

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](http://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 отличие 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 МАС из десяти автономных квадрокоптеров, способных выполнять реальные коллективные задачи. В Стенфордском Университете создан и апробирован алгоритм управления квадрокоптером в МАС, 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 МАС 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 МАС 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 МАС, 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:  $[\varphi, \theta, \psi]$  – 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.

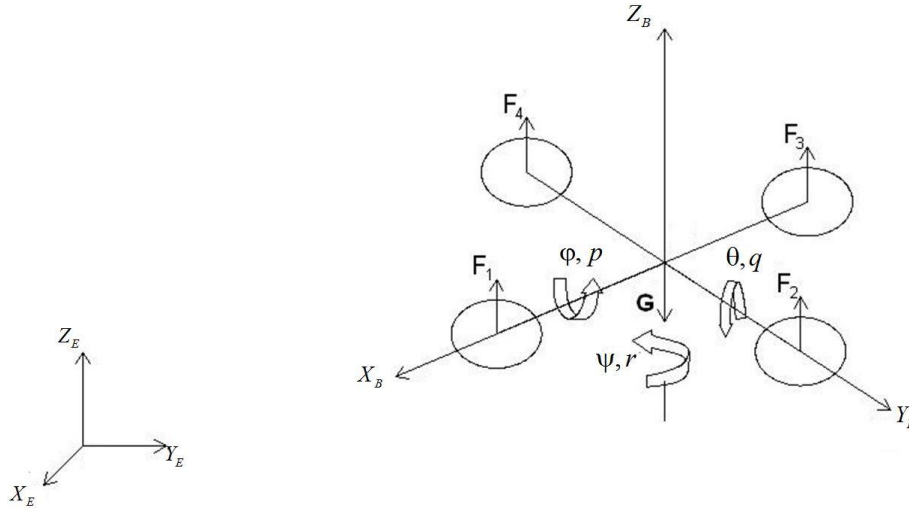


Рис.1. Системы координат и силы, действующие на квадрокоптер

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

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

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

Пропеллеры квадрокоптера вращаются со скоростью  $\omega_i$ , 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 взаимосвязи 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,  $\Omega_B$  – вектор угловой скорости в ПСК,  $\dot{\Omega}_B$  – относительная производная вектора угловой скорости (производная в ПСК),  $\hat{\cdot}$  – оператор перевода  $\mathbb{R}^3$  в кососимметрическую матрицу. Система уравнений движения в скалярном виде будет следующей:

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

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 отличие от линейно-квадратичного регулятора угловой стабилизации, где осуществляется вычитание углов. Система уравнений второго уровня управления имеет вид:

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

где  $\mathbf{R}_d$  – матрица поворота, рассчитанная на основе программных углов;  $\mathbf{R}$  – матрица поворота, рассчитанная на основе текущих углов  $[\varphi, \theta, \psi]$ ;  $^\vee$  – 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.

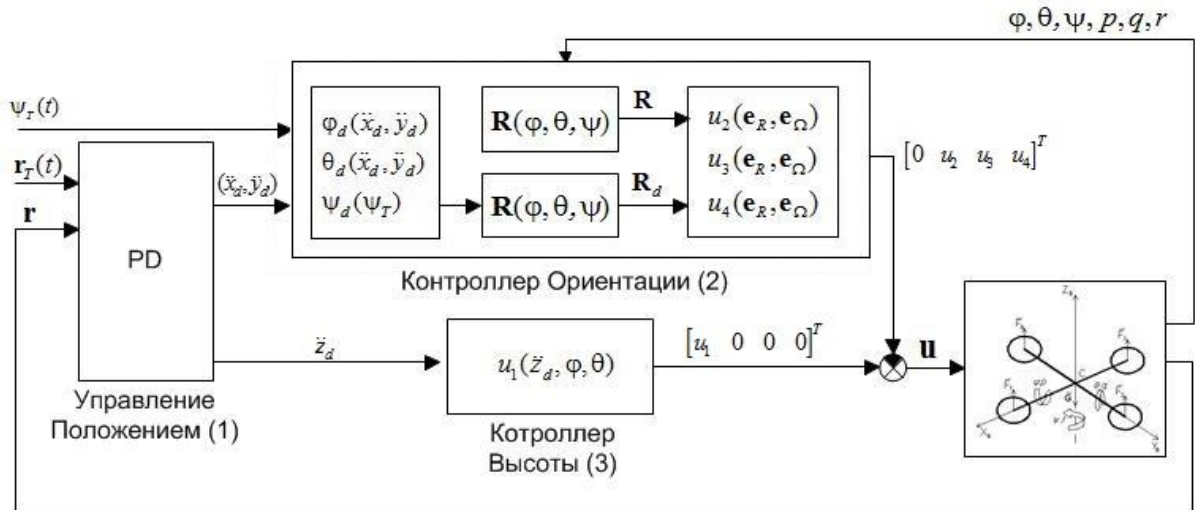


Рис. 2. Схема управления

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

Изучив подходы при разработке алгоритмов управления МАС профессоров В. Кумара (Small, Safe, Smart, Speed, Swarm – 5S) и М. Эгершtedта (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 имеют 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. Рейднольдса, который в своей работе “Boids”, посвященной симуляции стайного движения птиц, алгоритмизовал поведение каждой птицы

в отдельности на основе трех простых правил. Первое правило «Сплоченность» 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).

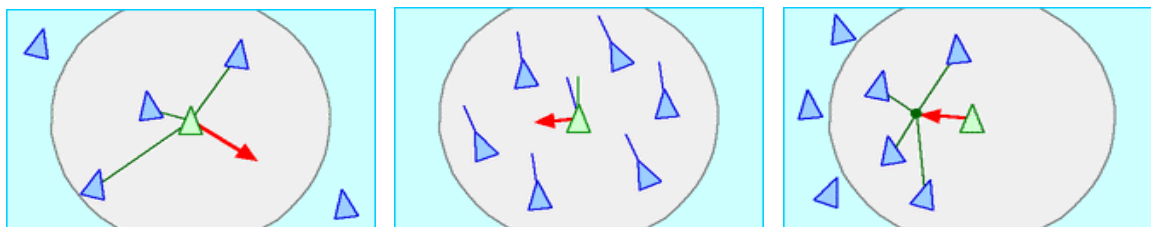


Рис. 3. Визуализация трех правил К. Рейнольдса (слева – направо): «Разделение», «Выравнивание скоростей», «Сплоченность».

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 «Сплоченности» при режиме полета строем. Очевидно, что агент, как твердое тело, в отличие 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.

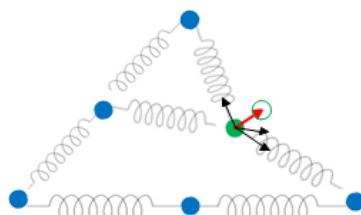


Рис. 4. Четвертое правило «Формация».

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 управляющим воздействием:

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

где  $x$  и  $y$  – координаты агента,  $V_x$  и  $V_y$  – проекции скорости агента на ПСК,  $\varphi$  и  $\omega$  – 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).

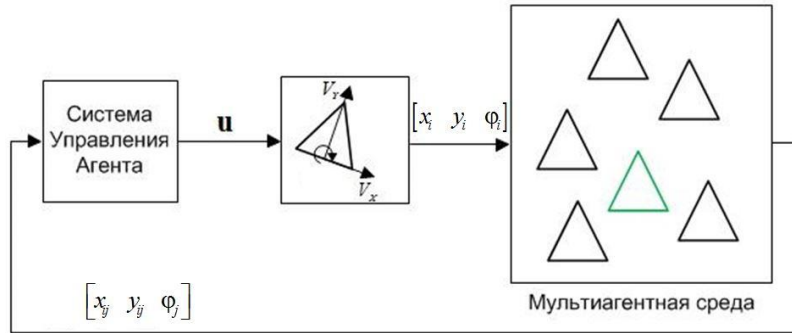


Рис. 5. Кинематическое управление агентом при двумерном групповом движении.

Управляющее воздействие 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  $\gamma$  определяет режим полета группы: 0 – роевое движение, 1 – строевое движение. В развернутом виде управляющие сигналы рассчитываются по следующим выражениям:

$$\begin{cases} u_1 = k_V V_{C_{ix}} + k_C \sum_{|r_{ij}| < l_{\min}, |x_{ij}| < l_{\min}} \left( -\frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} (l_{\min} - |x_{ij}|) \right) + (1 - \gamma) k_{P_1} r_{C_{ix}} + \gamma k_{P_2} \varepsilon_{Px} \\ u_2 = k_V V_{C_{iy}} + k_C \sum_{|r_{ij}| < l_{\min}, |y_{ij}| < l_{\min}} \left( -\frac{y_{ij}}{|y_{ij}|} (l_{\min} - |y_{ij}|) \right) + (1 - \gamma) k_{P_1} r_{C_{iy}} + \gamma k_{P_2} \varepsilon_{Py} \\ u_3 = k_\varphi \left( (1 - \gamma)(\bar{\varphi} - \varphi_i) + \gamma \varepsilon_\varphi \right) \end{cases}$$

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,  $\varepsilon_p$  – ошибка текущего положения агента относительно заданного. Способ управления угловой скоростью также зависит от режима полета:  $\bar{\varphi}$  – среднее значение угла поворота среди агентов в зоне слышимости,  $\varepsilon_\varphi$  – ошибка текущего угла поворота агента относительно заданного. Заданная относительная позиция и угол поворота определяются выбранной геометрической топологией строя (например, клин, колонна, цепочка). При этом  $r_{C_{ix}}, r_{C_{iy}}, V_{C_{ix}}, V_{C_{iy}}, \varepsilon_{Px}, \varepsilon_{Py}$  – 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 будет 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 агентам 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  $\gamma$  (строевое или роевое) и тип строя  $f$ .

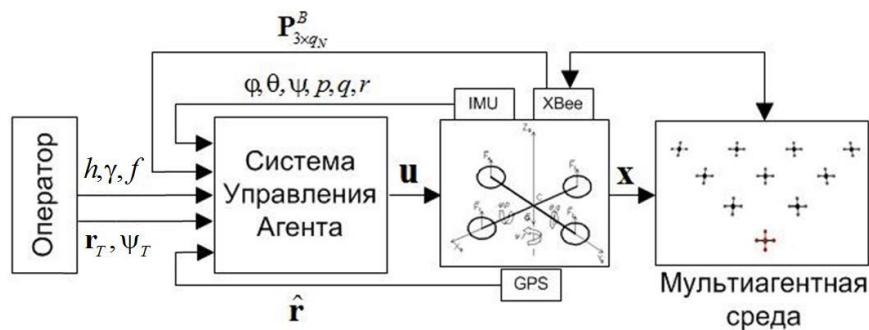


Рис. 6. Взаимодействие квадрокоптера с внешней средой.

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.

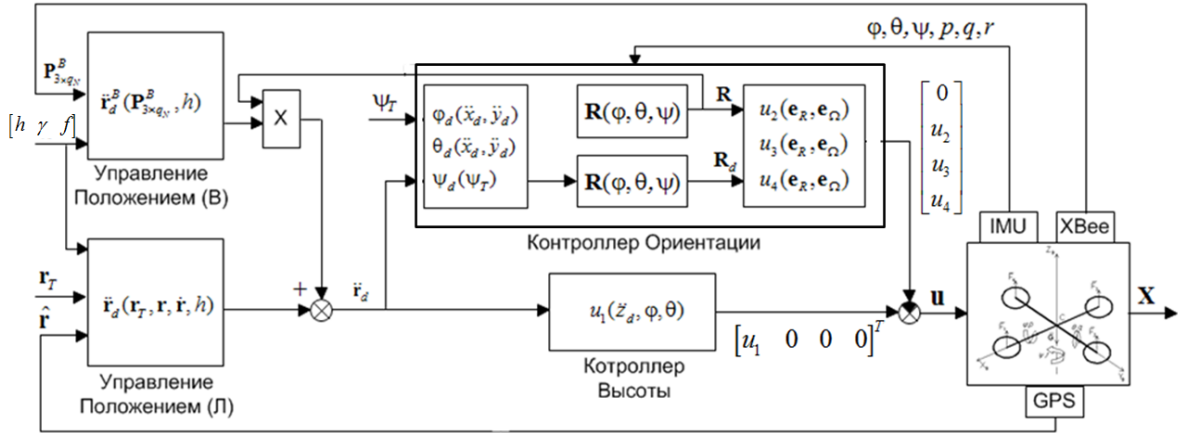


Рис. 7. Схема управления квадрокоптером в МАС.

Квадрокоптер в зависимости от  $\gamma$  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:  $\mathbf{I} = \text{diag}(0.002352, 0.002352, 0.004704)$ ,  $m = 0.32 \text{ кг}$ ,  $L = 0.209 \text{ м}$ .

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.

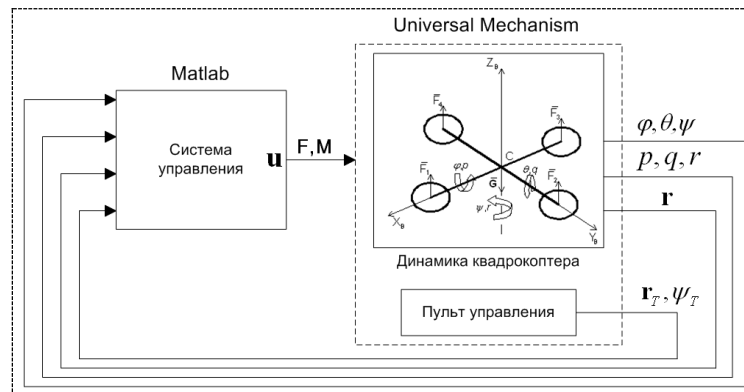


Рис. 8. Схема подключения «Matlab» и «Universal Mechanism».

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.

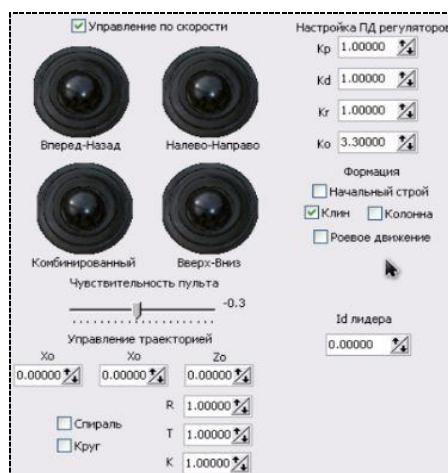


Рис. 9. Пульт управления.

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

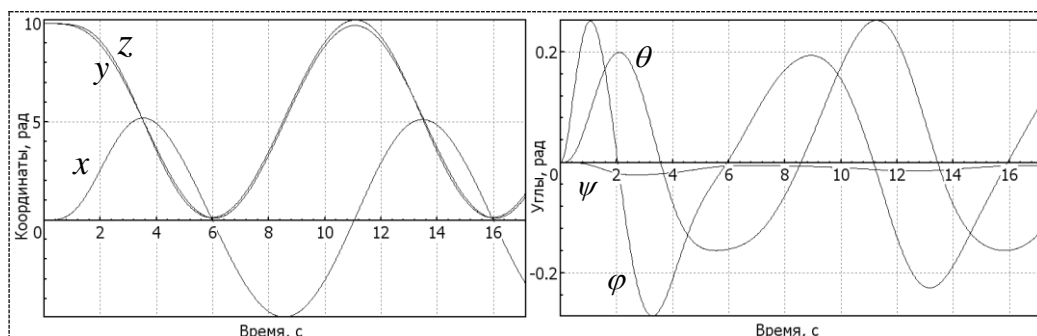


Рис. 10. Выполнение траектории: окружность под наклоном.



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 масс-инерционными характеристикам. 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:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_p &= \text{diag}(2, 2, 2), \mathbf{K}_d = \text{diag}(2, 2, 2), \mathbf{K}_R = \text{diag}(20, 20, 20), \mathbf{K}_\Omega = \text{diag}(5, 5, 5); \\ \mathbf{K}_v &= \text{diag}(2, 2, 2), \mathbf{K}_c = \text{diag}(2, 2, 4), \mathbf{K}_{p_1} = \text{diag}(2, 2, 1), \mathbf{K}_{p_2} = \text{diag}(2, 2, 1); \end{aligned}$$

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

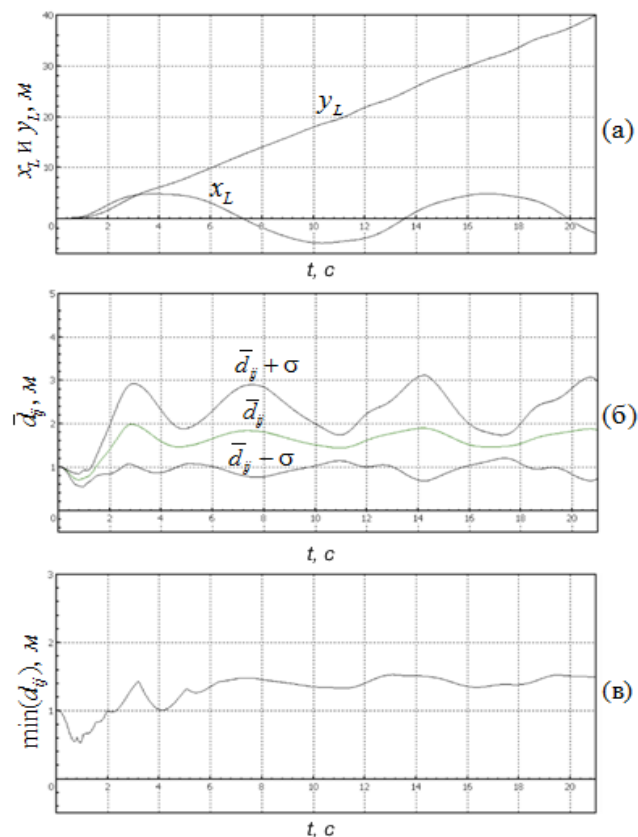


Рис. 11. Оценка критериев группового движения: (а) – траектория лидера, (б) – среднее и среднеквадратичное отклонение между агентами за время полета, (в) – минимальное расстояние между парой агентов за время полета.



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  $\bar{d}_{ij} = 1.8\text{м}$  при максимальном за время полета среднеквадратичном отклонении  $\max \sigma(t) = 1\text{м}$  (Рис. 11). Сближение агентов происходило на поворотах. Критерий безопасности также был соблюден: минимальная дистанция между парой агентов  $\min(d_{ij}) > 1.4\text{м}$ .

Результаты компьютерного моделирования обследования с/х поля размером 20 гектар с помощью 10 квадрокоптеров с учетом ограничений по дальности связи  $l_c = 100\text{м}$  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.

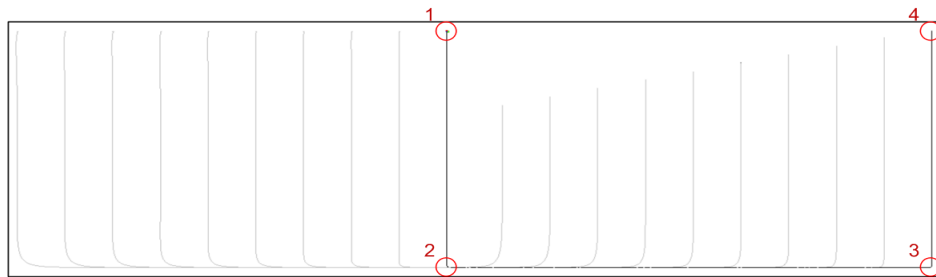


Рис. 12. Картирование с/х поля при ограниченной коммуникации.

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).

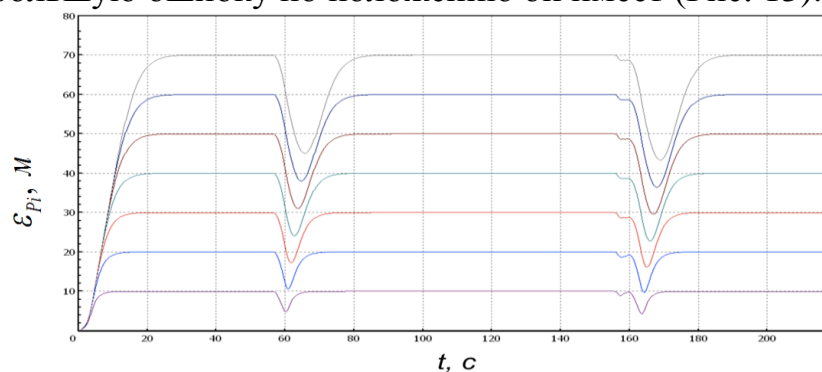


Рис. 13. Отклонение агентов от заданной позиции в строе.

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).

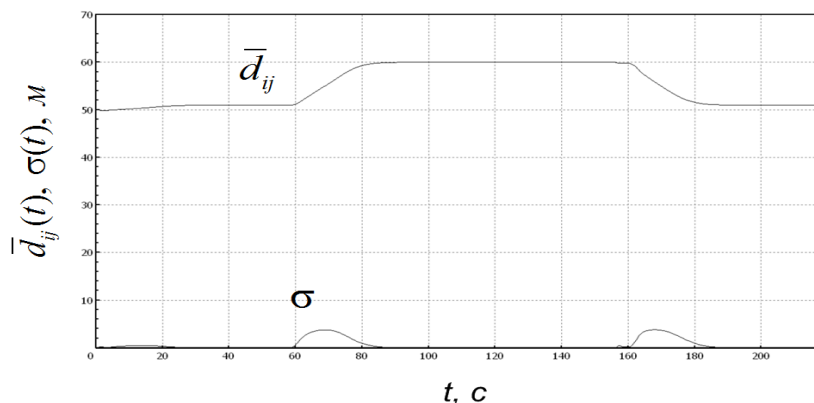


Рис. 14. Среднеарифметическое расстояние между двумя агентами и среднеквадратичное отклонение в задаче картирования с/х поля.

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 управления 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.)