы полета, например, движение по окружности с радиусом 5 м и наклоном 45° к горизонтальной плоскости (Рис. 10).

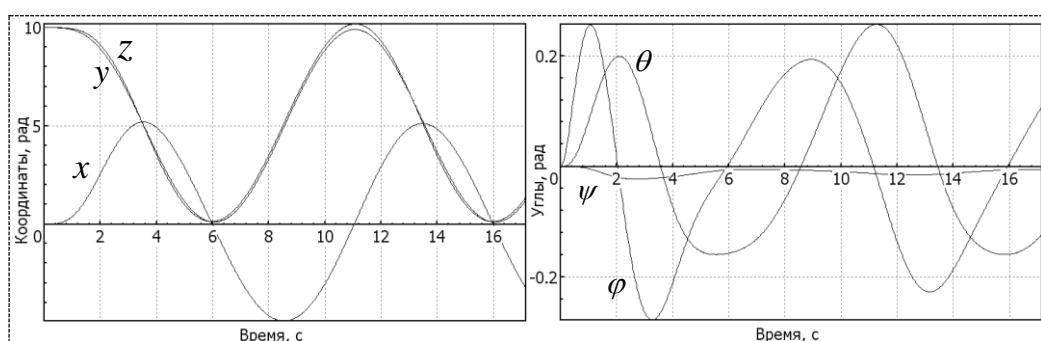


Рис. 10. Выполнение траектории: окружность под наклоном.

В эксперименте задана следующая траектория:

$$\begin{cases} x_T(t) = 5 \sin(0.628t) \\ y_T(t) = 5 \cos(0.628t) + 5 \\ z_T(t) = 5 \cos(0.628t) + 5 \\ \psi_T(t) = 0 \end{cases}$$

Результаты моделирования (Рис. 10) демонстрируют работоспособность алгоритма управления движением одиночного квадрокоптера.

Для апробации алгоритма децентрализованного управления квадрокоптеры в УМ были заданы как система из идентичных тел с одинаковыми массоинерционными характеристиками. Каждый агент имел свою независимую систему управления в Matlab. При этом из УМ в Matlab передавались такие параметры, как координаты, скорость и угловые параметры агента, координаты и угол рыскания соседних агентов в ПСК искомого агента.

Модель системы управления была построена в Matlab на основе формул (4-6,8) и схемы управления на Рис. 7. Минимальное безопасное расстояние между двумя агентами было установлено равным одному метру: $l_{\min} = 1$. Матрицы усиления были подобраны экспериментально и равны:

$$\mathbf{K}_p = \text{diag}(2, 2, 2), \mathbf{K}_d = \text{diag}(2, 2, 2), \mathbf{K}_R = \text{diag}(20, 20, 20), \mathbf{K}_\Omega = \text{diag}(5, 5, 5);$$

$$\mathbf{K}_V = \text{diag}(2, 2, 2), \mathbf{K}_C = \text{diag}(2, 2, 4), \mathbf{K}_{P_1} = \text{diag}(2, 2, 1), \mathbf{K}_{P_2} = \text{diag}(2, 2, 1);$$

Рассмотрены различные режимы движения группы, например, когда лидеру задана плоская синусоидальная траектория (Рис. 11).

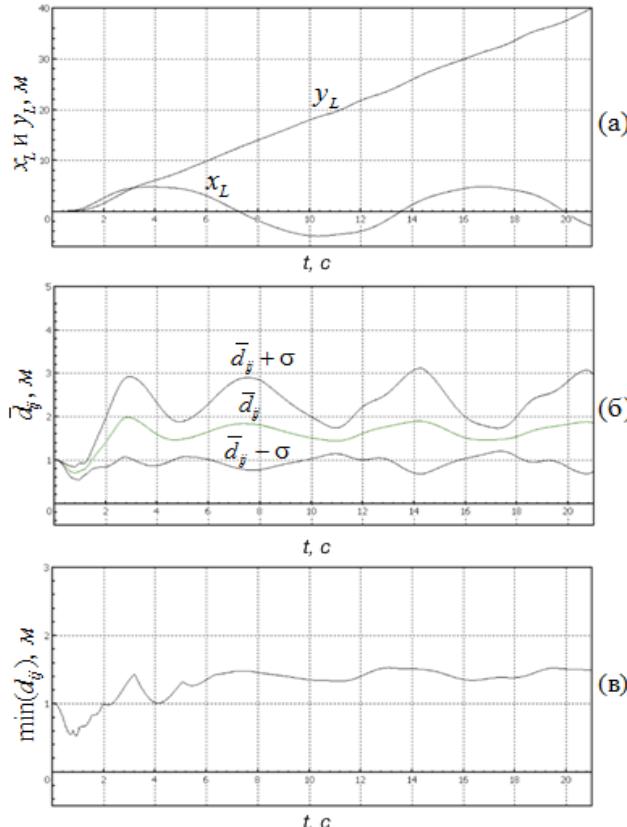


Рис. 11. Оценка критериев группового движения: (а) – траектория лидера, (б) – среднее и среднеквадратичное отклонение между агентами за время полета, (в) – минимальное расстояние между парой агентов за время полета.

В эксперименте лидеру задана следующая траектория:

$$\begin{cases} x_L = 5 \sin(0.5t) \\ y_L = 0.5t \\ z_L = 0 \end{cases} .$$

Группа из 10 квадрокоптеров при средней скорости 3.5 м/с продемонстрировала сплоченное коллективное движение: среднеарифметическое расстояние между агентами колебалось около $\bar{d}_{ij}=1.8m$ при максимальном за время полета среднеквадратичном отклонении $\max \sigma(t)=1m$ (Рис. 11). Сближение агентов происходило на поворотах. Критерий безопасности также был соблюден: минимальная дистанция между парой агентов $\min(d_{ij})>1.4m$.

Результаты компьютерного моделирования обследования с/х поля размером 20 гектар с помощью 10 квадрокоптеров с учетом ограничений по дальности связи $l_c=100m$ представлены на Рис. 12, Рис. 13 и Рис. 14. Каждый агент при этом суммарно пролетел 900м. Для захвата большей ширины кадра, группа квадрокоптеров была выстроена в линию с расстоянием 50м между агентами. Если ведомый агент не находит лидера в зоне покрытия связи, то в качестве объекта слежения выбирается соседний агент, относительно которого также задано взаимное расположение. Время выполнения составило около 3-х минут, что 20 раз быстрее в сравнении с картированием аналогичного поля одиночным квадрокоптером, учитывая необходимость перезарядки каждые 4км.

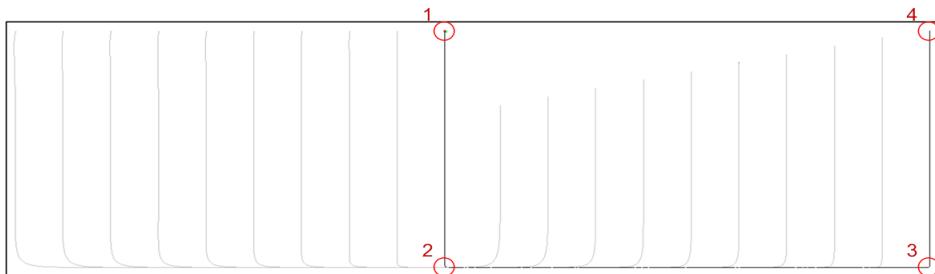


Рис. 12. Картирование с/х поля при ограниченной коммуникации.

На Рис. 12 жирной линией представлена траектория движения лидера последовательно по точкам 1-4. При ограничении радиуса связи, движение агентов происходит согласно цепной реакции. В результате, чем дальше агент от лидера, тем большую ошибку по положению он имеет (Рис. 13).

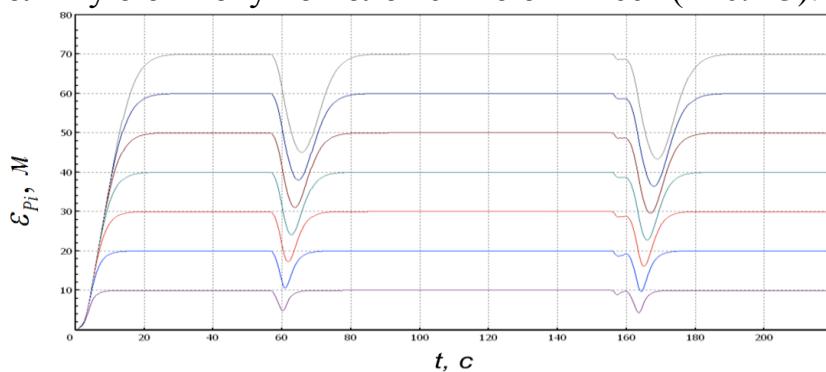


Рис. 13. Отклонение агентов от заданной позиции в строе.

Самый дальний агент отстает от целевой позиции в формации на 70м. Среднеарифметическое расстояние между агентами составило $\bar{d}_{ij} = 55\text{м}$ при максимальном среднеквадратичном отклонении $\sigma = 4\text{м}$ (Рис. 14).

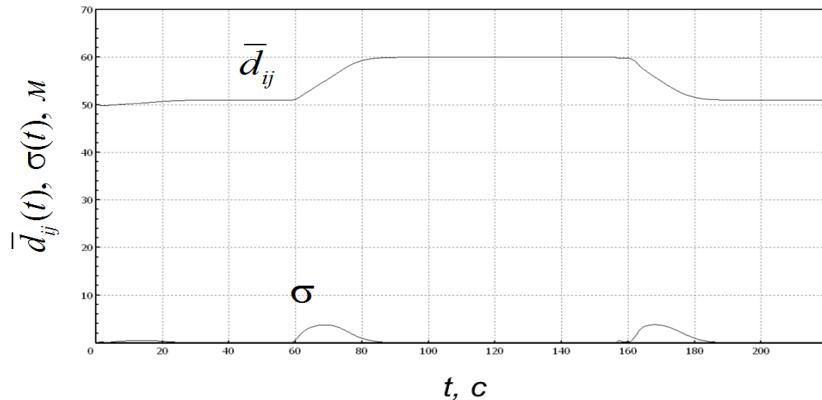


Рис. 14. Среднеарифметическое расстояние между двумя агентами и среднеквадратичное отклонение в задаче картирования с/х поля.

Исследовано влияние помех и шумов в датчиках положения на способ управления группой. При добавлении аддитивного белого гауссовского шума с математическим ожиданием равным нулю, среднеквадратичным отклонением 4 м и частотой в 2 Гц ко всем сигналам в датчиках положения (в соответствии с погрешностью современных датчиков GPS), несмотря на снижение точности расположения агентов в группе, работоспособность способа децентрализованного управления квадрокоптерами сохранилась.

В **заключении** резюмируются основные выполненные задачи и полученные результаты, а также приводятся возможные дальнейшие направления развития.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Выведена динамическая модель движения квадрокоптера.
2. Предложен алгоритм управления движением одиночного квадрокоптера по траектории и по скорости.
3. Сформулированы требования к способу группового управления и критерия для оценки качества коллективного движения.
4. Произведена модификация алгоритма К. Рейнольдса для возможности движения строем и изменения направления движения МАС.
5. Модифицированный алгоритм Рейнольдса использован для решения плоской кинематической и плоской динамической задач управлений МАС.
6. Разработан децентрализованный способ управления квадрокоптером в МАС для полета в строевом или роевом режиме в трехмерном пространстве.
7. Построена модель системы управления и проведена компьютерная апробация. Эксперименты продемонстрировали работоспособность способа управления при движении 10 квадрокоптеров со скоростью в пределах 5 м/с.
8. Способ управления апробирован с помощью моделирования в практической задаче картирования группой агентов с/х поля размером в 20 га за 3 минуты. Проанализировано влияние шумов в датчиках на способ управления.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зенкевич С.Л., Галустян Н.К. Угловая стабилизация квадрокоптера // Экстремальная робототехника: сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. СПб.: Изд-во «Политехника-сервис». 2012. С. 164-171. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
2. Зенкевич С.Л., Галустян Н.К. Разработка математической модели и синтез алгоритма угловой стабилизации движения квадрокоптера // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3. С. 27-32. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
3. Зенкевич С.Л., Галустян Н.К. Синтез и апробация алгоритма управления движением квадрокоптера по траектории // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 8. С. 530-535. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
4. Зенкевич С.Л., Галустян Н.К. Децентрализованное управление группой квадрокоптеров // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. №11. С.: 774-782. (0,6 п.л./0,3 п.л.)