

на правах рукописи



Казанин Дмитрий Константинович

**Методы и алгоритмы управления группой беспилотных летательных
аппаратов при формировании строя**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление
и обработка информации (в науке и промышленности)»
по техническим наукам

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2017 г.

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика» Арзамасского политехнического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева»

Научный руководитель: **Пакшин Павел Владимирович**
доктор физико-математических наук, профессор, «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева» Арзамасский политехнический институт, заведующий кафедрой «Прикладная математика»

Официальные оппоненты: **Чайковский Михаил Михайлович**
доктор технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственный центр автоматики и приборостроения им. академика Н.А.Пилюгина», отделение 08, ведущий научный сотрудник

Болдинов Виктор Александрович
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», факультет «Робототехнические и интеллектуальные системы», кафедра 701 «Авиационные робототехнические системы», доцент

Ведущая организация: федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», г. Москва

Защита диссертации состоится « 09 » _____ ноября 2017 года в _____ 12⁰⁰ часов в ауд. 1315 на заседании диссертационного совета Д 212.165.05 при Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е.Алексеева по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева» и на сайте <http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суркова Анна Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние годы значительно возрос интерес к изучению сложных систем, состоящих из большого числа объектов управления, целью которых является достижение некоторого кооперативного взаимодействия при отсутствии единого управляющего центра. Такие системы обычно называются мультиагентными, а входящие в них объекты агентами. Каждый из агентов, как правило, взаимодействует только с относительно небольшим окружением, при этом топология взаимодействия может быть переменной, а способ взаимодействия (связи между агентами) – весьма сложным и нелинейным. Применительно к групповому движению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) существенный интерес представляет тип коллективного поведения, называемый консенсусом (синхронизацией, согласованием характеристик) между агентами. Принцип синхронизма лежит в основе многих природных явлений (например, законов движения биологических и искусственных формаций, таких как рой насекомых, стая птиц или животных, косяк рыб и т.п.), что и мотивировало активное изучение распределенных алгоритмов (протоколов) достижения консенсуса в последние годы. При этом, достаточно полно исследованы только системы, где либо агенты, либо структура связей относительно просты. Первое означает, что агенты описываются линейными уравнениями, часто невысокого порядка. Второе означает, что связи между агентами линейны, а граф их взаимодействий постоянен. Однако даже в этих случаях известные условия консенсуса не гарантируют защиту агентов от возможных столкновений, а информация, которой обмениваются объекты, может содержать искажения и шумы. Поэтому получение условий синхронизации в реальных системах нелинейных агентов с нелинейным взаимодействием, возникающим естественным образом в силу насыщений в исполнительных устройствах, нелинейных искажений данных, а также самой природы связей является сложной и во многом открытой проблемой. В связи с этим заявленное направление исследований является актуальным.

Объектом исследования является группа подвижных объектов в виде беспилотных летательных аппаратов.

Предмет исследования – методы и алгоритмы управления процессом формирования строя БПЛА.

Целью диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов формирования строя группы БПЛА с защитой от их возможных взаимных столкновений и коррекции инерциальных оценок координат.

В соответствии с целью диссертационной работы ставятся следующие задачи:

1. разработка алгоритма формирования строя для группы БПЛА;
2. разработка методов коррекции инерциальных оценок координат при управлении группой БПЛА в рамках упрощенных моделей в виде материальных точек на плоскости;
3. разработка метода и алгоритма защиты БПЛА от взаимных столкновений в процессе формирования строя.

Методы исследования

Для теоретических исследований в диссертационной работе использовались методы теории графов и теории множеств, методы теории автоматического управления и теории вероятностей, методы нечётких логических систем и эвристические алгоритмы. Для практической апробации и настройки разработанных алгоритмов применено моделирование с использованием программного обеспечения, реализованного на языке C++.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложен метод решения задачи формирования строя БПЛА, отличающийся тем, что эта задача разделяется на две *взаимосвязанные* подзадачи: слежения за виртуальным лидером и защиты от столкновений. Ранее эти задачи решались либо как независимые, либо задача защиты от столкновений вообще не рассматривалась, и формирование требуемой конфигурации строя отождествлялось с достижением консенсуса.

2. Предложен частный алгоритм слежения за виртуальным лидером для формирования строя БПЛА, отличающийся тем, что он основан на коррекции параметров методом математического моделирования в рамках полной модели динамики.

3. Предложены методы коррекции инерциальных оценок координат при управлении группой материальных точек на плоскости, являющихся упрощенными моделями БПЛА. Эти методы позволили обосновать возможность формирования строя по измерениям дальностей между объектами и скорости их движения.

4. Разработаны метод и алгоритм защиты от столкновений БПЛА между собой в процессе формирования строя. Метод представляет собой модификацию известного метода искусственного потенциального поля, отличающуюся новой формой поля, адекватной поставленной задаче.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается:

1. корректным использованием математического аппарата;
2. результатами численного моделирования;
3. многократной экспертизой результатов при рецензировании статей и при обсуждении на конференциях различного уровня.

Теоретическая значимость исследования

Исследования задачи консенсуса группы подвижных объектов проводились многими авторами (например, [Fax J.A.](#) и [Murray R.M.](#)) в рамках линейных моделей агентов. В отличие от этих работ автором предложено частное решение, но с использованием полной нелинейной модели объектов управления.

Предлагаемый подход к решению задачи предотвращения столкновений между агентами основан на модификации подхода, предложенного в работе Namerikawa T. и Kuriki Y., опубликованной в 2014г. В этой работе задача защиты от столкновений решается на основе метода искусственного потенциального поля для систем квадрокоптеров, для одного высотного канала с цилиндрической областью безопасности. В данной работе, в отличие от упомянутой, учитывается возможность столкновения по всем трем пространственным координатам, в связи с чем, вводится сферическая область безопасности и задача решается для всех трех каналов управления.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы состоит в том, что ее результаты могут найти эффективное применение в задачах экологической разведки и мониторинга в труднодоступных районах с использованием групп БПЛА.

Сведения о внедрении результатов

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, внедрены в ПАО Арзамасское научно-производственное предприятие «Темп-Авиа» и применяются для решения задач управления строем группы БПЛА.

Основные положения, выносимые на защиту

1 метод решения задачи формирования строя БПЛА, на основе разделения этой задачи на две взаимосвязанные подзадачи: слежения за виртуальным лидером и защиты от столкновений (метод последовательно реализован в главах 1 - 3);

2 частный алгоритм слежения за виртуальным лидером в процессе формирования строя БПЛА на основе их полных динамических моделей (глава 1);

3 методы коррекции инерциальных оценок координат при управлении группой материальных точек на плоскости, являющихся упрощенными моделями БПЛА (глава 2);

4 метод и алгоритм защиты от столкновений БПЛА между собой в процессе формирования строя (глава 3).

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и

обсуждались на XVI и XVII конференциях молодых ученых «Навигация и управление движением» (Санкт-Петербург, 2014г., 2015г.), XX Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (Нижний Новгород, 2014г.), XI Всероссийской школе-конференции молодых учёных «Управление большими системами УБС-2014» (Арзамас, 2014г.), X Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» (Москва, 2015г.), II Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» (Москва, 2015г.).

Автор был отмечен дипломами на XVI конференции молодых учёных «Навигация и управление движением» (г. С.-Петербург, диплом I степени) и на XI Всероссийской школе-конференции молодых учёных «Управление большими системами УБС-2014» (г. Арзамас, диплом III степени).

Результаты опубликованы в работах [4] – [9].

Личный вклад автора

Результаты теоретических и практических исследований, выносимые на защиту, принадлежат лично соискателю или получены при его непосредственном участии. Разработка алгоритмов управления по формированию строя группы подвижных объектов и по защите от столкновений между агентами в системе, а также реализация программного обеспечения для проведения моделирования, обработка и анализ полученных результатов, формулировка основных выводов и научных положений принадлежат автору. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит моделирование разработанных методов коррекции инерциальных оценок координат при управлении группой материальных точек на плоскости и анализ полученных результатов.

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 9 работ в печатных изданиях, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК [1-3], 4 работы входят в научную базу РИНЦ [5, 7-9], 1 работа в материалах международной конференции [6].

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения. Работа изложена на 77 страницах, содержит 42 иллюстрации, 6 таблиц. Библиография включает 71 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлен краткий обзор состояния проблем консенсусного управления и предотвращения столкновений при групповом движении агентов, обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, раскрывается научная новизна и практическая ценность полученных результатов, определяются выносимые на защиту положения.

В первой главе решается задача формирования строя группы подвижных объектов. Определяется объект управления для мультиагентной системы и его динамическая модель. Структурные схемы регуляторов продольного, бокового канала и канала крена приведены на рисунках 1-2.

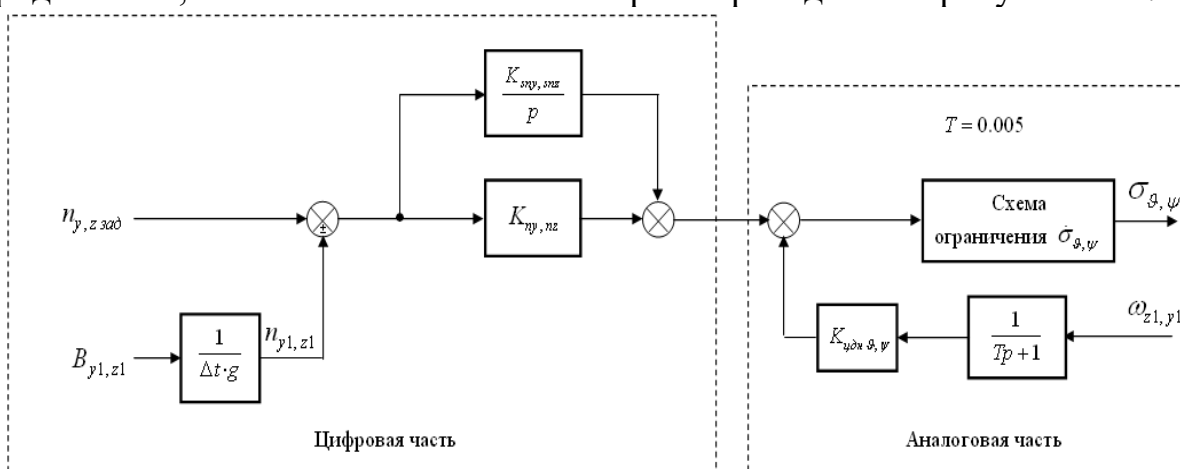


Рис. 1.

Структурная схема регулятора продольного и бокового канала

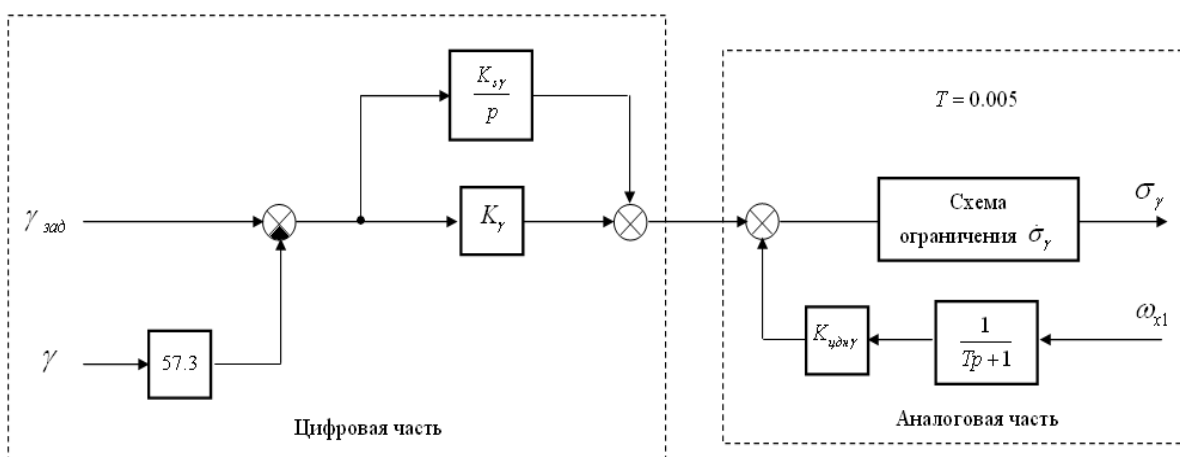


Рис. 2.

Структурная схема регулятора канала крена

Алгоритм управления продольным движением задается в виде:

$$\begin{aligned}
 n_{y \text{ зад}} &= k_h \cdot \Delta h + k_{dh} \cdot v_y + \cos \theta, \\
 \Delta h &= h - h_{\text{зад}},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $n_{y\text{ зад}}$ – заданная перегрузка для продольного канала; h – текущая высота полёта, м; $h_{\text{зад}}$ – заданная высота полёта, м; v_y – проекция скорости, м/с; θ – траекторный угол, рад; k_h , k_{dh} – коэффициенты ПД-регулятора. Соответственно алгоритм управления боковым движением имеет вид

$$n_{z\text{ зад}} = k_z \cdot \Delta z + k_{dz} \cdot v_z, \quad (2)$$

$$\Delta z = z - z_{\text{зад}},$$

где $n_{z\text{ зад}}$ – заданная перегрузка для бокового канала; z – текущее боковое отклонение, м; $z_{\text{зад}}$ – заданное боковое отклонение, м; v_z – проекция скорости, м/с; k_z , k_{dz} – коэффициенты ПД-регулятора.

Для синхронизации в канале тяги (вдоль связанной оси OX_1) предлагается алгоритм, построенный с использованием систем нечеткого логического вывода типа Такаги-Сугено. Входными параметрами алгоритма являются приращения Δx и Δv_x :

$$\Delta x = x - x_{\text{зад}}, \quad (3)$$

$$\Delta v_x = v_x - v_{x\text{ зад}},$$

где x – текущее отклонение по оси OX_1 , м; $x_{\text{зад}}$ – заданное отклонение по оси OX_1 , м; v_x – текущая проекция вектора линейной скорости на ось OX_1 , м/с; $v_{x\text{ зад}}$ – заданная проекция вектора линейной скорости на ось OX_1 , м/с. Выходом алгоритма является коэффициент коррекции тяги k_{kor} .

Решается задача формирования строя, состоящего из 6 гипотетических БПЛА (агентов) (Рисунок 3).

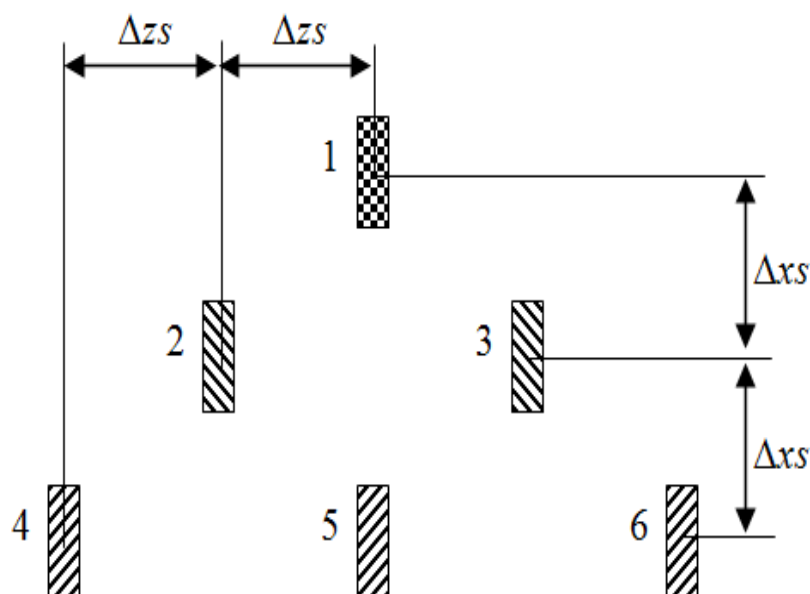


Рис. 3.
Сформированный частный строй

Здесь $\Delta xs=50$ и $\Delta zs=50$ – требуемые расстояния между агентами (в сформированном строе) в канале тяги и боковом канале, м. Пуск объектов производится с носителя поочередно в разные моменты времени. Начальные координаты движения агентов соответствуют координатам носителя в

момент пуска. Каждый объект движется за виртуальным лидером (следует заданной траектории). Результаты моделирования представлены на рисунках 4-6.

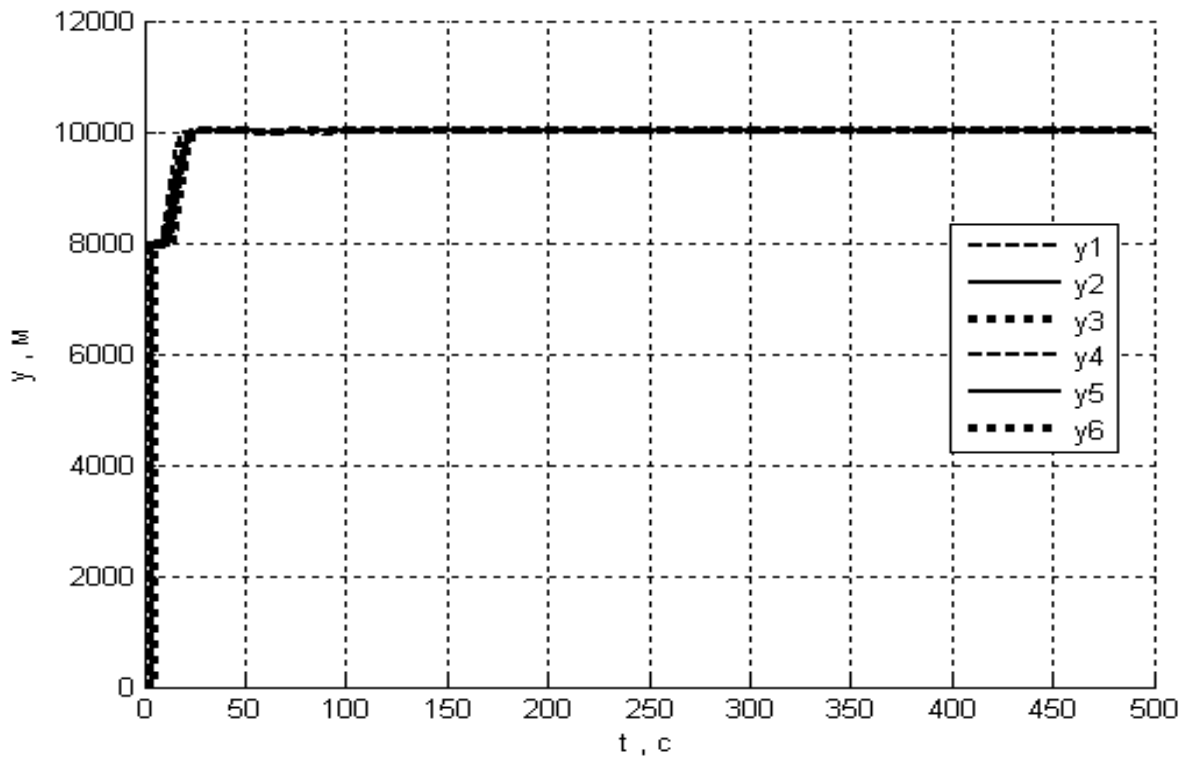


Рис. 4.
Продольный канал

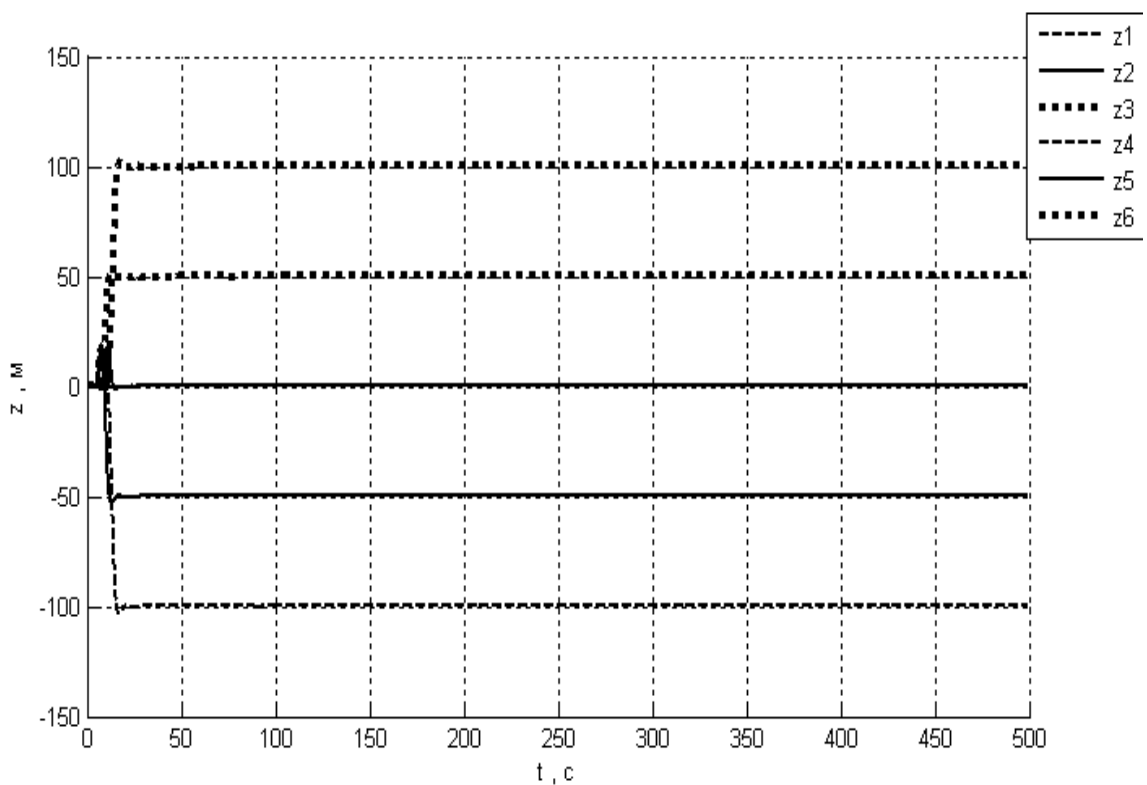


Рис. 5.
Боковой канал

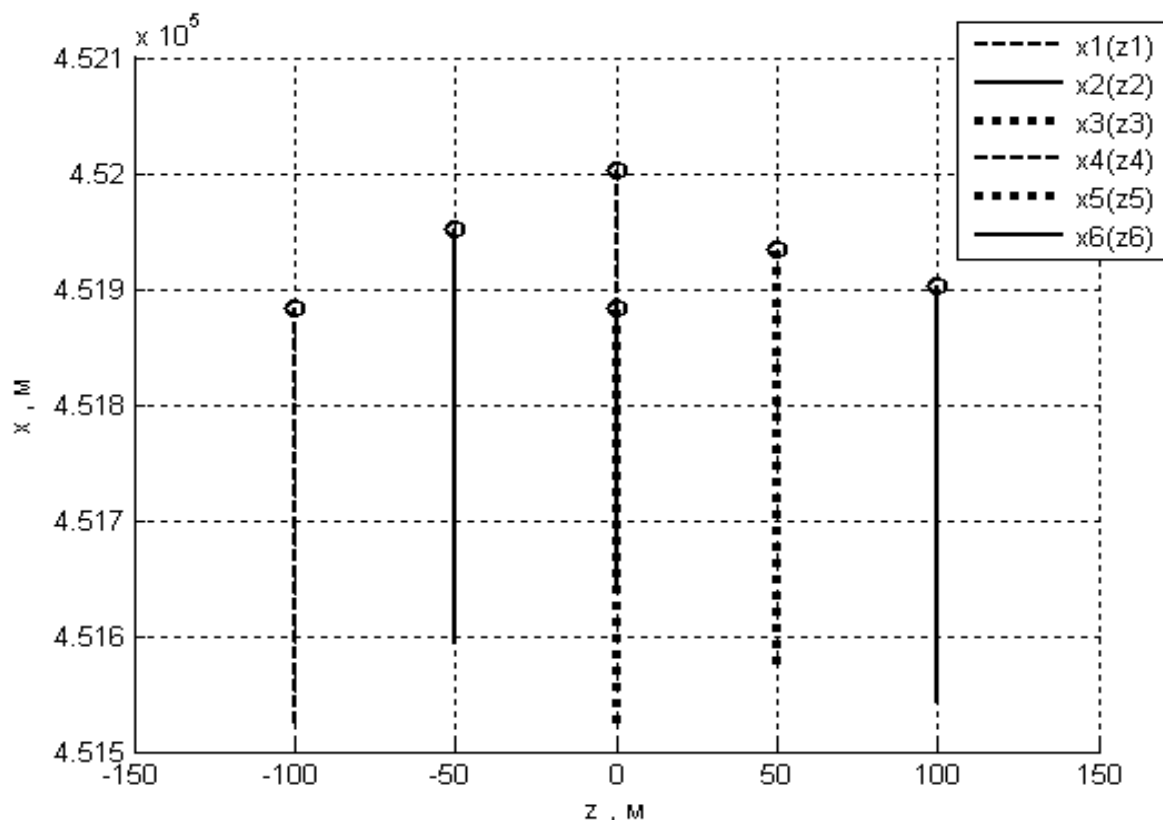


Рис. 6.

Траектории движения в плоскости OZX

Во второй главе рассматривается и решается задача коррекции инерциальных оценок координат при управлении группой подвижных объектов. Объектами управления (агентами) являются материальные точки на плоскости, представляющие собой упрощённые модели БПЛА. Такое представление является адекватным для решения рассматриваемой информационной задачи. Приводятся модели агентов в централизованной и распределённой системах и рассматривается управление мультиагентной системой в рамках упрощённых моделей агентов:

$$\begin{cases} un_i^{(x)}(n) = k_1 \cdot (x_i(n) - x(n)) + k_2 \cdot (v_i^{(x)}(n) - v^{(x)}(n)), \\ un_i^{(y)}(n) = k_1 \cdot (y_i(n) - y(n)) + k_2 \cdot (v_i^{(y)}(n) - v^{(y)}(n)), \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} ud_i^{(x)}(n) = n_{ji}^{(x)}(n) \cdot ((D_{\min} - D_{ji}(n)) + k_2 \cdot V_{ji}(n)), \\ ud_i^{(y)}(n) = n_{ji}^{(y)}(n) \cdot ((D_{\min} - D_{ji}(n)) + k_2 \cdot V_{ji}(n)), \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_i^{(x)}(n) = -(un_i^{(x)}(n) + ud_i^{(x)}(n)), \\ u_i^{(y)}(n) = -(un_i^{(y)}(n) + ud_i^{(y)}(n)), \end{cases} \quad (6)$$

где $k_1 = 1$, $k_2 = 5$ – коэффициенты ПД-регулятора; $[un_i^{(x)}(n), un_i^{(y)}(n)]^T$ – управляющее воздействие для минимизации невязки координат; $D_{ji}(n) = \sqrt{(x_j(n) - x_i(n))^2 + (y_j(n) - y_i(n))^2}$ – расстояние между j и i объектами

на n -й итерации; $\left[n_{ji}^{(x)}(n) = \frac{x_j(n) - x_i(n)}{D_{ji}}, n_{ji}^{(y)}(n) = \frac{y_j(n) - y_i(n)}{D_{ji}} \right]^T$ – нормы

невязок траекторных координат;
 $V_{ji}(n) = (v_j^{(x)}(n) - v_i^{(x)}(n)) \cdot n_{ji}^{(x)}(n) + (v_j^{(y)}(n) - v_i^{(y)}(n)) \cdot n_{ji}^{(y)}(n)$ – модуль вектора
 рассогласования скоростей; $[ud_i^{(x)}(n), ud_i^{(y)}(n)]^T$ – управляющее воздействие
 для ограничения минимального расстояния, на которое могут сблизиться j и i
 объекты. На рисунке 7 показаны траектории и мгновенные позиции объектов,
 полученные с помощью алгоритма формирования строя (4)–(6).

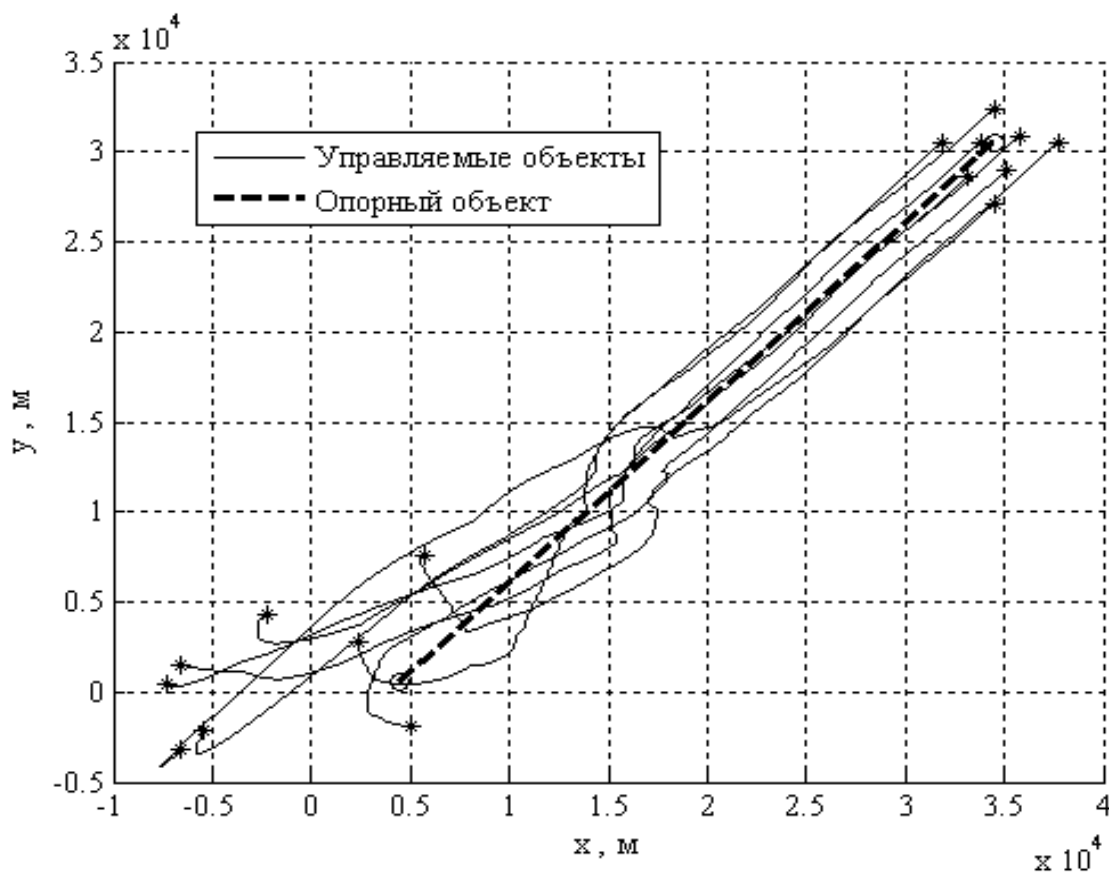


Рис. 7.

Траектории управляемых объектов и опорного объекта

Далее решается задача построения распределённой вычислительной системы, обеспечивающей формирование качественной и достоверной информации о взаимном положении агентов, а также её использование при управлении строем. Для этого были рассмотрены и численно промоделированы несколько алгоритмов коррекции: градиентный метод с фиксированным шагом, централизованный и распределённый наблюдатели, использующие фильтр Калмана. Инерциальные оценки формировались по уравнениям объекта, используя известные управляющие воздействия. Начальное состояние каждого объекта формировалось с неопределенностями. Результаты моделирования представлены на рисунках 8-10.

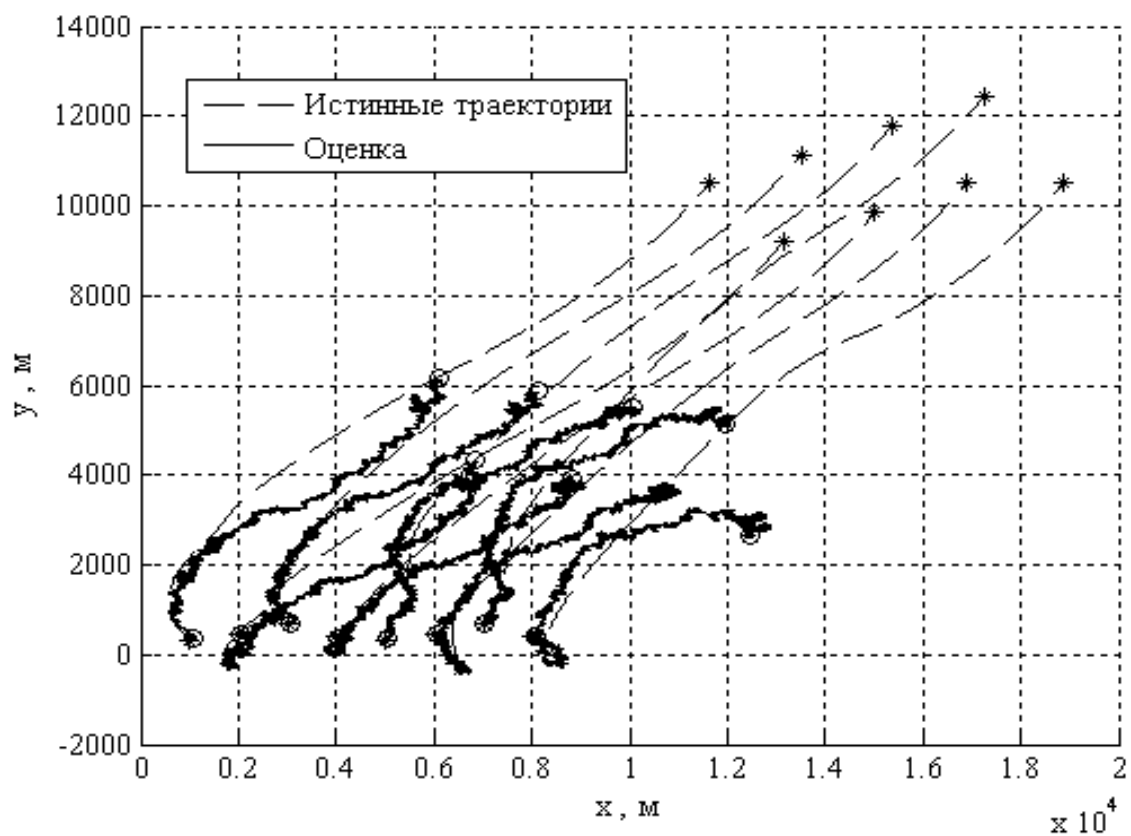


Рис. 8.
Градиентный метод с фиксированным шагом

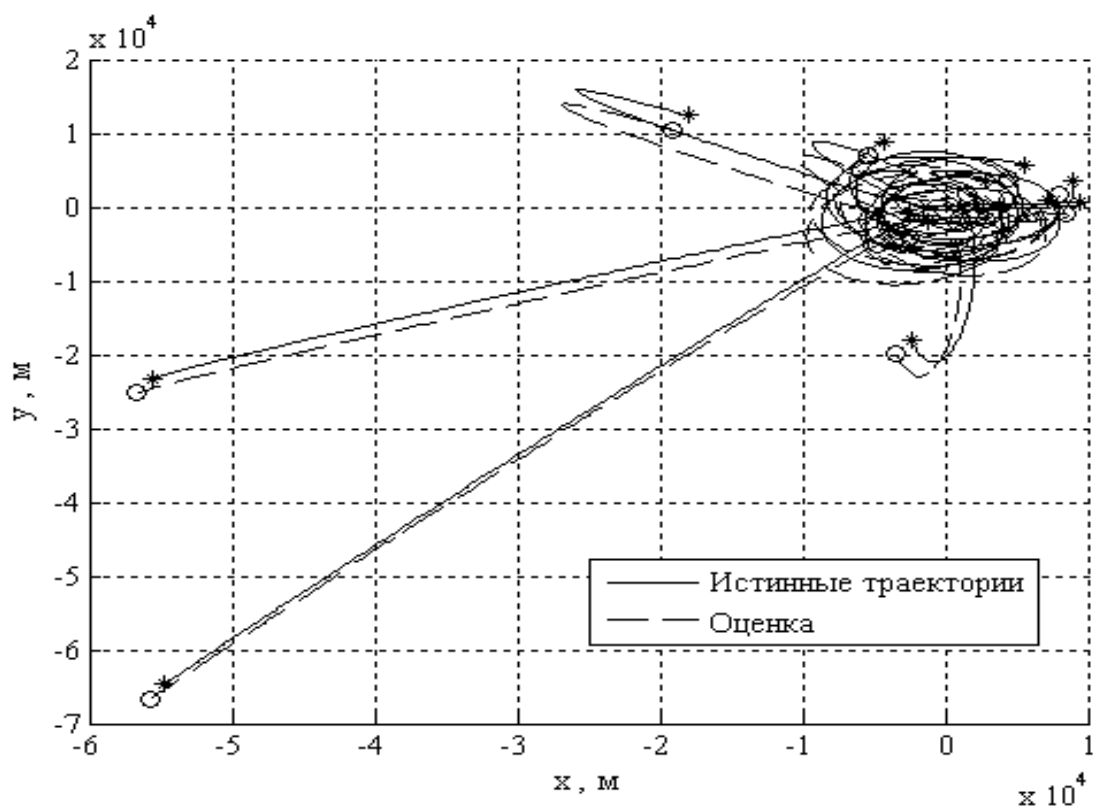


Рис. 9.
Централизованный наблюдатель,
использующий фильтр Калмана

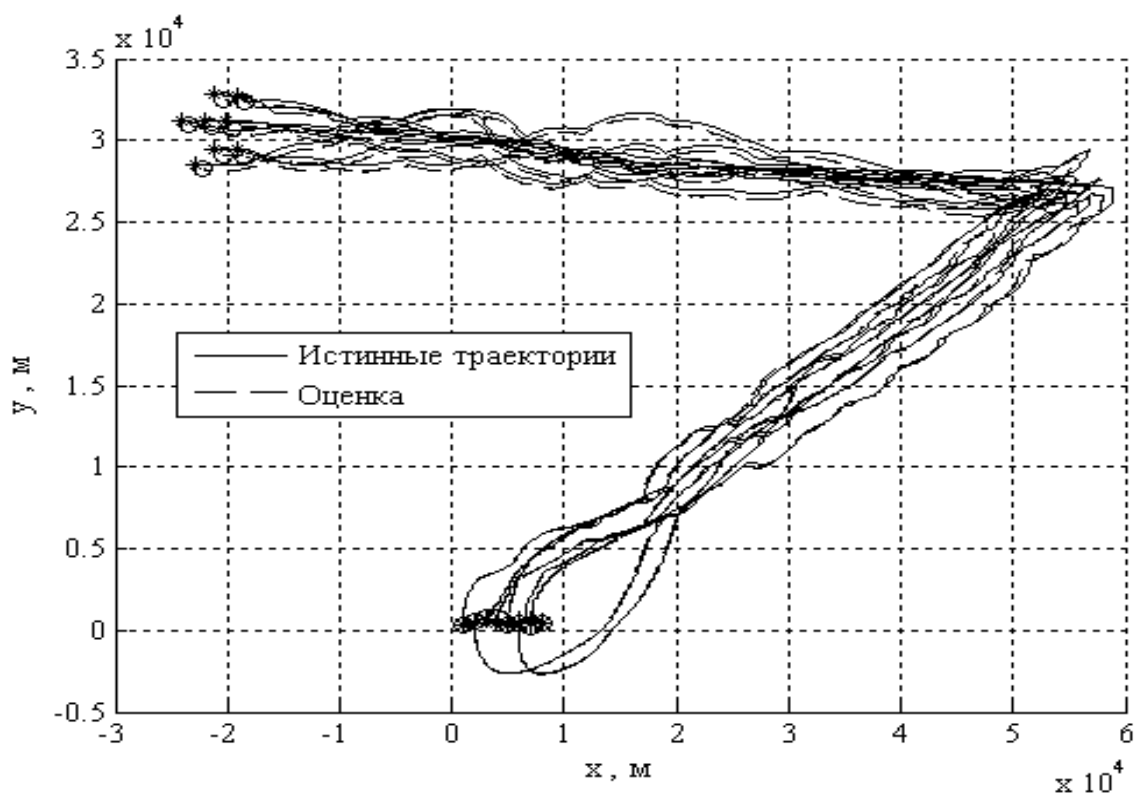


Рис. 10.

Распределенный наблюдатель, использующий фильтр Калмана

В третьей главе реализуется стратегия предотвращения столкновений гипотетических БПЛА между собой при формировании строя. Эта стратегия основана на развитии метода искусственного потенциального поля.

Рассматривается N гипотетических беспилотных летательных аппаратов. Согласно 1 главе пуск объектов производится с носителя поочередно в разные моменты времени. Начальные координаты движения объектов соответствуют координатам носителя в момент пуска. Каждый объект движется за виртуальным лидером (следует заданной траектории). Алгоритмы управления продольным, боковым движением и движением в канале тяги выводят БПЛА на заданные координаты относительно виртуального лидера, что приводит к формированию строя, но не гарантирует защиту от взаимных столкновений. В процессе формирования строя объекты управления должны избегать столкновения между собой. В частности каждый агент должен стремиться выйти на заданную позицию, не допуская при этом опасного сближения с соседними агентами. Заданная позиция определяется исходя из геометрической формы строя БПЛА.

Суть метода искусственного потенциального поля заключается в том, что при обнаружении риска столкновения между агентами в системе управления каждого агента автоматически формируются управляющие сигналы для продольного, бокового канала и канала тяги, в результате чего объекты управления выходят на безопасное расстояние друг относительно

друга. Как показано на рисунке 11, область безопасности задаётся относительно центра масс БПЛА и представлена в виде сферы с радиусом R .

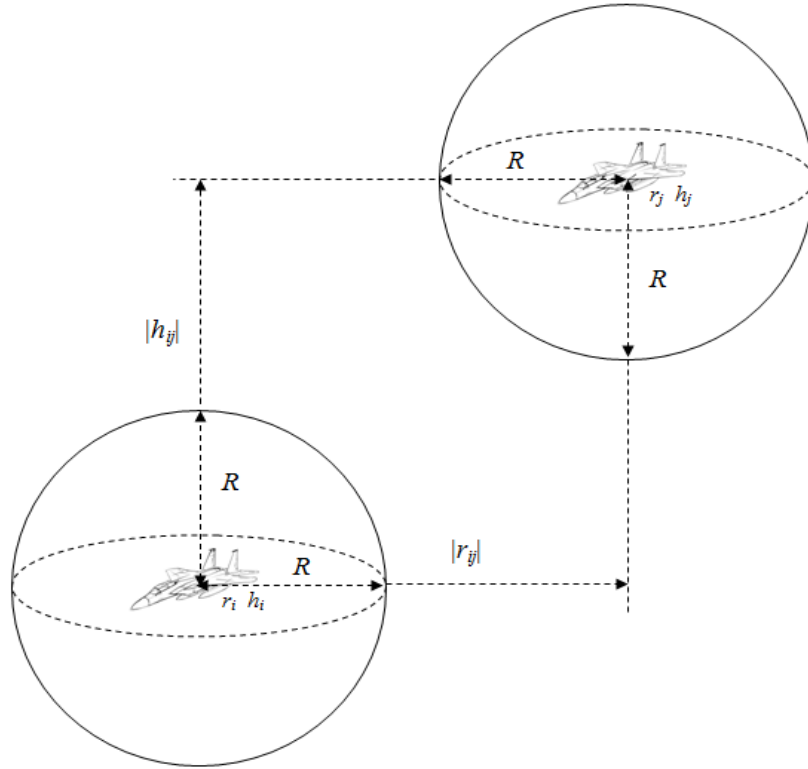


Рис. 11.
Области безопасности БПЛА

Рассматривается алгоритм защиты от столкновений для продольного канала. Согласно рисунку 11 r_i и h_i - позиция в горизонтальной плоскости и высота, на которой расположен i -ый агент, $|r_{ij}|$ и $|h_{ij}|$ - относительное расстояние в горизонтальной плоскости и отклонение по высоте между i -ым и j -ым агентами соответственно:

$$\begin{aligned} |r_{ij}| &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \\ |h_{ij}| &= |h_i - h_j|, \\ i, j &\in \{1, \dots, N\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для бокового канала и канала тяги получены следующие выражения:

$$\begin{aligned} |s_{ij}| &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (h_i - h_j)^2}, \\ |z_{ij}| &= |z_i - z_j|, \\ i, j &\in \{1, \dots, N\}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} |d_{ij}| &= \sqrt{(h_i - h_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \\ |x_{ij}| &= |x_i - x_j|, \\ i, j &\in \{1, \dots, N\}, \end{aligned} \quad (9)$$

где s_i и z_i – позиция в вертикальной плоскости и боковое отклонение, на котором расположен i -ый агент; $|s_{ij}|$ и $|z_{ij}|$ – относительное расстояние в вертикальной плоскости и боковое отклонение между i -ым и j -ым агентами; d_i и x_i – позиция в вертикальной плоскости и отклонение в канале тяги, на котором расположен i -ый агент; $|d_{ij}|$ и $|x_{ij}|$ – относительное расстояние в вертикальной плоскости и отклонение в канале тяги между i -ым и j -ым агентами.

Искусственные потенциальные поля, создаваемые агентами i и j , определяются следующим образом:

$$U_{hij} = \begin{cases} K_h \cdot \left(\frac{1}{|h_{ij}|+1} - \frac{1}{2R+1} \right)^2, & (|h_{ij}| \leq 2R) \wedge (|r_{ij}| \leq 2R) \\ 0, & (|h_{ij}| > 2R) \vee (|r_{ij}| > 2R) \end{cases} \quad (10)$$

$$U_{zij} = \begin{cases} K_z \cdot \left(\frac{1}{|z_{ij}|+1} - \frac{1}{2R+1} \right)^2, & (|z_{ij}| \leq 2R) \wedge (|s_{ij}| \leq 2R) \\ 0, & (|z_{ij}| > 2R) \vee (|s_{ij}| > 2R) \end{cases} \quad (11)$$

$$U_{xij} = \begin{cases} K_x \cdot \left(\frac{1}{|x_{ij}|+1} - \frac{1}{2R+1} \right)^2, & (|x_{ij}| \leq 2R) \wedge (|d_{ij}| \leq 2R) \\ 0, & (|x_{ij}| > 2R) \vee (|d_{ij}| > 2R) \end{cases} \quad (12)$$

где U_{hij} , U_{zij} , U_{xij} – потенциалы искусственных полей в продольном, боковом каналах и канале тяги для i -го и j -го агентов; K_h , K_z , K_x – положительные коэффициенты усиления, определяющие допустимый уровень отклонения агента от границы области безопасности.

В рамках движения группы гипотетических БПЛА на основе полных нелинейных моделей каждого агента проводится моделирование алгоритма предотвращения столкновений между объектами управления на основе соотношений (10) – (12).

На первом этапе было проведено моделирование алгоритма предотвращения столкновений для каждого канала отдельно. На протяжении всего времени полёта агенты движутся по заданным координатам относительно виртуального лидера, формируя при этом строй. Затем выбираются два БПЛА, координаты которых отличаются между собой только по одному каналу, и в определённый момент один из агентов производит отклонение в сторону другого. Тем самым возникает риск столкновения БПЛА, которое система управления должна предотвратить.

Результаты моделирования представлены на рисунках 12-16. Рисунки 12 и 15 демонстрируют защиту от столкновений в боковом и продольном каналах соответственно (сплошная линия – траектория агента 1, пунктирная

линия – траектория агента 2). Видно, что при опасном сближении траектории начинают расходиться. На рисунках 13, 14 и 16 можно наблюдать ненулевое расстояние между двумя агентами в боковом канале, канале тяги и продольном канале.

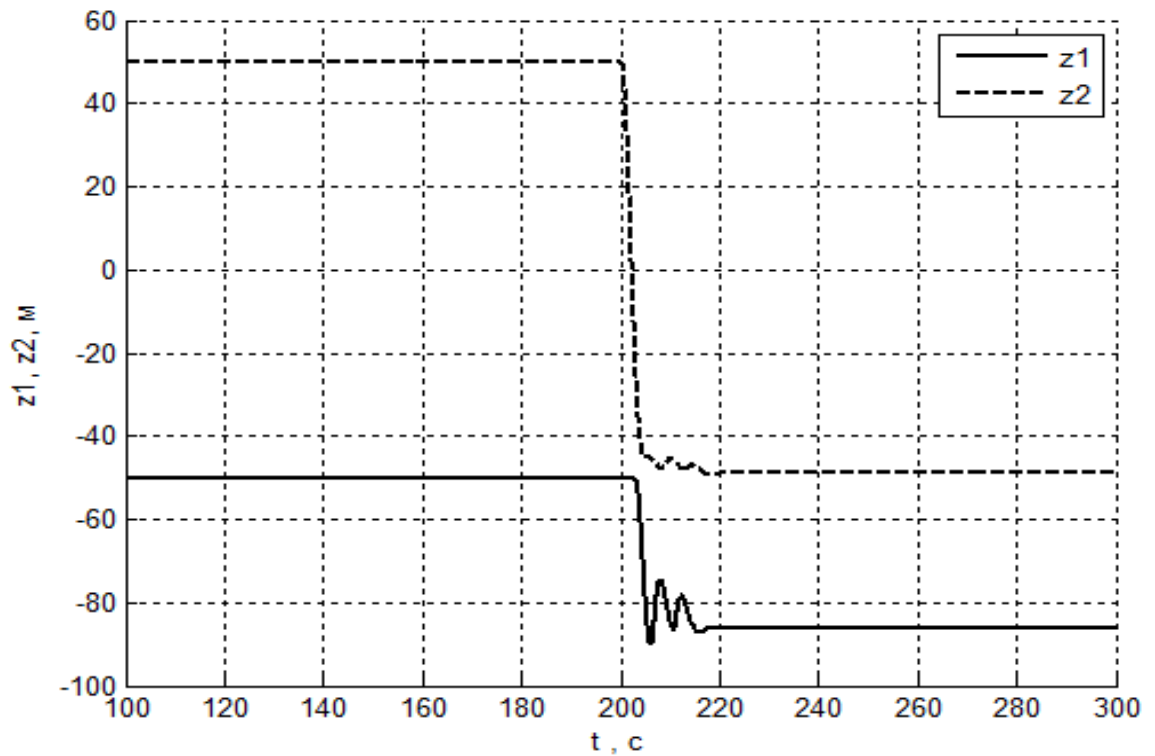


Рис. 12.
Боковой канал

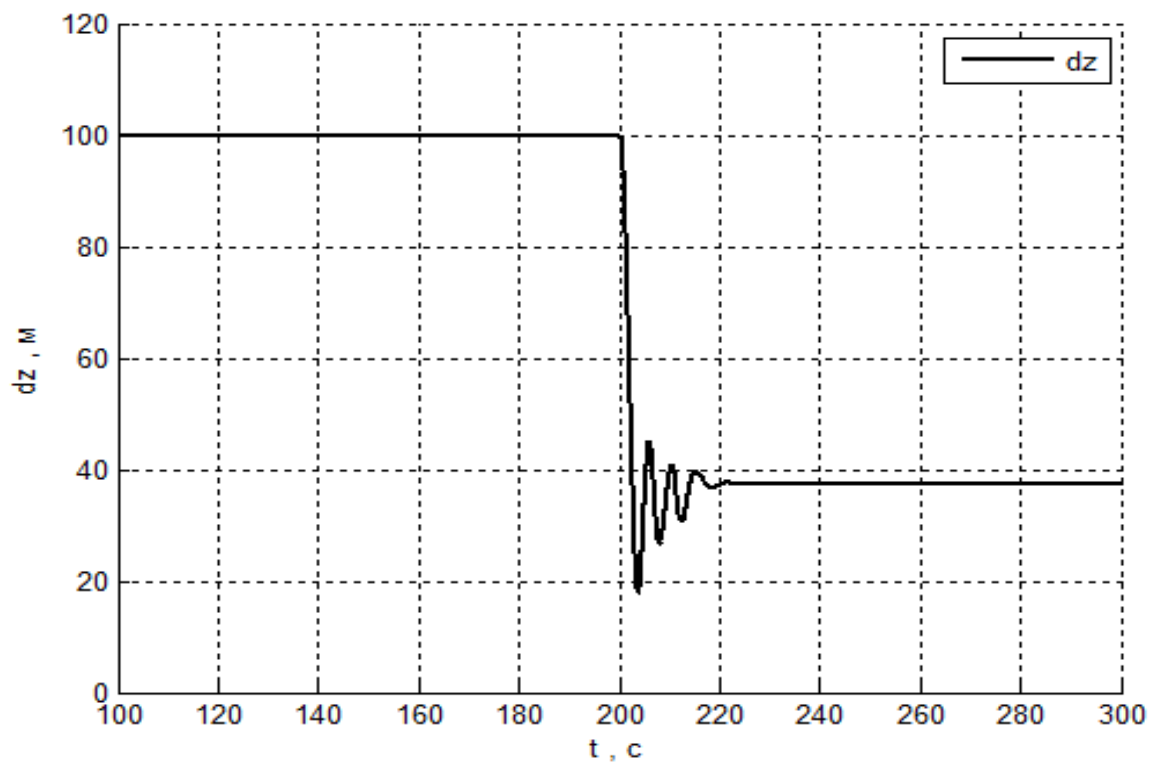


Рис. 13.
Расстояние между агентами в боковом канале

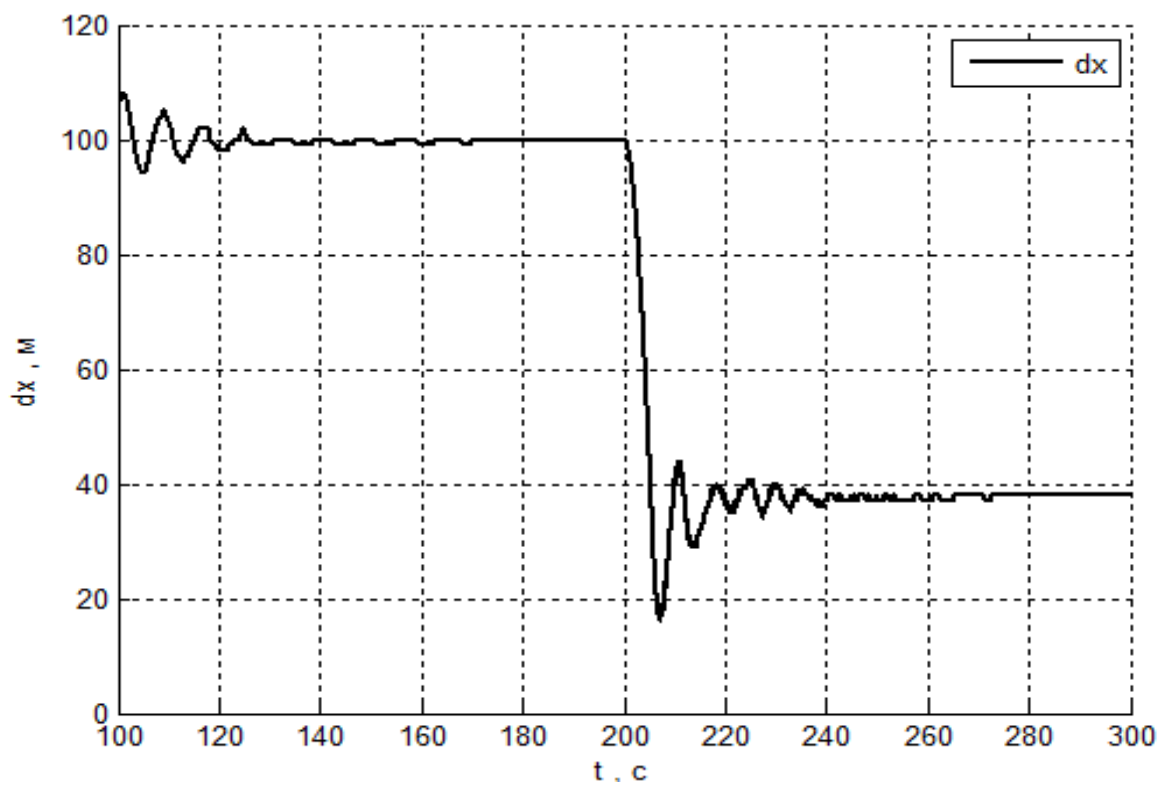


Рис. 14.

Расстояние между агентами в канале тяги

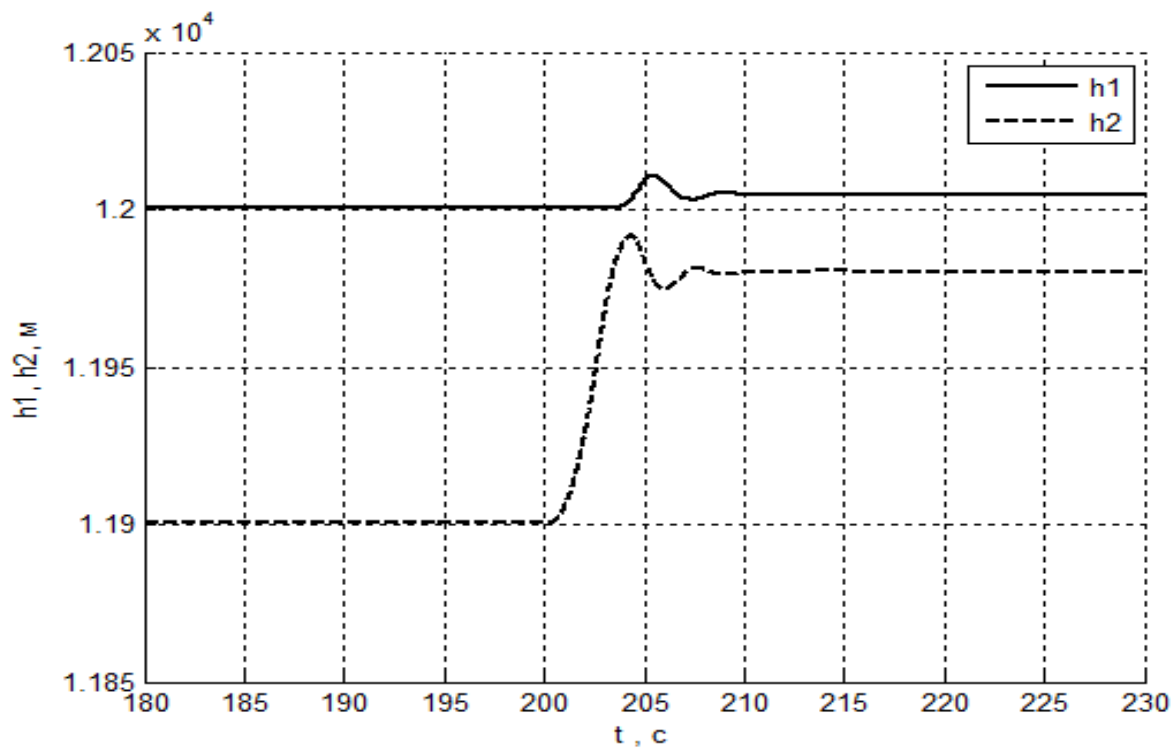


Рис. 15.

Продольный канал

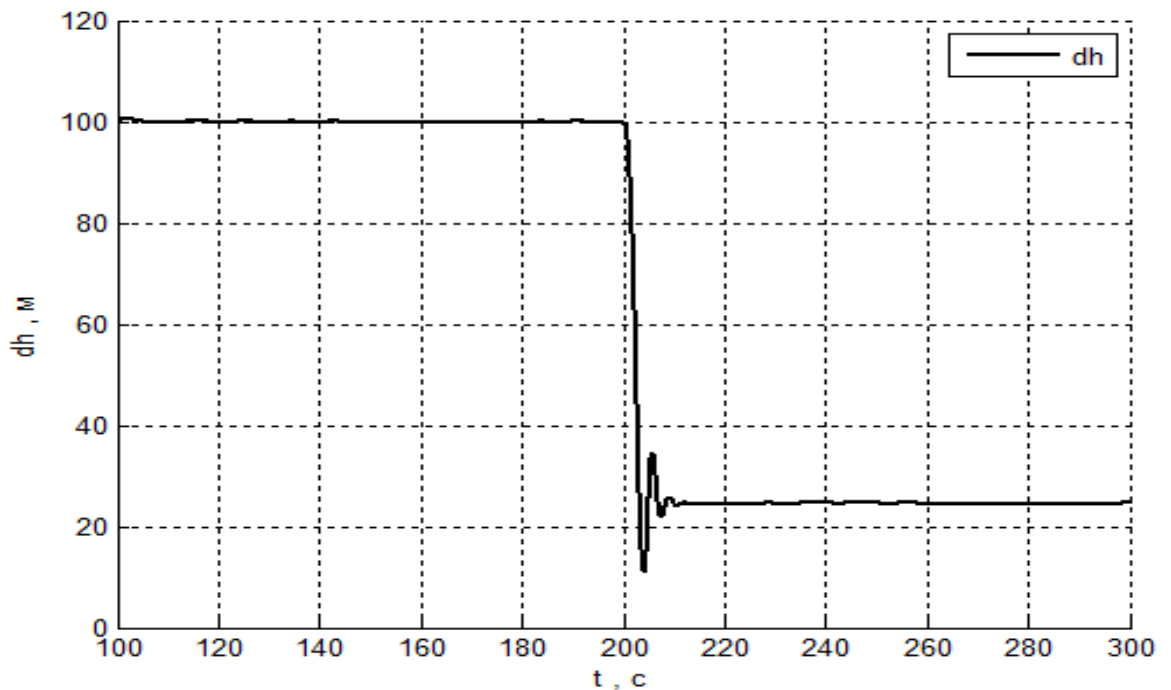


Рис. 16.

Расстояние между агентами в продольном канале

На втором этапе была промоделирована работа алгоритмов предотвращения столкновений для всех каналов одновременно. Рассматривались 3 агента, которые на протяжении всего времени полёта двигались по заданным координатам относительно виртуального лидера, формируя при этом строй. Затем в определённый момент времени 2 и 3 агента производят отклонение в сторону 1. Тем самым возникает риск столкновения БПЛА, которое система управления должна предотвратить.

Результаты моделирования представлены на рисунках 17-19. На этих рисунках можно наблюдать графики ненулевых расстояний между агентами. Видно, что в определённый момент времени агенты начинают опасное сближение, но система управления своевременно выводит их на безопасное расстояние, которое затем стабилизируется.

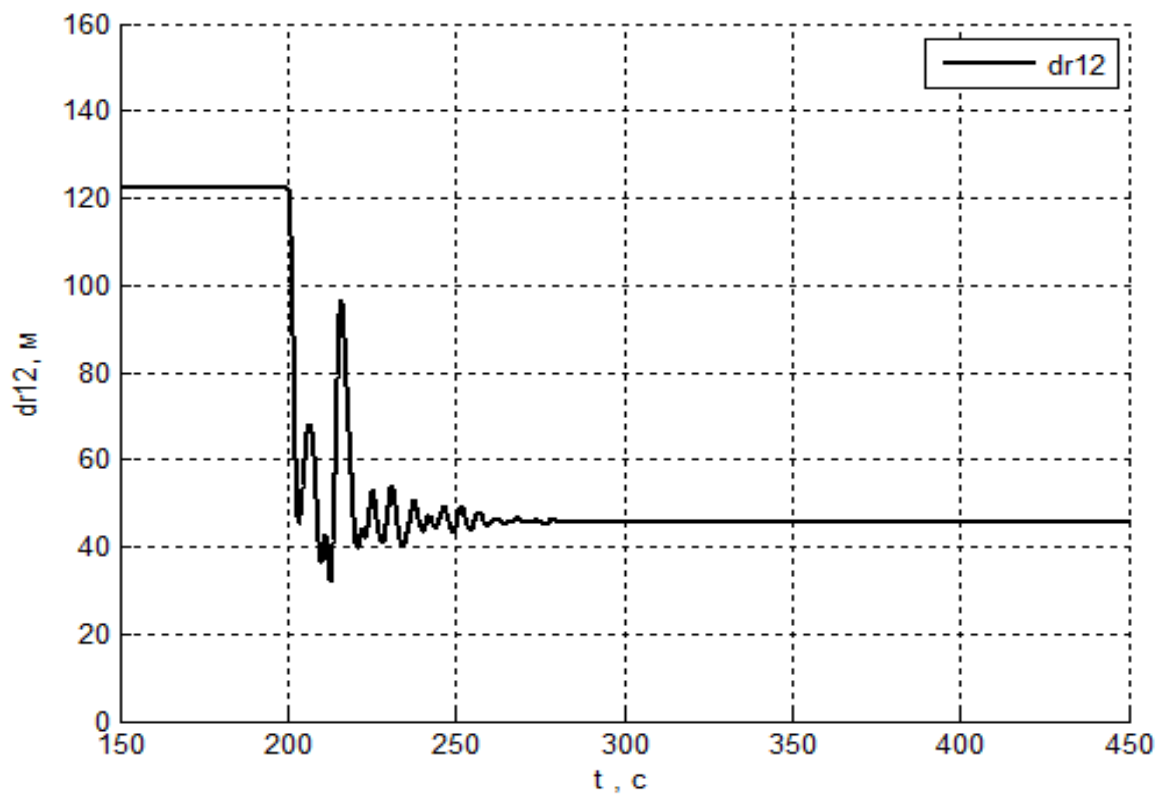


Рис. 17.
Расстояние между 1 и 2 агентами

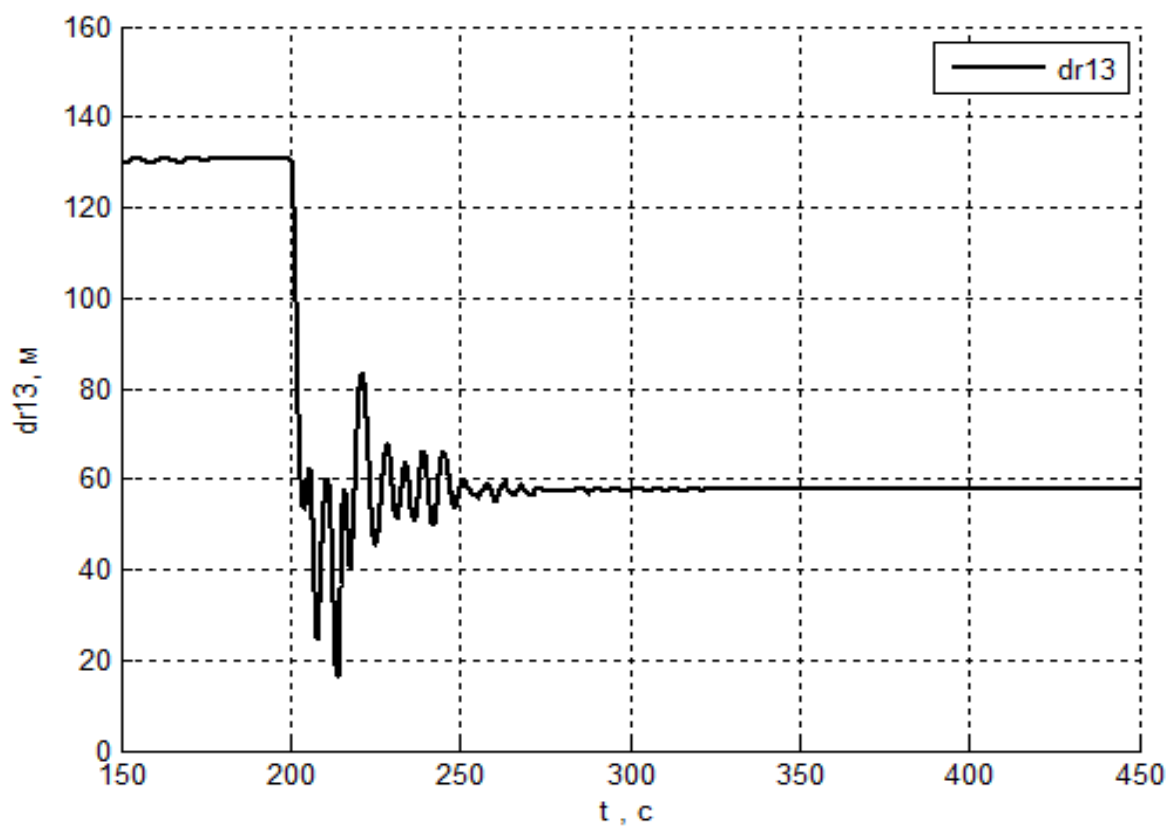


Рис. 18.
Расстояние между 1 и 3 агентами

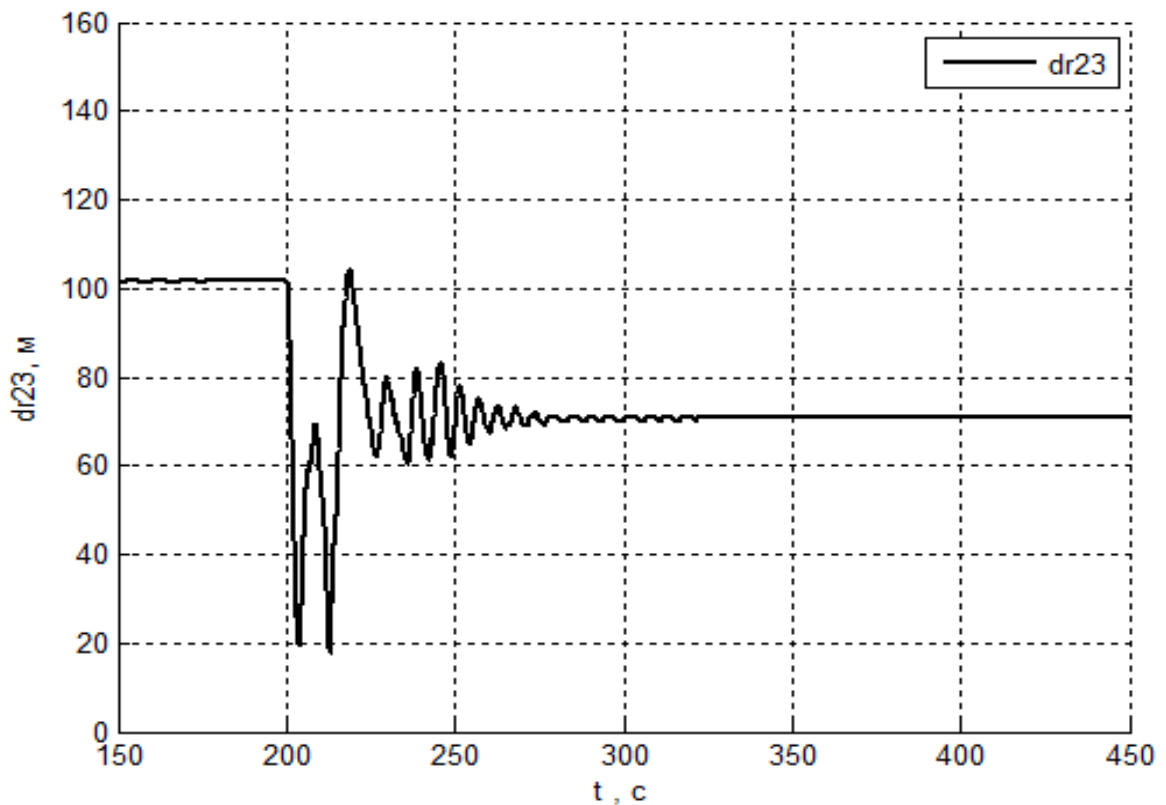


Рис. 19.
Расстояние между 2 и 3 агентами

В заключении формулируются основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие новые результаты.

1. в рамках предложенного метода решения задачи формирования строя БПЛА разработан частный алгоритм слежения за виртуальным лидером с последующим формированием строя БПЛА на основе их полных моделей;

2. предложены методы коррекции инерциальных оценок координат при управлении группой БПЛА в рамках упрощенных моделей в виде материальных точек на плоскости. Показана возможность компенсации ошибок задания местоположения и скорости в рамках таких моделей;

3. разработан метод и алгоритм защиты от столкновений БПЛА между собой в процессе формирования строя.

Результаты моделирования на основе полных нелинейных моделей БПЛА подтверждают работоспособность предложенного метода формирования строя с предотвращением столкновений. Предложенные алгоритмы формирования строя БПЛА и защиты агентов от взаимных столкновений могут быть применены для решения задачи наведения группы БПЛА на заданную цель, в которой формирование строя является первым подготовительным этапом.

Таким образом, поставленные задачи решены. В качестве перспективы дальнейших исследований следует отметить задачу изменения конфигурации строя БПЛА, а также исследование разработанных методов коррекции инерциальных оценок координат при управлении группой БПЛА с учетом полных моделей их динамики.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Казанин, Д. К. Защита от взаимных столкновений при формировании строя беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] / Д. К. Казанин // Управление большими системами. — М.: ИПУ РАН, 2017. — № 69. — Режим доступа: http://ubs.mtas.ru/archive/index.php?iblock_id=20§ion_id=858, свободный.

2. Казанин, Д. К. Методы коррекции инерциальных оценок координат при управлении группой подвижных объектов [Электронный ресурс] / Р. В. Белов, Д. К. Казанин, К. О. Огородников // Управление большими системами. — М.: ИПУ РАН, 2015. — № 53. — С. 76–95. — Режим доступа: http://ubs.mtas.ru/archive/search_results_new.php?publication_id=19841, свободный.

3. Казанин, Д. К. Частный алгоритм управления мультиагентной системой / Д. К. Казанин // Авиакосмическое приборостроение. — М.: ООО «Научтехлитиздат», 2015. — № 11. — С. 27–34.

Публикации в других научных изданиях:

4. Казанин, Д. К. Алгоритмы управления строем группы подвижных объектов / Д. К. Казанин // Гироскопия и навигация. — С.-Петербург: ГНЦ РФ АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2014. — № 2. — С. 141.

5. Казанин, Д. К. Алгоритмы управления строем группы подвижных объектов / Д. К. Казанин // Материалы XVI конференции молодых учёных «Навигация и управление движением» (РИНЦ). — С.-Петербург: ГНЦ РФ АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2014. — С. 413–424.

6. Казанин, Д. К. Методы коррекции инерциальных оценок координат при управлении группой подвижных объектов / Р. В. Белов, Д. К. Казанин, К. О. Огородников // Материалы XX Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2014)». — Н. Новгород: НГТУ, 2014. — С. 309–310.

7. Казанин, Д. К. Управление группой гипотетических летательных аппаратов / Д. К. Казанин // Сборник докладов X Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» (РИНЦ). — М.: Изд-во МАИ, 2015. — С. 83–87.

8. Казанин, Д. К. Управление группой гипотетических летательных аппаратов / Д. К. Казанин // Тезисы докладов Второй Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление

летательными аппаратами» (РИНЦ). — М.: ООО «Научтехлитиздат», 2015. — С. 41–43.

9. Казанин, Д. К. Частный алгоритм управления мультиагентной системой [Электронный ресурс] / Д. К. Казанин // Материалы XI Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Управление большими системами» (РИНЦ). — М.: ИПУ РАН, 2014. — С. 1028–1038. — Режим доступа: <http://www.ipu.ru/sites/default/files/youngUBS2014.zip>, свободный.