УДК 004.7
DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.036

# О децентрализованном решении задачи одновременного прибытия автономных мобильных объектов к финальной точке с использованием анализа больших данных

**И.А. Черноиваненко✉, О.Я. Кравец**

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация*

***Резюме.*** Необходимость перехода к более совершенным методам управления при использовании обычного автономного мобильного объекта (АМО) для контроля одновременного прибытия возникает ввиду чрезмерного отклонения. Инновационным решением данной проблемы является использование децентрализованного метода управления для контроля одновременного прибытия АМО к финальной точке, который основан на анализе больших данных. Было предложено решение для объединения децентрализованной информации посредством использования фильтрации, на основе которой осуществляется управление децентрализованной координацией формирований. В статье представлены основные характеристики АМО, показаны параметры объединения информации о АМО, описано децентрализованное координационное управление формированием и произведено вычисление оптимального пути и скорости сходимости для децентрализованного управления, а также учтены ограничения на задержку связи. Было проведено экспериментальное исследование ошибок в направлении *x* предлагаемым методом и сравнение с ошибками в эксперименте без использования данного метода управления. Также представлены графики сравнения скорости сходимости. Результаты эксперимента показали, что децентрализованный метод управления оказывает значительное влияние на определение цели АМО и сходимость ошибок. Благодаря предлагаемому подходу удалось повысить эффективность управления и снизить ошибки, тем самым, доказана целесообразность использования данного метода управления.

***Ключевые слова:*** анализ больших объемов данных, автономные мобильные объекты, децентрализованное управление, фильтрация информации, координационное управление формированием.

***Для цитирования:*** Черноиваненко И.А., Кравец О.Я. О децентрализованном решении задачи одновременного прибытия автономных мобильных объектов к финальной точке с использованием анализа больших данных. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(4). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1768 DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.036

# About a decentralized solution to the problem of simultaneous arrival of autonomous mobile objects to the final point using large data analysis

**I.A. Chernoivanenko✉, O.Ja. Kravets**

*Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation*

***Abstract.*** The need to switch to more advanced control methods when using a conventional autonomous mobile facility (AMO) to control simultaneous arrivals arises due to excessive deviation. An innovative solution to this problem is the use of a decentralized management method to control the simultaneous arrival of the AMO to the final point, which is based on the analysis of big data. A solution was proposed to combine decentralized information through the use of filtering, on the basis of which the decentralized

© Черноиваненко И.А., Кравец О.Я., 2024 

coordination of formations is managed. The article presents the main characteristics of AMO, shows the parameters of combining information about AMO, describes decentralized coordination management of formation and calculates the optimal path and convergence rate for decentralized management, and also takes into account restrictions on communication delay. An experimental study of errors in the *x* direction by the proposed method was carried out and compared with errors in the experiment without using this control method. Graphs comparing the convergence rate are also presented. The results of the experiment showed that the decentralized management method has a significant impact on the definition of the aim of AMO and the convergence of errors. Thanks to the proposed approach, it was possible to increase the efficiency of management and reduce errors, thereby proving the expediency of using this management method.

***Keywords:*** large data analysis, autonomous mobile objects, decentralized management, information filtering, coordination management of formation.

***For citation:*** Chernoivanenko I.A., Kravets O.Ja. About a decentralized solution to the problem of simultaneous arrival of autonomous mobile objects to the final point using large data analysis. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(4). (In Russ.). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1768 DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.036

## Введение

Большие данные характеризуются высокой скоростью, множеством типов, ценностью и достоверностью. Большие данные – это самый популярный термин в ИТ-индустрии, и последующее использование хранилищ данных, защита данных, интеллектуальный анализ данных, связанные с коммерческой ценностью больших данных, постепенно стали предметом использования различными областями применения [1]. Например, обмениваясь данными, клиенты снижают уровень конфиденциальности при их использовании, ожидая, что компании сформируют соответствующие взаимодействия и обеспечат бесперебойную работу во всех точках соприкосновения. С популяризацией технологии анализа больших данных постепенно внедряются в работу автономных мобильных объектов. Автономные мобильные объекты (АМО) – это объекты, управляемые с помощью оборудования дистанционного радиоуправления и автономных программных управляющих устройств, или полностью / периодически автономно управляемые компьютерами. При одновременной работе нескольких АМО возникает множество проблем из-за неправильной координации. Например, при выполнении задач координации нескольким АМО часто требуется одновременно достичь одинаковых / разных целевых местоположений, или нескольким АМО приходится перемещаться из разных мест. АМО собираются в определенном месте, образуя плотный рой. Эта проблема изучалась во многих областях, однако, по сравнению с другими аппаратными средствами, АМО имеют свои уникальные характеристики и области применения. Они перемещаются в трехмерном пространстве, у них есть определенный предел скорости, и они не могут останавливаться, ждать или отступать. Имеется возможность увеличить длину траектории, а также регулировать скорость перемещения в пределах допустимого диапазона. В работе [2] предлагается подход управления автономным мобильным объектом, основанный на усилении обратной связи по ускорению. Благодаря данному методу реализовано управление с обратной связью по угловой и линейной скоростям на основе оригинальной структуры контроллера АМО, что улучшает возможности АМО по подавлению помех. Однако эффективность этого метода управления по-прежнему нуждается в дальнейшем совершенствовании.

Чтобы решить проблему одновременного прибытия АМО, был внедрен децентрализованный метод управления. В нем используются основные конструктивные идеи децентрализованного управления, эксплуатации, многоуровневой иерархической

системы взаимодействия и автономной структуры. Его главной особенностью является централизованное управление и децентрализованный контроль. Одновременное прибытие нескольких АМО – это типичная проблема совместного управления, которая обычно включает в себя два аспекта исследовательского содержания: первый – планирование траектории, то есть маршрут планируется для каждого АМО в условиях ограничений окружающей среды и ограничений сотрудничества; второй – управление траекторией, то есть управление курсом и скоростью АМО, чтобы он мог одновременно достичь заданной позиции по запланированному пути. Этот метод позволяет получить глобальное оптимальное решение, но, по сути, реализует централизованное управление. При расчете параметров координации необходимо получить информацию о функциях координации всех АМО. Когда некоторые АМО подвергаются внезапным угрозам, они должны пересматривать план маршрута.

## Разработка децентрализованного метода управления АМО

Предполагается, что в ходе выполнения определенной миссии ожидается, что $n$ АМО одновременно прибудут в заранее определенные целевые позиции $k$, где $n \leq k \leq 1$. Начальное положение АМО – это фактическое положение его в текущий момент времени, которое может быть произвольно распределено в пространство. Каждый АМО имеет определенную целевую позицию. Целевые позиции разных АМО могут быть одинаковыми или разными. Кроме того, предполагается, что АМО может получать информацию об угрозах и препятствиях заранее или в режиме реального времени, а также может самостоятельно планировать путь в автономном режиме или онлайн, давать оценки длины пути и автономно перемещаться по запланированному пути. Цель роя АМО – найти метод управления или стратегии для достижения вышеуказанных целей и избегать воздействия неблагоприятных факторов (например, ошибки в траектории, внезапные угрозы) [3]. Поскольку траектория и скорость перемещения АМО не являются фиксированными, можно гарантировать, что он прибудет в одно и то же время, регулируя длину траектории и скорость перемещения. АМО рассматривается как частица, движущаяся в двумерной плоскости. Упрощенная модель движения АМО представлена следующим образом:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ \theta_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cos\theta_i \\ sin\theta_i \\ 0 \end{pmatrix} v_i + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} w_i, i \in \{1,2,\dots,n\}, \quad (1)$$

где $i \in \{1,2,\dots,n\}$ – номер АМО, $(x_i, y_i)$ – положение АМО $i$, $\theta_i$ – угол направления движения АМО $i$. Входными управляющими переменными являются линейная скорость $v_i$ и угловая скорость $w_i$ АМО $i$. Пусть $v_i = (x_i, y_i), w_i = (u_{xi}, u_{yi})$, тогда уравнение кинематики системы может быть линеаризовано с помощью обратной связи, и может быть получена модель системы в виде интеграла первого порядка:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{xi} \\ u_{yi} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $u_i$ – это виртуальный управляющий вход АМО. Взаимосвязь между виртуальными и фактическими управляющими входными переменными выглядит следующим образом:

$$v_i = \sqrt{u_{xi}^2 + u_{yi}^2}, \quad (3)$$

$$w_i = \frac{u_{xi}\bar{u}_{yi} - u_{yi}\bar{u}_{xi}}{u_{xi}^2 + u_{yi}^2}. \quad (4)$$

Децентрализованная структура управления несколькими АМО, основанная только на локальном информационном взаимодействии, показана на Рисунке 1, где $\theta_i(i \in V)$ – координационная переменная $i$ АМО, и каждый АМО получает только информацию о координационных переменных от своих соседей.

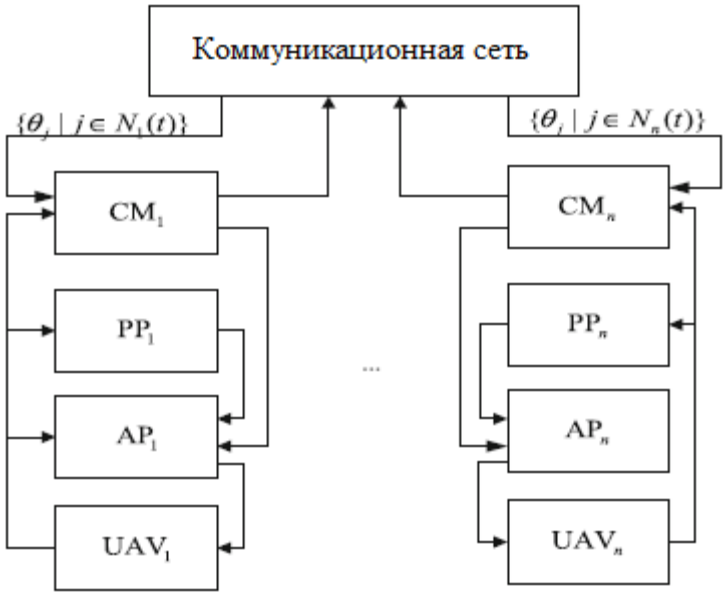



Рисунок 1 – Децентрализованная структура управления
Figure 1 – Decentralized management structure

В децентрализованной структуре управления, показанной на Рисунке 1, все АМО расположены одинаково и соединены направленными коммуникационными соединениями [4]. Среди них самый нижний модуль АМО представляет собой объект управления, который выводит информацию о состоянии наружу. Модуль АР представляет собой систему управления перемещением с функциями поддержания курса и скорости. Он предоставляет интерфейс управления модулем координации ССМ и модулем планирования траектории РР. Модуль планирования маршрута может выполнять планирование маршрута в соответствии со статусом АМО и информацией об окружающей среде, а также выводить инструкции по углу наклона курса в модуль АР, чтобы позволить АМО перемещаться по запланированному маршруту, а также выводить расчетное значение оставшейся длины пути в текущий момент времени в модуль координации.

Модуль координации получает информацию о координационных переменных всех соседей, затем вычисляет инструкции по скорости на основе алгоритма согласованности и выводит их в модуль АР, а также обновляет локальные координационные переменные.

### *Децентрализованное объединение информации*

Для децентрализованного управления АМО, прежде всего, необходимо собирать, подсчитывать и обрабатывать информацию о перемещениях всех целевых АМО, которые должны прибыть в одно и то же время. Параметры АМО, которые необходимо подсчитать, приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры объединения информации о АМО
Table 1 – Parameters for combining information about AMO

| Параметр | Информация |
|---|---|
| Модель АМО | Wing Flying Kenong A6-160 (АМО для защиты сельскохозяйственных растений), Phantom 3 SE, Eagle Trimble UX5 |
| Режим перемещения | Режим GPS: позиционирование с фиксированной точкой, режим ориентации NAZA не оснащен GPS, может перемещаться только в этом режиме. Уровень использования является общим, не может быть фиксированным, но может быть установлен на высоком уровне.<br>Ручной режим позволяет определить, является ли центр тяжести АМО подходящим, при этом нет фиксированной точки и автоматической коррекции ориентации |
| Батарея | Тип и заряд батареи |
| Параметры перемещения | Поддерживаемое время, диапазон скоростей, траектория |
| DTM | Расстояние между точками, точность определения плоскости |

Основная информация о АМО обрабатывается путем фильтрации информации. В зависимости от типа и характеристик, информация делится на линейный и нелинейный анализ. Линейная информация выражается в виде:

$$x(k) = F(k)x(k-1) + G(k)w(k), \tag{5}$$

где $k$ – заранее определенные целевые позиции, $x(k)$ – вектор состояния псевдослоя, $F(k)$ – матрица передачи состояния, $G(k)$ является матрицей передачи входного сигнала с псевдошумами, а $w(k)$ псевдонулевое среднее значение некоррелированного гауссовского белого шума. Нелинейная информация выражается в виде:

$$z(k) = h\big(kx(k)\big) + v(k), \tag{6}$$

где $z(k)$ – измеренное значение; $v(k)$ – нулевое значение, дисперсия которого равна белому шуму Гаусса; $h(kx(k))$ – псевдонелинейная модель измерения.

Фильтр Калмана получает оценку целевого состояния $\chi^2$ с отклонением $P$, в то время как информационный фильтр получает информацию о состоянии $y$ и информацию Фишера $Y$, удовлетворяющую соотношениям:

$$y = P^{-1}x, \tag{7}$$

$$Y = P^{-1}, \tag{8}$$

$$I(k) = H^T(k)B^{-1}(k)H(k), \tag{9}$$

$$i(k) = H^T(k)R^{-1}(k)\Big(z(k) - h\big(x(k|k-1)\big)\Big) + H(k)X(k|k-1), \tag{10}$$

где $i(k)$ – это распределение информационного состояния вектора наблюдений $z(k)$, $I(k)$ – псевдоинформационная матрица. $i(k)$ и $I(k)$ относятся только к измерению

целевого состояния, но не к измерению датчика. При обновлении $x(k|k)$ и $X(k|k)$ децентрализованный алгоритм объединения информации учитывает не только $I(k)$ и $i(k)$ самого АМО, но и коммуникационную информацию близлежащего АМО. Децентрализованный алгоритм объединения информации, основанный на фильтрации информации, может объединять информацию других АМО путем простой алгебраической суммы, поэтому он обладает хорошей масштабируемостью, неоднородностью и возможностью динамической реконфигурации. Алгоритм фильтрации информации обладает хорошей устойчивостью к выбору начальных значений. Когда точные исходные статистические характеристики системы не получены, то для итеративного вычисления могут быть выбраны небольшие ненулевые начальные значения, что позволяет преодолеть проблему чувствительности алгоритма фильтрации Калмана к выбору начальных значений [5].

### *Децентрализованное координационное управление формированием*

Во время перемещения участники роя АМО могут присоединиться в любое время, а АМО может выйти из строя из-за столкновения в одной точке. В этом случае все оборудование АМО необходимо согласовать и сформировать вовремя, чтобы гарантировать, что все АМО смогут прибыть одновременно. Децентрализованная координация управления подразделяется на децентрализованную координацию внутри формирования и децентрализованную координацию между формированиями. Его принцип показан на Рисунке 2.

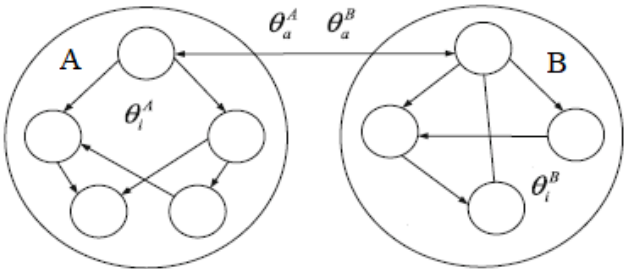



Рисунок 2 – Принцип децентрализации
Figure 2 – The principle of decentralization

Предположим, что $\theta_t(t)(i = 1,2,\dots,n)$ – это согласованная информация о платформе $i$ в момент времени $t$, то есть согласованная переменная, если она удовлетворяет требованиям:

$$\lim_{t\to\infty}\left\|\theta_i(t) - \theta_j(t)\right\| = 0\left(\forall\theta_i(0),\theta_j(0),i,j \in n\right). \tag{11}$$

Платформа $i$ и платформа $j$ называются информационными парами. Ниже приведены стратегии децентрализованной координации.

$$\theta_i(t) = -\frac{1}{\sum_{j\in\Omega_i(t)}\alpha_{ij}(t)g_{ij}(t)}\cdot\sum_{j\in\Omega_i(t)}\alpha_{ij}(t)g_{ij}(t)\left\{\theta_i(t) - \left[\theta_i\left(t-\tau_{ij}\right) + v_{ij}\right]\right\}, \tag{12}$$

где $\Omega_i(t)$ – это набор всех платформ, которые отправляют информацию на платформу $i$ в момент времени $t$; $g_{ij}(t)$ – топология связи в момент времени $t$; $\alpha_{ij}(t) > 0$ – надежность передачи информации с платформы $j$ на платформу $i$ в момент времени $t$; а $\tau_{ij}$ – это коммуникационный шум между платформой $j$ и платформой $i$. Процесс координации распределенной информации в системе платформы, по сути, является достижимым условием согласованности динамической децентрализованной координации и скорости сходимости, которые связаны с топологией связи и коммуникационным шумом [6].

Децентрализованная координация между формированиями – это координация между $A$ и $B$ на Рисунке 2, которая выводится в соответствии со способом децентрализованной координации внутри формирований. На Рисунке 2 $A$ и $B$ являются корневыми узлами внутренней коммуникационной топологии формирований $A$ и $B$, а связь между формированиями $A$ и $B$ осуществляется посредством связи между платформами $A$ и $B$.

### *Выбор оптимального пути*

После формирования АМО маршрут каждого из них планируется отдельно. При планировании маршрута необходимо соблюдать несколько принципов: недопущения столкновений АМО; отсутствие препятствий на маршруте. На основе этих принципов определяется направление перемещения и рассчитывается траектория. Чтобы не нарушать этот принцип, по возможности выбирается маршрут с меньшим потреблением энергии, то есть путь с меньшим расстоянием. Учитывая характеристики АМО, предлагается децентрализованная стратегия управления перемещением в составе группы, основанная на согласованности информации и контроле относительного положения, в предположении, что положение, скорость и курс АМО практически одинаковы в начальный момент времени.

$$v_i^c = \bar{v}_i^c \delta_i \Delta v_i^c, \tag{13}$$

$$\psi_i^c = \bar{\psi}_i^c \delta_i \Delta \psi_i^c. \tag{14}$$

Стратегия управления перемещением децентрализованного формирования состоит из двух частей: первая часть – $v_i^c$ и $\psi_i^c$, которые синхронизируют скорость и курс, используя информацию об относительной скорости и курсе между АМО, вторая часть – $\Delta v_i^c$ и $\Delta \psi_i^c$, которые используют информацию об относительном местоположении между АМО для поддержания формирования. В выражениях (13)–(14) $\delta_i \in \{0,1\}$ является двоичной переменной переключения.

При $\delta_i = 0$ синхронизируются только положение или курс, а управление формированием не запускается; при $\delta_i = 1$ синхронизируются как положение, так и курс, и начинается управление формированием.

Когда $\delta_i = 0$, $v_i^c = \bar{v}_i^c$, $\psi_i^c = \bar{\psi}_i^c$, то цель состоит в том, чтобы скорость и курсовой угол всех АМО совпадали. Для этой цели используется следующее децентрализованное управление синхронизацией курса:

$$\bar{v}_i^c = v_i + \frac{1}{\alpha_{v,i}} \sum_{j \in N_i} \alpha_{ij} (v_j - v_i), \tag{15}$$

$$\bar{\psi}_i^c = \psi_i + \frac{1}{1+|N_i|} \sum_{j \in N_i} (\psi_j - \psi_i). \tag{16}$$

Из выражений видно, что команда скорости $\bar{v}_i^c$ АМО 1 и команда курсового угла $\bar{\psi}_i^c$ относятся только к его соседям и могут быть получены только путем относительных скоростей и курсовых углов всех соседей. Если набор соседей пуст, скорость и курсовой угол АМО останутся прежними без изменений [7]. Можно видеть, что выражение представляет собой стратегию децентрализованного управления, использующую только обратную связь с информацией о локальном относительном состоянии.

По команде курсового угла $v_i^c$ АМО 1 может повернуть с текущего угла на заданный командой курсовой угол по часовой стрелке вдоль траектории 1 или против часовой стрелки вдоль траектории 2. На графике угол отклонения по траектории 1 меньше ожидаемого значения $\pi$, в то время как угол отклонения по траектории 2 больше ожидаемого значения $\pi$. Для того, чтобы заставить АМО перемещаться по запланированному маршруту, иногда требуется ввести внешний опорный сигнал или

виртуального лидера. Когда АМО находится далеко от цели, необходимо скорректировать длину траектории с помощью ее планирования, чтобы он мог перемещаться с соответствующей скоростью для сохранения большого запаса регулировки скорости и лучшего реагирования на ошибки траектории и внезапные угрозы. Когда АМО приближается к заданной точке, управление скоростью является основным методом, который может обеспечить точное и одновременное прибытие.

### *Расчет скорости сходимости*

При минимальной скорости управления задействованы как продольное, так и поперечное управление АМО. АМО должен не только соответствовать условиям одновременного прибытия, но и превышать минимальную скорость перемещения. Угловая скорость перемещения выражается следующей формулой:

$$v \geq \frac{V}{\sqrt{nW}}, \tag{17}$$

где $v$ – скорость, полученная при первом максимуме, когда ускорение подъемной силы составляет менее 11 с на узел, а коэффициент загрузки АМО скорректирован на скорость, полученную при первом максимуме; $n$ – найденный коэффициент перегрузки в путевой системе координат $V$; $W$ – масса АМО. Начальная скорость АМО составляет не менее 1,13. Предварительные оценки скорости АМО приведены ниже.

$$v = \sqrt{\frac{2W}{\rho SC}}, \tag{18}$$

где $\rho$ – плотность окружающей среды, $C$ – критический коэффициент подъемной силы АМО, $S$ – динамическая контрольная площадь. Рассчитываются угол атаки, отклонения элемента управления АМО, перемещающегося при скорости 1,13. При неизменном положении элемента управления конечная скорость сходимости может быть достигнута путем отклонения от положения балансировки на один градус.

### *Ограничения по задержке связи для децентрализованного управления*

С момента, когда АМО обновляет координационную переменную, до момента, когда его соседи используют информацию об этой переменной для расчета команды скорости, должна существовать разница во времени, что эквивалентно введению временной задержки [8, 9]. Временная задержка определяется временем вычисления, периодом вычисления и временем передачи. Эффект временной задержки эквивалентен введению отклонения, которое не позволяет АМО прибыть в одно и то же время. Сокращение времени вычисления, прогнозирования и компенсации могут ослабить эффект временной задержки [10].

АМО 2 значительно увеличивает скорость перемещения и увеличивает запас регулировки скорости. При возникновении внезапной угрозы АМО по-прежнему достигают заданной позиции одновременно.

## Имитационный эксперимент

Для проверки эффективности децентрализованного метода управления перемещением АМО, прибывающих в одно и то же время, были проведены имитационные эксперименты. Чтобы обеспечить уникальность тестовых переменных, предполагается, что все модели АМО одинаковы, имеют одинаковые характерные параметры и начальные состояния, как показано в Таблице 2.

Таблица 2 – Характерные параметры и начальные состояния АМО
Table 2 – Characteristic parameters and initial states of AMO

| | АМО 1 | АМО 2 | АМО 3 | АМО 4 |
|---|---|---|---|---|
| Местоположение (м, м) | (0, 0) | (-1000, 2000) | (1000, 1000) | (1000, 0) |
| Скорость (м/с) | 165 | 212 | 198 | 201 |
| Курсовой угол, рад | $\pi/4$ | $\pi/6$ | $3\pi/8$ | $\pi/8$ |
| Минимальная скорость | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Максимальная скорость | 250 | 250 | 250 | 250 |
| Минимальное ускорение | -8 | -8 | -8 | -8 |
| Максимальное ускорение | 8 | 8 | 8 | 8 |

Для обеспечения точности теста подсчитывается ошибка в направлении $x$ и сравнивается с ошибкой в эксперименте без использования метода децентрализованного управления. Результаты показаны на Рисунке 3.

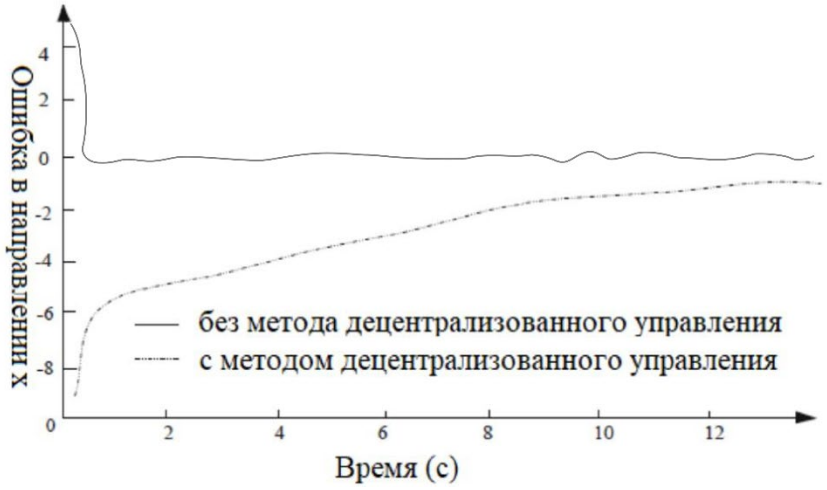



Рисунок 3 – Экспериментальное сравнение методов управления
Figure 3 – Experimental comparison of management methods

Из результатов моделирования видно, что децентрализованный метод управления оказывает значительное влияние на результаты определения цели АМО и сходимость ошибок. Ошибка в направлении $x$ делится на положительную и отрицательную. В начале перемещения независимо от того, используется ли данный метод, будет наблюдаться определенная величина ошибки. Величина ошибки будет постепенно уменьшаться по мере прохождения времени перемещения, но децентрализованный метод управления будет применяться. Ошибка может быть скорректирована до значения, близкого к нормальному, в течение 2 с и может поддерживаться до тех пор, пока значение ошибки не станет приблизительно равным 0.

Для получения более полных экспериментальных результатов в вышеуказанных условиях эксперимента в качестве экспериментального сравнения используется скорость

сходимости. Результаты сравнения скорости сходимости предложенного метода и без него приведены на Рисунке 4.

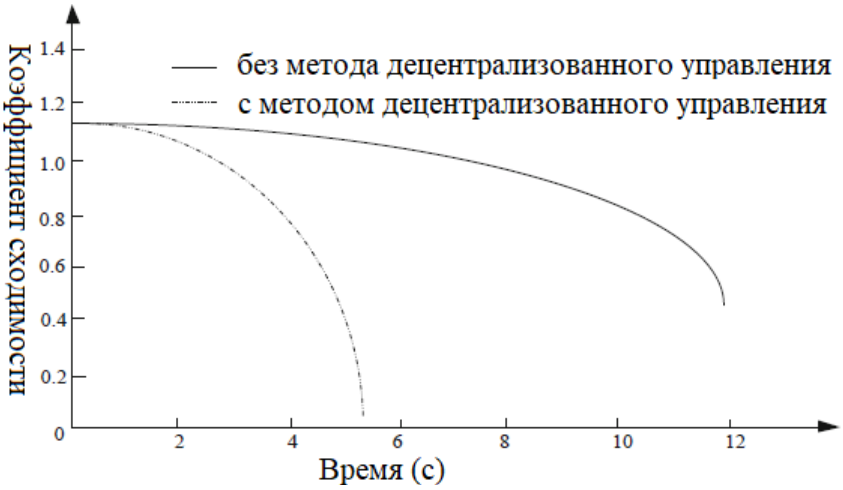



Рисунок 4 – Результаты сравнения скорости сходимости
Figure 4 – The results of the convergence rate comparison

На Рисунке 4 показано, что при децентрализованном методе управления эффект контроля скорости сходимости лучше, что указывает на то, что децентрализованный метод управления обладает лучшим эффектом управления, в то время как результаты сходимости без децентрализованного метода управления очень неудовлетворительны и требуют много времени. Таким образом, это полностью показывает, что эффективность предлагаемого метода децентрализованного управления значительно улучшена.

## Заключение

Использование только децентрализованной структуры управления локальным информационным взаимодействием снижает необходимость и сложность обмена данными и позволяет избежать столкновения в одной точке. Сочетание планирования маршрута и контроля скорости позволяет получить дополнительные преимущества, лучше справляться с воздействием неблагоприятных факторов, таких как ошибки на маршруте и неожиданные угрозы, чтобы гарантировать одновременное прибытие АМО, а также имеет определенную практическую осуществимость.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Tyushev K., Amelin K., Andrievsky B. The method of saving data integrity for decentralized network of group of UAV using quantized gossip algorithms. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(13):259–264. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.961
2. Dai B., He Y., Zhang G., Gu F., Yang L., Xu W. Wind disturbance rejection for unmanned aerial vehicles using acceleration feedback enhanced $H_\infty$ method. *Autonomous Robots.* 2020;44(7):1271–1285. https://doi.org/10.1007/s10514-020-09935-8
3. Arbanas B., Ivanovic A., Car M., Orsag M., Petrovic T., Bogdan S. Decentralized planning and control for UAV–UGV cooperative teams. *Autonomous Robots.* 2018;42(8):1601–1618. https://doi.org/10.1007/s10514-018-9712-y
4. Meng W., He Z., Su R., Yadav P.K., Teo R., Xie L. Decentralized Multi-UAV Flight Autonomy for Moving Convoys Search and Track. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2017;25(4):1480–1487. https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2601287

5. Conesa A., Madrigal P., Tarazona S., Gomez-Cabrero D., Cervera A., McPherson A., Szcześniak M.W., Gaffney D.J., Elo L.L., Zhang X., Mortazavi A. A survey of best practices for RNA-seq data analysis. *Genome Biology*. 2016;17. https://doi.org/10.1186/s13059-016-0881-8
6. Liu S., Bai W., Zeng N., Wang S. A Fast Fractal Based Compression for MRI Images. *IEEE Access*. 2019;7:62412–62420. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2916934
7. Stergiopoulos G., Kotzanikolaou P., Theocharidou M., Lykou G., Gritzalis D. Time-based critical infrastructure dependency analysis for large-scale and cross-sectoral failures. *International Journal of Critical Infrastructure Protection.* 2016;12:46–60. https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2015.12.002
8. Liu S., Fu W., He L., Zhou J., Ma M. Distribution of primary additional errors in fractal encoding method. *Multimedia Tools and Applications*. 2014;76(4):5787–5802. https://doi.org/10.1007/s11042-014-2408-1
9. Cheng Y.-C., Wu E.H., Chen G.-H. A Decentralized MAC Protocol for Unfairness Problems in Coexistent Heterogeneous Cognitive Radio Networks Scenarios With Collision-Based Primary Users. *IEEE Systems Journal*. 2016;10(1):346–357. https://doi.org/10.1109/jsyst.2015.2431715
10. Kamath G., Shi L., Song W.-Z., Lees J. Distributed travel-time seismic tomography in large-scale sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 2016;89:50–64. https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2015.12.002

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Черноиваненко Игорь Александрович,** аспирант, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.
*e-mail*: chernoivanenko2000@mail.ru

**Igor A. Chernoivanenko,** graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

**Кравец Олег Яковлевич,** доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.
*e-mail*: csit@bk.ru
ORCID: 0000-0003-0420-6877

**Oleg Ja. Kravets,** Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 10.12.2024; одобрена после рецензирования 19.12.2024; принята к публикации 20.12.2024.*

*The article was submitted 10.12.2024; approved after reviewing 19.12.2024; accepted for publication 20.12.2024.*