

В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО
И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО АЛГОРИТМОВ ДВИЖЕНИЯ СТРОЕМ БЛА
МУЛЬТИКОПТЕРНОГО ТИПА***

Развитие робототехнических комплексов делает актуальным их групповое применение для решения различных задач. Эффективность выполнения задач обнаружения и определения координат объектов группой роботов существенно зависит от точности поддержания заданного строя. В этой связи практический интерес представляет задача определения алгоритмов планирования движения, обеспечивающих наибольшую точности поддержания заданного строя. Данная статья посвящена исследованию точности поддержания строя группой БЛА мультикоптерного типа с использованием централизованного алгоритма планирования движения и децентрализованного алгоритма. В централизованном алгоритме используется ведущий БЛА, который передает свои координаты ведомым БЛА. На основании полученных координат и заданной структуре строя ведомые БЛА планируют свое движение. В децентрализованной систем соседние БЛА группы передают свои координаты друг другу, на основании чего планируется движение отдельного БЛА. Точность исследуется в зависимости от погрешностей навигационной системы и частоты обновления данных о положении ведущего или соседних БЛА. Полагается, что БЛА группы в дискретные моменты времени определяют свои координаты, используя внешнюю навигационную систему. Централизованный и децентрализованный алгоритмы обрабатываются одинаковой системой управления движением. Алгоритмы исследуются в данной статье методами численного моделирования. В процессе моделирования учитываются модели кинематики, динамики и исполнительных механизмов, а также модели формирования погрешностей навигационной системы. Показано, что децентрализованный алгоритм группового планирования движения обеспечивает более высокую точность по сравнению с централизованным алгоритмом. Однако техническая реализация децентрализованного алгоритма более сложна с точки зрения организации системы групповой связи. В централизованной систем должна быть реализована передача данных от ведущего БЛА ведомым. В децентрализованной системе требуется реализовать сетевую связь.

Группа БЛА; формирование строя; централизованный алгоритм; децентрализованный алгоритм; групповое управление.

V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev

**COMPARATIVE ANALYSIS OF CENTRALIZED AND DECENTRALIZED
ALGORITHMS FOR THE MOVEMENT OF MULTICOPTER-TYPE UAVS**

The development of robotics makes their group application relevant for solving various tasks. The effectiveness of performing the tasks of detecting and determining the coordinates of objects by a group of robots significantly depends on the accuracy of maintaining a given formation. In this regard, the task of determining motion planning algorithms that ensure the greatest accuracy of maintaining a given formation is of practical interest. This article is devoted to the study of the accuracy of maintaining the formation of a multicopter-type UAV group using a centralized motion planning algorithm and a decentralized algorithm. The centralized algorithm uses a master UAV, which transmits its coordinates to the slave UAVs. Based on the coordinates obtained and the given framework of the formation, the guided UAVs plan their movement. In a decentralized system, neighboring UAV groups transmit their coordinates to each other, on the basis of which the movement of a separate UAV is planned. The accuracy of the control system is investigated depending on the errors of the navigation system and the frequency of updating data on the position of the leading or neighboring UAVs. It is assumed that the group's UAVs determine their

* Работа при поддержке РНФ, проект № 22-29-00533.

coordinates in discrete moments of time using an external navigation system. Centralized and decentralized algorithms are worked out by the same motion control system. The algorithms are investigated in this article by numerical modeling methods. In the process of simulation, models of kinematics, dynamics and actuators are taken into account, as well as models for the formation of errors in the navigation system. It is shown that the de-centralized algorithm of group motion planning provides higher accuracy compared to the centralized algorithm. However, the technical implementation of a decentralized algorithm is more complicated from the point of view of organizing a group communication system. In a centralized system, data transmission from the master UAV to the slave should be implemented. In a decentralized system, it is required to implement network communication.

UAVs group; formation control; centralized algorithm; decentralized algorithm; group control.

Введение. Поддержание заданного строя актуально при решении задач движения колонной [1], слежения за целью [2], ретрансляции связи [3], поиска объектов [4], проведения георазведки [5]. Перспективной задачей является создание на базе группы БЛА многопозиционных радиолокационных или оптических систем [6–9]. Такие системы, обладая преимуществами многопозиционных систем, обеспечивают быстрое развертывание в заданном направлении и перемещение в требуемую область. Вместе с тем, в таких группах высокие требования предъявляются к системам управления и планирования движением. Если система навигации и управления обеспечивают высокую точность поддержания взаимного положения элементов группы в пространстве и синхронизированы между собой, что такая группа БЛА способна выполнять задачи радиолокации с высокой точностью. В этой связи в данной статье рассматриваются два подхода к пространственной координации – с выделением ведущего БЛА и с децентрализованной структурой.

В задаче создания многопозиционной радиолокационной системы на базе БЛА строй представляет собой линию, либо несколько линий, следующих друг за другом. В этой связи имеет смысл рассматривать метод виртуальных структур для формирования строя. При этом виртуальная структура может формироваться относительно ведущего БЛА [10–12] или децентрализованными методами [13–15]. При выделении ведущего БЛА его положение является точкой, относительно которой строится виртуальная структура. Ведущий БЛА передает свои координаты другим членам группы, которые рассчитывают собственные желаемые положения. При использовании децентрализованных методов каждый БЛА определяет координаты соседних БЛА и рассчитывает текущее желаемое положение.

В система с ведущим БЛА достаточно передавать только его координаты остальным членам группы. Это снижает требования к системе групповой связи. В режиме передачи данных работает только система связи ведущего БЛА. При большом расстоянии между отдельными БЛА группы может потребоваться ретрансляция координат ведущего БЛА. Также отметим, что в централизованной системе ведущий БЛА движется по заданной программе, не реагируя на текущее состояние остальных членов группы.

В централизованной систем задачей ведомых БЛА является слежение за точкой, положение которой определяется ведущим БЛА. В работе [1] рассмотрена задача слежения за роботом-лидером на основе оценок взаимного положения и ориентации, получаемых с помощью бортовой видеокамеры. Слежение за лидером осуществляется на основе уравнений кинематики материальной точки на плоскости [16]. Предложены алгоритмы слежения за лидером в системе координат робота-лидера и оценивания линейной и угловой скоростей робота-лидера. Алгоритм оценивания базируется на расширенном наблюдателе [17], обеспечивающем оценку скоростей и внешних возмущений. Алгоритм слежения базируется на методе линеаризации с обратной связью [18]. Предложен метод снижения ошибки слежения за лидером, учитывающий ограничения визуальной системы определения вза-

имного положения и ориентации. Однако использование уравнений кинематики материальной точки и упрощенных уравнений динамики ограничивает результаты статьи [1], особенно, при высоких требованиях к точности слежения за лидером, в трехмерных средах, а также в режимах маневрирования реальных роботов.

В статье [2] рассмотрена задача слежения за лидером группой роботов, движущихся заданным строем. При этом построение осуществляется за заданное конечное время, т.е. задача решается в терминальной постановке [19, 20]. За это время лидер должен оказаться в геометрическом центре группы. Все роботы группы описаны уравнениями кинематики материальной точки. При решении задачи делается предположение о том, что координаты и ориентации лидера группы известны только части ведомых роботов. Вместе с тем следует отметить, что задача решена без учета динамики движения.

В статье [21] также рассматривается задача движения за лидером на плоскости. Модель роботов представлена уравнениями кинематики и динамики материальной точки. Изучается проблема слежения за лидером в условиях, когда координаты и ориентация робота-лидера передаются через систему связи с ошибками. Предложен адаптивный динамический регулятор, использующий аппроксимирующую сеть радиальных базисных функций. Как в ранее рассмотренных статьях, основным недостатком является рассмотрение уравнений материальной точки, что не позволяет учесть ограничений, связанных с особенностями физической реализации роботов.

Также известны другие работы по групповому слежению за лидером, которые учитывают возможность не измерять ориентацию робота [22], обеспечивать устойчивость и робастность гладких траекторий движения [13, 23], ограничивать передачу информации о расстоянии между лидером и ведомыми [24]. Во всех указанных работах использованы уравнения кинематики материальной точки в двумерной среде, что не позволяет полноценно оценить возникающие в системе погрешности.

Аналогичная ситуация имеет место с методами децентрализованного управления. Так в работе [12] рассматриваются агенты, описываемые упрощенными уравнениями динамики материальной точки, для которых предлагается децентрализованный алгоритм, базирующийся на понятии виртуальных лидеров, которые рассчитываются каждым агентом в отдельности и являются его целевым положением.

В работе [14] представлены алгоритмы децентрализованной системы управления, в которых учитываются уравнения кинематики и динамики движения твердого тела. Указанные алгоритмы не предполагают выделение лидера или предварительно заданного строя. Роботы автоматически распределяются в заданной области и перестраиваются при обнаружении препятствий. Однако, используются сложные алгоритмы оптимизации, включая триангуляцию Делоне, минимаксную оптимизацию и нейронные сети.

В работе [15] рассмотрена группа роботов в 3-D пространстве, которые описаны уравнениями твердого тела. Группа автоматически распределяется в прямоугольной области, а затем движется, поддерживая взаимное положение и перестраиваясь при встрече с препятствиями. Для создания формации используется триангуляция Делоне. Обход препятствий осуществляется с использованием неустойчивых по расстоянию до препятствий режимов движения, основанных на использовании третьей теоремы Ляпунова [17, 25]. Это позволяет не использовать сложных в вычислительном плане нейронных сетей на борту робота.

В работе [26] рассмотрен метод децентрализованного управления движением группы однородных роботов при перемещении группы грузов. Роботы описаны уравнениями кинематики и упрощенной динамики материальной точки. Упрощения состоят в том, что существует преобразование, приводящее исходную систему

к линейному виду. Предлагаются алгоритмы группового управления, получаемые в результате решения уравнения Риккати [27]. В итоге роботы подразделяются на подгруппы, которые формируют строй, осуществляющий перемещение грузов.

Проведенный обзор позволяет сделать выводы о том, что при разработке систем группового управления используются достаточно простые модели движения, не учитывающие динамические особенности мобильных роботов. В данной статье проводится сравнительный анализ методов централизованного и децентрализованного управления группой БЛА при решении задачи движения строем. При этом учитываются погрешности навигационных систем и запаздывания в каналах связи.

II. Математическая модель БЛА и формулировка задачи. Рассматривается БЛА мультикоптерного, которые описываются уравнениями кинематики и динамики твердого тела и исполнительных механизмов [28–30]

$$\dot{y} = R(y)x, \quad (1)$$

$$\dot{x} = M^{-1}(K_\delta \delta + F_d), \quad (2)$$

$$T_\delta \dot{\delta} = K_u u - \delta, \quad (3)$$

где y – вектор линейных и угловых координат БЛА в неподвижной системе координат размерностью 6; x – вектор линейных и угловых скоростей в связанной системе координат размерностью 6; $R(y)$ – матрица кинематики; δ – вектор координат исполнительных механизмов; F_d – вектор прочих сил и моментов, действующих на БЛА; M – матрица инерционных параметров; u – вектор управлений; K_u – матрица связи управляющих воздействий и переменных состояния исполнительных механизмов БЛА; T_δ – матрица постоянных времени исполнительных механизмов БЛА.

В случае, если угловое положение описывается углами Эйлера [29], то матрица кинематики $R(y)$, которая определяет связь между неподвижной и связанной системами координат, имеет вид:

$$R = \begin{bmatrix} A & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & A_\omega \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$0_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & -\cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma + \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma + \sin \psi \sin \gamma & \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma + \sin \psi \cos \gamma \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \cos \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma \\ -\sin \psi \cos \vartheta & \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma & \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$A_\omega = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos \gamma}{\cos \vartheta} & -\frac{\sin \gamma}{\cos \vartheta} \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \\ 1 & -\tan \vartheta \cos \gamma & \tan \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Матрица инерционных параметров сбалансированного БЛА имеет вид

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & -my_T \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & my_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & my_T & J_x & -J_{xy} & -J_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & -J_{xy} & J_y & -J_{yz} \\ -my_T & 0 & 0 & -J_{xz} & -J_{yz} & J_z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где m – масса БЛА; $J_x, J_y, J_z, J_{xy}, J_{xz}, J_{yz}$ – моменты инерции относительно осей связанной системы координат БЛА; y_T – отклонение масс БЛА относительно начала координат связанной системы по оси ОУ.

Вектор сил и моментов F_d , действующих на БЛА, включает составляющие

$$F_d = F_g + F_J + F_h, \quad (9)$$

где F_g – вектор силы тяжести; F_J – вектор инерционных сил вращающегося БЛА; F_h – вектор аэродинамических сил и моментов.

Вектор силы тяжести определяется в неподвижной системе координат имеет компоненты $[0, -mg, 0]^T$. С помощью матрицы A (6) можно найти его компоненты в связанной системе координат K

$$F_g = \begin{bmatrix} -\sin \vartheta \\ -\cos \vartheta \cos \gamma \\ \cos \vartheta \sin \gamma \\ y_T \cos \vartheta \sin \gamma \\ 0 \\ y_T \sin \vartheta \end{bmatrix} mg. \quad (10)$$

Вектор инерционных сил вращающегося БЛА равен

$$F_J = \begin{bmatrix} m(\omega_z V_y - \omega_y V_z) \\ m(\omega_x V_z - \omega_z V_x) \\ m(\omega_x V_y - \omega_y V_x) \\ (J_y - J_z)\omega_y \omega_z \\ (J_z - J_x)\omega_z \omega_x \\ (J_x - J_y)\omega_x \omega_y \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Вектор аэродинамических сил и моментов, действующих на БЛА, определяется выражением [31]

$$F_h = 0,5\rho V^2 \begin{bmatrix} Sc_x \\ Sc_y \\ Sc_z \\ Um_x \\ Um_y \\ Um_z \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где S – характерная площадь БЛА; U – характерный объем БЛА; V – модуль вектора скорости движения БЛА относительно среды; $c_x, c_y, c_z, m_x, m_y, m_z$ – аэродинамические коэффициенты.

Если углы атаки α и скольжения β малы, то аэродинамические коэффициенты приближенно рассчитываются по следующим формулам [32]

$$c_x = c_{x0} + c_x^V V + c_x^\alpha \alpha^2 + c_x^\beta \beta^2, \quad (13)$$

$$c_y = c_{y0} + c_y^\alpha \alpha + c_y^{\alpha^2} \alpha |\alpha| + c_y^{\omega_z} \bar{\omega}_z, \quad (14)$$

$$c_z = c_z^\beta \beta + c_z^{\beta^2} \beta |\beta| + c_z^{\omega_y} \bar{\omega}_y, \quad (15)$$

$$m_x = m_x^\beta \beta + m_x^{\omega_x} \bar{\omega}_x, \quad (17)$$

$$m_y = m_y^\beta \beta + m_y^{\beta^2} \beta |\beta| + m_y^{\omega_y} \bar{\omega}_y, \quad (18)$$

$$m_z = m_{z0} + m_z^\alpha \alpha + m_z^{\alpha^2} \alpha |\alpha| + m_z^{\omega_z} \bar{\omega}_z, \quad (19)$$

где $\bar{\omega}_x = \omega_x/V$; $\bar{\omega}_y = \omega_y/V$; $\bar{\omega}_z = \omega_z/V$.

Матрица K_δ зависит от типа БЛА. Для квадрокоптера, обладающего четырьмя винтами, вектор δ координат исполнительных механизмов и указанная матрица определяются выражениями [33, 34]:

$$K_{\delta} = K_f \begin{bmatrix} k_v & k_v & k_v & k_v \\ k_v l_v \sin(\varphi_v) & k_v l_v \sin(\varphi_v) & -k_v l_v \sin(\varphi_v) & -k_v l_v \sin(\varphi_v) \\ -b_v & b_v & -b_v & b_v \\ k_v l_v \sin(\varphi_v) & -k_v l_v \sin(\varphi_v) & -k_v l_v \sin(\varphi_v) & k_v l_v \sin(\varphi_v) \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\delta = \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix}, K_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где l_v – расстояние от начала системы координат, связанной с БЛА до пропеллеров; φ_v – угол, под которым размещены винты; k_v , b_v – аэродинамические коэффициенты винтов, ω_i – скорости вращения винтов.

Матрица постоянных времени двигателей является диагональной, т.к. винты БЛА работают независимо друг от друга, т.е.

$$T_{\delta} = \begin{bmatrix} T_{\delta 1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_{\delta 1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_{\delta 1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{\delta 1} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Матрица коэффициентов передачи исполнительных механизмов также является диагональной в силу того, что винты БЛА работают независимо друг от друга:

$$K_u = \begin{bmatrix} k_{u1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{u2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{u3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{u4} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Структура модели навигационной системы представлена на рис. 1. Она включает в себя блок вычисления координат и модуль параметров навигационной системы.

Входными переменными модели навигационной системы являются: 1) точные значения курса ψ , угла крена γ , угла тангажа ϑ и путевого угла ψ_p БЛА в неподвижной системе координат; 2) точные значения угловых скоростей ω_x , ω_y , ω_z относительно осей связанной с БЛА системы координат; 3) точные значения угловых ускорений $\dot{\omega}_x$, $\dot{\omega}_y$, $\dot{\omega}_z$ относительно осей связанной с БЛА системы координат; 4) точные значения координат x , y , и z БЛА в неподвижной системе; точные значения линейных скоростей V_x , V_y , V_z БЛА в подвижной системе координат и скоростей \dot{x} , \dot{y} , \dot{z} БЛА в неподвижной системе координат; 5) точные значения линейных ускорений \dot{V}_x , \dot{V}_y , \dot{V}_z БЛА в связанной системе координат и линейных ускорений \ddot{x} , \ddot{y} , \ddot{z} в неподвижной системе координат; 6) признак наличия сигналов внешней навигационной системы ПСНС; 7) точное время t .

Выходными переменными модели навигационной системы являются: 1) измеренные значения курса ψ_n , угла крена γ_n , угла тангажа ϑ_n и путевого угла ψ_{pn} БЛА в неподвижной системе координат; 2) измеренные значения угловых скоростей ω_{xn} , ω_{yn} , ω_{zn} относительно осей связанной с БЛА системы координат; 3) измеренные значения угловых ускорений $\dot{\omega}_{xn}$, $\dot{\omega}_{yn}$, $\dot{\omega}_{zn}$ относительно осей связанной с БЛА системы координат; 4) измеренные значения координат x_n , y_n , и z_n БЛА в неподвижной системе; 5) измеренные значения линейных скоростей V_{xn} , V_{yn} , V_{zn} БЛА в связанной с ним подвижной системе координат и скоростей \dot{x}_n , \dot{y}_n , \dot{z}_n БЛА в неподвижной системе координат; 6) измеренные значения линейных ускорений \dot{V}_{xn} , \dot{V}_{yn} , \dot{V}_{zn} БЛА в связанной системе и линейных ускорений \ddot{x}_n , \ddot{y}_n , \ddot{z}_n в неподвижной системе координат; 7) время проведения текущего измерения координат t_n .

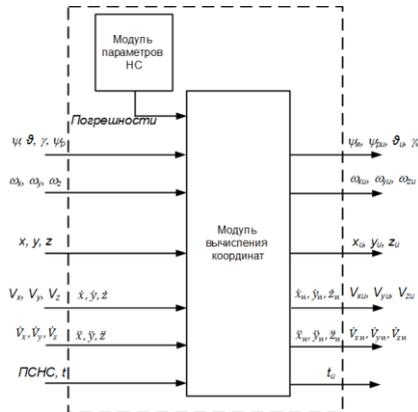


Рис. 1. Структура модели навигационной системы

Измеренные углы Эйлера ψ , γ , ϑ и путевой угол ψ_p на выходе модуля вычисления координат определяются по следующим формулам:

$$\psi_{и} = \psi + E_{\psi 1} R_{\psi 1}(\tau_{\psi}) + R_{\psi 2}(t), \quad (24)$$

$$\vartheta_{и} = \vartheta + E_{\vartheta} R_{\vartheta 1}(\tau_{\vartheta}), \quad (25)$$

$$\gamma_{и} = \gamma + E_{\gamma} R_{\gamma 1}(\tau_{\gamma}), \quad (26)$$

$$\psi_{pи} = \psi_p + E_{\psi p 1} R_{\psi p 1}(\tau_{\psi p}) + R_{\psi p 2}(t), \quad (27)$$

где $E_{\psi 1}$, E_{ϑ} , E_{γ} , $E_{\psi p}$ – СКО погрешностей измерения навигационной системы; $R_{\psi 1}$, $R_{\vartheta 1}$, $R_{\gamma 1}$, $R_{\psi p 1}$ – функции генерации случайной помехи; $R_{\psi 2}$, $R_{\psi p 2}$ – функции генерации систематической погрешности при отсутствии сигналов внешней навигации; τ_{ψ} , τ_{ϑ} , τ_{γ} , $\tau_{\psi p}$ – параметры, определяющие время корреляции случайной составляющей измеряемых сигналов.

Значение константы E_{ψ} определяется погрешностью навигационной системы. Данная погрешность, в зависимости от класса используемой навигационной системы, может составлять от нескольких угловых минут до нескольких градусов.

Функция $R_{\psi 1}(\tau_{\psi})$ моделируется как коррелированный случайный шум [35], полученный путем пропускания белого шума через инерционное звено первого порядка [36]. Уравнение, описывающее такой шум, имеет вид

$$\frac{d\xi_{\psi}}{dt} = -\tau_{\psi} (\xi_{\psi} - \zeta_{\psi}), \quad (28)$$

$$R_{\psi 1} = \xi_{\psi},$$

где ξ_{ψ} – переменная состояния инерционного звена первого порядка; ζ_{ψ} – случайный сигнал типа белый шум.

Функция $R_{\psi 2}$ генерирует нарастающую погрешность определения курса в соответствии с выражением:

$$R_{\psi 2}(t) = E_{\psi 2} t, i\Delta t \leq t < (i + 1)\Delta t, i = 0, 1, 2 \dots \quad (29)$$

где $E_{\psi 2}$ – параметр, определяющий скорость нарастания погрешности, Δt – интервал коррекции навигационной системы от внешних сигналов.

Угол тангажа описывается уравнением (25), в котором отсутствует составляющая, нарастающая во времени. Функции $R_{\vartheta 1}(\tau_{\vartheta})$ генерируется с помощью уравнения вида (28), отличия состоят только в другом значении времени корреляции τ_{ϑ} и СКО E_{ϑ} . Аналогичным образом формируется модель измерения угла крена (26), для которой используется уравнение, аналогичное (28), с параметрами τ_{γ} и E_{γ} :

Путевой угол определяется аналогично углу рысканья, с использованием параметров $E_{\psi p1}$, $\tau_{\psi p}$ и $E_{\psi p2}$ в уравнениях (28), (29). Отметим, что путевой угол является суммой углов рысканья и скольжения [37].

Угловые скорости измеряются непосредственно датчиками угловых скоростей, основными погрешностями которых являются дрейф нуля и нестабильность коэффициента передачи [38]. Указанные погрешности моделируются с помощью следующих соотношений

$$\omega_{xi} = \omega_x + R_{\omega x}, \quad (30)$$

$$\omega_{yi} = \omega_y + R_{\omega y}, \quad (31)$$

$$\omega_{zi} = \omega_z + R_{\omega z}, \quad (32)$$

$$R_{\omega x2}(s) = \frac{1}{s} \xi_{\omega x2}, R_{\omega y2}(s) = \frac{1}{s} \xi_{\omega y2}, R_{\omega z2}(s) = \frac{1}{s} \xi_{\omega z2},$$

где $\xi_{\omega x1}$, $\xi_{\omega x2}$, $\xi_{\omega y1}$, $\xi_{\omega y2}$, $\xi_{\omega z1}$, $\xi_{\omega z2}$ – белые шумы.

Акселерометры измеряют так называемые кажущиеся ускорения. В этой связи показания акселерометров описываются следующими выражениями:

$$\dot{V}_{xi} = \dot{V}_x - g \sin \vartheta_i + R_{Vx}, \quad (33)$$

$$\dot{V}_{yi} = \dot{V}_y - g \cos \gamma_i \cos \vartheta_i + R_{Vy}, \quad (34)$$

$$\dot{V}_{zi} = \dot{V}_z + g \sin \gamma_i \cos \vartheta_i + R_{Vz}. \quad (35)$$

где R_{Vx} , R_{Vy} , R_{Vz} – случайные погрешности дрейфа нуля и неточностей коэффициентов передачи акселерометров и перекосов его осей.

Ускорения в неподвижной системе координат определяются расчетным путем на основе следующего выражения

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{0i} \\ \ddot{y}_{0i} \\ \ddot{z}_{0i} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \dot{V}_{xi} \\ \dot{V}_{yi} \\ \dot{V}_{zi} \end{bmatrix}, \quad (36)$$

где матрица A определяется выражением (6).

Скорости БЛА в связанной системе координат вычисляются путем интегрирования ускорений в соответствии с выражениями

$$V_{xi} = V_{xi}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{V}_{xi} d\tau, \quad i = 0, 1, 2 \dots \quad (37)$$

$$V_{yi} = V_{yi}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{V}_{yi} d\tau, \quad (38)$$

$$V_{zi} = V_{zi}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{V}_{zi} d\tau. \quad (39)$$

Скорости БЛА в неподвижной системе координат определяются в соответствии с выражением

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{0i} \\ \dot{y}_{0i} \\ \dot{z}_{0i} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{xi} \\ V_{yi} \\ V_{zi} \end{bmatrix}, \quad (40)$$

где матрица A , как и ранее, вычисляется в соответствии с выражением (6).

Координаты БЛА определяются путем интегрирования скоростей, согласно выражениям:

$$x_{0i} = x_{0i}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{x}_{0i} x_0, \quad (41)$$

$$y_{0i} = y_{0i}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{y}_{0i} x_0, \quad (42)$$

$$z_{0i} = z_{0i}(i\Delta t) + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} \dot{z}_{0i} x_0. \quad (43)$$

Структура модели системы связи представлена на рис. 2.

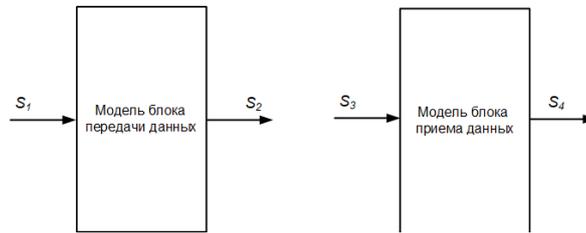


Рис. 2. Структура модели системы связи

Модель системы связи состоит из модели блока передачи данных и модели блока приема данных. На вход модели блока передачи данных поступает сообщение S_1 , которое содержит следующую информацию: 1) полезное сообщение S_1 и его размер D_1 в килобайтах; 2) время появления сообщения t_1 ; 3) текущие координаты БЛА, передающего сообщение.

Выходом модели блока передачи данных является сообщение S_2 , которое содержит информацию: 1) сообщение S_2 и его размер D_2 в килобайтах; 2) время начала передачи сообщения $t_{2н}$; 3) время окончания передачи сообщения $t_{2к}$; 4) координаты передающего БЛА в момент начала передачи сообщения.

Сообщение S_2 дублирует содержание сообщения S_1 при моделировании. Размер D_2 сообщения S_2 вычисляется в соответствии с выражением

$$D_2 = K_s D_1, \quad (44)$$

где K_s – коэффициент, задающий степень увеличения размера передаваемого сообщения за счет служебной информации и кодирования. Принято $K_s = 2$.

Время начала передачи сообщения вычисляется в соответствии с выражением

$$t_{2н} = t_1 + \Delta t_1, \quad (45)$$

где Δt_1 – время необходимое для подготовки к передаче данных.

Время окончания передачи сообщения $t_{2к}$ определяется выражением

$$t_{2к} = t_{2н} + D_2/V_{пер}. \quad (46)$$

Входом блока приема данных является сообщение S_3 , которое равно сообщению сообщения S_2 , но время его приема вычисляется в соответствии с выражением

$$t_{3п} = t_{2к} + r/V_{пер}.$$

Ставится задача исследования точности поддержания строя группой из N_r БЛА при движении с постоянной скоростью в заданном направлении, в зависимости от точности навигационной системы, частоты получения данных о собственном положении i -го БЛА и частоты обновления данных о положении других БЛА группы, для следующих подходов поддержания строя: 1) централизованный подход, заключающийся на передаче координат лидера ведомым БЛА; 2) децентрализованный подход, использующий обмен координатами между соседними БЛА.

III. Алгоритмы формирования строя. Будем считать, что в начальный момент времени БЛА группы построены в линию на расстоянии гш. Рассмотрим вначале вариант движения с использованием лидера. Схема информационного обмена данными в такой группе представлена на рис. 3. Согласно этой схеме из пункта наземного управления поступает задание для БЛА-лидера. Задание включает в себя направление и скорость полета группы, а также требуемое расстояние, на котором БЛА должны находиться друг от друга.

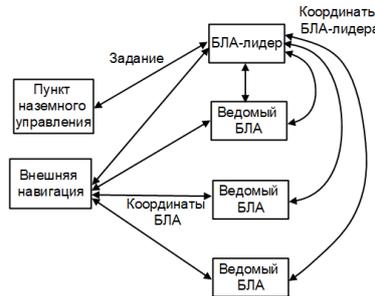


Рис. 3. Информационный обмен в системе с лидером

Определение собственных координат каждого БЛА определяется с помощью сигналов внешней навигационной системы. Кроме того, БЛА-лидер передает каждому ведомому БЛА свои координаты (x_1, y_1, z_1) , на основании которых каждый БЛА определяет свое желаемое положение в строю, используя выражения:

$$x_1^0 = V_0 t, x_i^0 = x_1, i = \overline{2, N_r}, \quad (47)$$

$$y_i^0 = y^0, i = \overline{1, N_r}, \quad (48)$$

$$z_i^0 = z_0 + (i - 1)r_{ш}, i = \overline{1, N_r}, \quad (49)$$

$$\psi_i = \psi^0, i = \overline{1, N_r}, \quad (50)$$

где z_0 – заданное положение первого БЛА; ψ^0 – заданное желаемое направление движения группы БЛА. При этом принято, что система координат привязана к положению лидера в начальный момент времени [39], а ось OX направлена вдоль желаемого движения группы.

Проекция желаемой скорости БЛА группы в связанной системе координат вычисляются в соответствии с выражением

$$V_i^0 = A^T V_0 p_{ni} / \|p_n\|, i=x,y,z, \quad (51)$$

где V_0 – заданная скорость движения группы; матрица кинематики A определяется в соответствии с выражением (6), а направляющий вектор p_n и его элементы p_{ni} вычисляются по формуле

$$p_n = \begin{bmatrix} x_i^0 - x_i \\ y_i^0 - y_i \\ z_i^0 - z_i \end{bmatrix}. \quad (52)$$

Желаемый угол тангажа БЛА-лидера определяется выражением

$$\vartheta_i^0 = \begin{cases} k_\vartheta (V_{xi}^0 - V_{xi} - e_{dz}), \forall V_{xi}^0 - V_{xi} > e_{dz}, \\ k_\vartheta (V_{xi}^0 - V_{xi} + e_{dz}), \forall V_{xi}^0 - V_{xi} < -e_{dz}, \\ 0, -e_{dz} \leq V_{xi}^0 - V_{xi} \leq e_{dz}, \end{cases} \quad (53)$$

где e_{dz} – зона нечувствительности, вводимая для фильтрации высокочастотных измерительных шумов [40]; V_{xi} – проекция скорости БЛА на ось OX связанной системы координат; k_ϑ – параметр регулятора.

При этом угол тангажа дополнительно ограничен значениями $\pm \vartheta^{max}$.

Аналогичным образом, формируются требования к углу крена

$$\gamma_i^0 = \begin{cases} k_\gamma (V_{zi}^0 - V_{zi} - e_{dz}), \forall V_{zi}^0 - V_{zi} > e_{dz}, \\ k_\gamma (V_{zi}^0 - V_{zi} + e_{dz}), \forall V_{zi}^0 - V_{zi} < -e_{dz}, \\ 0, -e_{dz} \leq V_{zi}^0 - V_{zi} \leq e_{dz}, \end{cases} \quad (54)$$

где V_{zi} – проекция скорости БЛА на ось OZ связанной системы координат; γ_i^0 – целевой угол крена; k_γ – параметр регулятора.

Угол крена, как и угол тангажа, дополнительно ограничен значениями $\pm\gamma^{max}$. Ограничения на углы крена и тангажа связаны с особенностями управления. При превышении указанными углами некоторых максимальных значений, БЛА мультикоптерного типа падает [41–43].

Желаемая скорость полета в установившемся режиме определяется проекцией скорости V_{yi} , которая равна

$$V_{yi} = V_y^0. \quad (55)$$

Рассмотрим теперь вариант движения с роевыми принципами формирования группы [44, 45]. Схема информационного обмена данными в такой группе представлена на рис. 4. Согласно этой схеме, из пункта наземного управления поступает задание всех БЛА. Задание включает в себя направление и скорость полета группы, а также требуемое расстояние, на котором БЛА должны находиться друг от друга.

Как и ранее, определение собственных координат каждого БЛА определяется с помощью сигналов внешней навигационной системы. Кроме того, все БЛА обмениваются своими координатами с соседними БЛА группы.

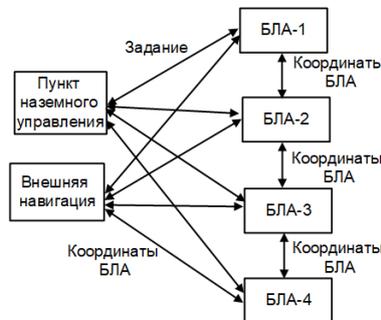


Рис. 4. Информационный обмен в роевой системе

Высота движения каждого БЛА для роевого принципа построения группы, как и для движения с лидером, задается выражением (48). Желаемое направление движения для всех БЛА группы вычисляется в соответствии с выражением (50).

Желаемая координата по оси OZ вычисляется в соответствии выражением

$$z_i^0 = z_{i-1} + r_{ш}, z_1^0 = 0, i = \overline{2, N_r}. \quad (56)$$

Желаемая координата по оси OX в случае роевого принципа формирования строя, определяется выражениями

$$x_1^0 = V_0 t + k_v(x_2 - x_1), \quad (57)$$

$$x_{N_r}^0 = V_0 t + k_v(x_{N_r-1} - x_{N_r}), \quad (58)$$

$$x_i^0 = V_0 t + k_v\left(\frac{x_{i-1} + x_{i+1}}{2} - x_i\right), \quad (59)$$

где $i = \overline{2, N_r - 1}$.

Желаемые углы дифферента, крена и рысканья вычисляются в соответствии с выражениями (53) и (54), а вектор желаемых скоростей БЛА определяется выражением (51). Таким образом, при роевом управлении строем, каждый БЛА вычисляет свое положение по оси OZ и оси OX относительно соседних БЛА, а не БЛА-лидера.

Система управления движением строится на базе метода позиционно-траекторного управления. Описание процедуры синтеза алгоритма управления движением БЛА, а также алгоритмы адаптации системы управления, представлены в работах [15, 28, 43]. Общий вид алгоритма управления имеет следующую форму

$$\begin{bmatrix} A_2 R \\ A_4 \end{bmatrix} M^{-1} (K_\delta \delta + F_d) = - \begin{bmatrix} A_2 \dot{R} + T_2 \dot{\Psi}_{tr} + T_1 \Psi_{tr} \\ T_3 \Psi_v \end{bmatrix}, \quad (60)$$

где T_1, T_2, T_3 – матрицы регулятора; \dot{R} – матрица, элементы которых являются производными по времени элементов матрицы R ;

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} -\psi^0 \\ -\vartheta_i^0 \\ -\gamma_i^0 \end{bmatrix}, \Psi_{tr} = A_2 y + A_3,$$

$$A_4 = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], A_5 = [-V_0], \Psi_v = A_4 y + A_5.$$

IV. Результаты исследования алгоритмов формирования строя. Сравнение алгоритма управления с лидером и роевого алгоритма проведено с использованием численного моделирования.

Моделирование проведено при следующих параметрах БЛА и системы управления: начальные положения БЛА (0; 100; 0) – лидер, (0; 100; 50), (0; 100; 100) и (0; 100; 150); желаемое направление полета $\psi^0 = 0$; желаемая высота полета $y^0 = 100$ м; расстояние между БЛА $r_{ш} = 50$ м; желаемая скорость полета $V_0 = 3$ м/с; параметры регуляторов углов крена и тангажа $k_\gamma = 0.1, k_\vartheta = 0.1$; значения углов тангажа и крена ограничены значениями $\pm 0,3$ рад; максимальная скорость полета БЛА 4 м/с; инерционные параметры БЛА $m=5$ кг, $J_x=5, J_y=0.1, J_z=5$; максимальная тяга винтов 100 Н. Постоянная времени замкнутой системы управления 2.0 с.

На рис. 5 представлены результаты моделирования движения группы из 4-х БЛА с лидером при интервале обновления навигационных сигналов 1 с и максимальной погрешностью навигации 6,0 м.

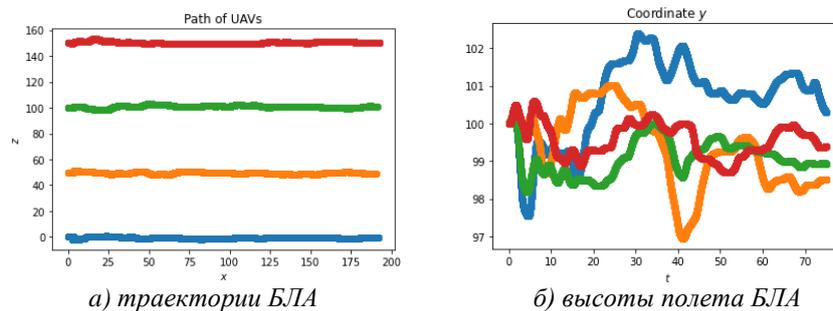


Рис. 5. Результаты моделирования группы БЛА с лидером

В табл. 1 представлены погрешности поддержания заданного строя группой БЛА с лидером при различных частотах обновления навигационных сигналов и различных погрешностях навигации.

Из табл. 1 следует, что с ростом погрешности навигационной системы растет и погрешность поддержания заданного положения в строю группой БЛА с лидером. При этом наибольшая точность обеспечивается по каналу управления высотой, т.к. она поддерживается независимо друг от друга. Наибольшая погрешность наблюдается в каналах управления по координатам Ox и Oz , что связано с необходимостью отслеживать группой положения лидера. При этом погрешность поддержания положения по оси Ox максимальна, т.к. необходимо отслеживать изменяющуюся координату. В качестве погрешности навигационной системы выбрано средне-квадратичное отклонение [46], а в качестве погрешности системы управления – усредненное по реализациям значение от максимальных ошибок в процессе полета.

Таблица 1

Зависимость погрешностей системы управления с лидером от точности и частоты обновления навигационных данных

СКО НС, м		0,5	1,0	1,5	2,0
Ошибка по оси ОУ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	0,73	1,07	1,53	2,6
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	0,7	0,8	2,13	2,77
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	0,7	0,9	2,17	2,67
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	0,87	1,43	1,93	3,6
Ошибка по оси ОХ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	1,7	3,2	4,3	6,8
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	1,93	3,1	3,9	7,17
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	1,67	2,87	5,27	6,77
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	2,07	3,0	4,97	6,57
Ошибка по оси ОZ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	0,27	1,87	2,9	4,5
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	0,33	1,97	2,33	3,77
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	0,47	1,8	2,83	4,57
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	0,47	1,97	3,2	4,17

На основе данных табл. 1 можно отметить, что погрешность системы группового управления с лидером слабо зависит от интервала обновления навигационных данных до того момента, пока он не приблизится к постоянной времени замкнутой системы. После этого система управления резко теряет качество и устойчивость. Так, в моделируемом примере потеря устойчивости наблюдается при частоте обновления навигационных данных около 1,5 с, что примерно соответствует постоянной времени замкнутой системы, равной 2,0 с.

В табл. 2 представлены результаты моделирования роевой системы управления, в которой желаемые положения БЛА по осям ОХ и ОZ задаются выражениями (56)–(59).

Сравнивая данные, представленные в табл. 1 и 2 можно заметить, что наиболее существенное отличие роевой системы от системы группового управления с лидером – более высокая точность позиционирования относительно оси ОХ. В частности, для СКО навигационной системы 2,0 м, роевая система управления повышает точность позиционирования в среднем в 3,5 раза. Вместе с тем, погрешность позиционирования по высоте и по оси ОZ существенно не изменяется. Это связано с тем, что роевой принцип позиционирования применен именно для позиционирования по фронту (по оси ОХ).

Таблица 2

Зависимость погрешностей роевой системы управления от точности и частоты обновления навигационных данных

СКО НС, м		0,5	1,0	1,5	2,0
Ошибка по оси ОУ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	0,83	1,0	2,0	2,28
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	0,83	0,97	1,75	2,23
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	0,7	10,3	1,8	2,8
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	0,9	1,34	3,33	3,0
Ошибка по оси ОХ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	0,45	0,6	1,33	1,15
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	0,5	1,07	1,46	1,54
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	0,29	1,0	1,2	2,17
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	0,32	0,7	1,7	2,4
Ошибка по оси ОZ	$\Delta t_{\text{нав}}=0,1$ с	0,47	1,58	2,85	3,6
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,2$ с	0,5	1,5	2,24	3,2
	$\Delta t_{\text{нав}}=0,5$ с	0,35	1,57	2,3	4,3
	$\Delta t_{\text{нав}}=1,0$ с	0,4	1,57	3,2	3,92

Можно отметить, что повышение точности поддержания строя требует более развитой системы связи или наличия на борту БЛА средств, позволяющий с достаточной точностью определять положения соседних БЛА группы. В случае группы с лидером, свои координаты остальным членам группы передает только лидер. В роевом методе БЛА передают свои координаты соседям. Совместная работа систем связи БЛА требует организации специальной сети связи [47], что в некоторых средах может создавать технические проблемы, например, под водой [48].

Отметим, что в данной работе не рассматриваются режимы значительных отклонений от желаемых положений. Это связано с тем, что в таких режимах требуется решать задачи планирования движения [49–52] и устранения коллизий.

Заключение. В данной статье проведено сравнение двух подходов к управлению движением группы БЛА при движении строем – управление с лидером и децентрализованное управление. Сравнение проведено по точности поддержания строя, которая имеет важное значение при выполнении ряда практических задач. Результаты моделирования показали, что система децентрализованного управления позволяет примерно в 3,5 раза уменьшить погрешность поддержания строя по сравнению с системой управления с лидером. Вместе с тем, реализация системы децентрализованного управления требует, чтобы соседние БЛА передавали друг другу информацию о своем местонахождении. В системе с лидером передачу своих координат группе осуществляет только лидер, а ведомые БЛА находятся в режиме молчания. Таким образом, в ситуации, когда имеется возможность организовать сеть связи, применение децентрализованного метода управления представляется более перспективным.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-29-00533, выполняемого в АО "Научно-конструкторское бюро робототехники и систем управления".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Arteaga-Escamilla C.M., Castro-Linares R., Álvarez-Gallegos J.* Leader–follower formation with reduction of the off-tracking and velocity estimation under visibility constraints // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2021. – Vol. 18 (610).
2. *Sun F., Li H., Zhu W., Kurths J.* Fixed-time formation tracking for multiple nonholonomic wheeled mobile robots based on distributed observer // *Nonlinear Dynamics*. – 2021. – Vol. 106. – P. 3331-3349.
3. *Dong X., Yu B., Shi Z., Zhong Y.* Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles: Theories and Applications // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – Vol. 23 (1). – P. 340-348.
4. *Pack D.J., DeLima P., Toussaint G.J., York G.* Cooperative control of UAVs for localization of intermittently emitting mobile targets // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. – 2009. – Vol. 39 (4). – P. 959-970.
5. *Безрук Г.Г., Мартынова Л.А., Саенко И.Б.* Динамический метод поиска антропогенных объектов в морском дне с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // *Тр. СПИИРАН*. – 2018. – Т. 3 (58). – С. 203-226.
6. *Шенета А.П., Ненашев В.А.* Точностные характеристики определения координат объектов в двухпозиционной системе малогабаритных бортовых РЛС // *Информационно-управляющие системы*. – 2020. – Т. 2. – P. 31-36.
7. *Nenashev V.A., Shepeta A.P., Kryachko A.F.* Fusion Radar and Optical Information in MultiPosition on-Board Location Systems // *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. – 2020. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/WECONF48837.2020.9131451.
8. *Nenashev V.A., Khanykov I.G.* Formation of Fused Images of the Land Surface from Radar and Optical Images in Spatially Distributed On-Board Operational Monitoring Systems // *Journal of Imaging*. – 2021. – Vol. 7 (251). – <https://doi.org/10.3390/jimaging7120251>.
9. *Ненашев В.А., Ханьков И.Г.* Формирование комплексного изображения земной поверхности на основе кластеризации пикселей локационных снимков в многопозиционной бортовой системе // *Информатика и автоматизация*. – 2021. – Т. 20, № 2. – С. 302-340.

10. Lewis M.A., Tan K.-H. High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures // *Autonomous Robots*. – 1997. – No. 4. – P. 387-403.
11. Tan K.-H., Lewis M. Virtual Structures for High-Precision Cooperative Mobile Robotic Control // *Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. – 1996. – P. 132-139.
12. Морозова Н.С. Виртуальные формации и виртуальные лидеры в задаче о движении строем группы роботов // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика // Информатика. Процессы управления*. – 2015. – № 1. – С. 135-149.
13. Эндо Т., Маэда Р., Мацуно Ф. Анализ устойчивости роя гетерогенных роботов с ограниченным полем зрения // *Информатика и автоматизация*. – 2020. – Т. 19 (5). – С. 942-966.
14. Гайдук А.Р., Мартьянов О.В., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Хамдан Н., Фархунд А. Нейросетевая система управления группой роботов в неопределенной двумерной среде // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2020. – Т. 21 (8). – С. 470-479.
15. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // *Тр. СПИИРАН*. – 2018. – Вып. 60. – С. 39-63.
16. Medvedev M., Pshikhopov V., Gurenko B., Hamdan N. Path planning method for mobile robot with maneuver restrictions // *Proc. of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME) 7-8 October 2021, Mauritius*. 10.1109/ICECCME52200.2021.9591090.
17. Carlos A., Hebertt S., Jos'e A. Stability of Active Disturbance Rejection Control for Uncertain Systems: a Lyapunov Perspective // *International Journal of Robust Nonlinear Control*. – 2017. – Vol. 27. – P. 4541-4553. – DOI: 10.1002/rnc.3812.
18. Воронников В.И., Вохмянина А.В. Метод линеаризующей обратной связи в задаче управления по части переменных при неконтролируемых помехах // *Тр. СПИИРАН*. – 2018. – Вып. 6 (61). – С. 61-93.
19. Фельдбаум А.А. О распределении корней характеристического уравнения системы регулирования // *Автоматика и телемеханика*. – 1948. – № 4. – С. 253-279.
20. Finaev V.I., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.K., Pereverzev V.A., Soloviev V.V. Unmanned Powerboat Motion Terminal Control in an Environment with Moving Obstacles // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. – 2021. – Vol. 22 (3). – P. 145-154. – <https://doi.org/10.17587/mau.22.145-154>.
21. Park B.-S., Yoo, S.-J. Adaptive Secure Control for Leader-Follower Formation of Nonholonomic Mobile Robots in the Presence of Uncertainty and Deception Attacks // *Mathematics*. – 2021. – Vol. 9. – <https://doi.org/10.3390/math9182190>.
22. Hirata-Acosta J., Pliego-Jiménez J., Cruz-Hernández C., Martínez-Clark R. Leader-Follower Formation Control of Wheeled Mobile Robots without Attitude Measurements // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11 (12), 5639. – <https://doi.org/10.3390/app11125639>.
23. Maghenem M., Loria A., Panteley E. Cascades-based leader-follower formation tracking and stabilization of multiple nonholonomic vehicles // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – Vol. 65 (8). – P. 3639-3646.
24. Wang Z., Wang L., Zhang H., Chen Q., Liu J. Distributed regular polygon formation control and obstacle avoidance for non-holonomic wheeled mobile robots with directed communication topology // *IET Control Theory and Applications*. – 2020. – Vol. 14 (9). – P. 1113-1122.
25. Sun J., Chen J. A survey on Lyapunov-based methods for stability of linear time-delay systems // *Frontiers of Computer Science*. – 2017. – Vol. 11. – P. 555-567. – <https://doi.org/10.1007/s11704-016-6120-3>.
26. Hu J., Bhowmick P., Lanzon A. Group Coordinated Control of Networked Mobile Robots With Applications to Object Transportation // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2021. – Vol. 70 (8). – P. 8269-8274. – DOI: 10.1109/TVT.2021.3093157.
27. Arnold W.F., Laub A.J. Generalized Eigenproblem Algorithms and Software for Algebraic Riccati Equations // *Proceedings of the IEEE*. – 1984. – Vol. 72 (12). – P. 1746-1754.
28. Pshikhopov V., Medvedev M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks // *Automation and Remote Control*. – 2020. – Vol. 81 (11). – P. 2078-2093. – <https://doi.org/10.1134/S0005117920110090>.
29. Stephen T. Thornton, Jerry B. Marion. *Classical Dynamics of Particles and Systems*. Brooks Cole. – 5th ed. – 2003. – 672 p. – ISBN-10: 0534408966.

30. *Пушхопов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 6. – С. 14-21.
31. *Götten F., Finger D.F., Havermann M. et al.* Full configuration drag estimation of short-to-medium range fixed-wing UAVs and its impact on initial sizing optimization // CEAS Aeronautical Journal. – 2021. – Vol. 12. – P. 589-603. – <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00522-w>.
32. *Milne-Thomson L.M.* Theoretical aerodynamics. – Courier Corporation, 2012.
33. *Li X., Qi G., Zhang L.* Time-varying formation dynamics modeling and constrained trajectory optimization of multi-quadrotor UAVs // Nonlinear Dynamics. – 2021. – Vol. 106. – P. 3265-3284. – <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06788-3>.
34. *Medvedev M., Pshikhopov V.* Path Planning of Mobile Robot Group Based on Neural Networks // Lecture Notes in Artificial Intelligence. – 2020. – P. 51-62. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-55789-8_5.
35. *Ren X.X., Yang G.H.* Noise covariance estimation for networked linear systems under random access protocol scheduling // Neurocomputing. – 2021. – Vol. 455 (30). – P. 68-77.
36. *Golnaraghi F., Kuo B.C.* Automatic Control Systems. – 9-th ed. – JOHN WILEY & SONS, 2010. – 944 p.
37. *Diebold F.* Elements of Forecasting (Fourth ed.). – Thomson/South-Western, 2007. – 366 p.
38. *El-Sheimy N., Hou H., Niu X.* Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – Vol. 57 (1). – P. 140-149.
39. *Consolini L., Morbidi F., Prattichizzo D., et al.* Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints // Automatica. – 2008. – Vol. 44 (5). – P. 1343-1349.
40. *Cocetti M., Tarbouriech S., Zaccarian L.* High-Gain Dead-Zone Observers for Linear and Nonlinear Plants // IEEE Control Systems Letters. – 2019. – Vol. 3 (2). – P. 356-361. – DOI: 10.1109/LCSYS.2018.2880931.
41. *Liu Y., Chen C., Wu H. et al.* Structural stability analysis and optimization of the quadrotor unmanned aerial vehicles via the concept of Lyapunov exponents // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 94. – P. 3217-3227. – <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9311-z>.
42. *Ömürlü V.E., Büyüksahin U., Artar R. et al.* An experimental stationary quadrotor with variable DOF // Sadhana. – 2013. – Vol. 38. – P. 247-264. <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0132-6>.
43. *Пушхопов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В.* Алгоритмы терминального управления подвижными объектами мультикоптерного типа // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2019. – Т. 20, № 1. – С. 44-51. – 10.17587/mau.20.44-51.
44. *Bayindir L.* A review of swarm robotics tasks // Neurocomputing. – 2016. – <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.05.116>.
45. *Shi Y.* Particle swarm optimization: Developments, applications and re- 23 sources // Evolutionary Computing, 2001 IEEE International Conference on. – 2001. – Vol. 1. – P. 81-86.
46. *Bruce P.C., Bruce A.G.* Practical Statistics for Data Scientists. – 1-st ed. O'Reilly Media, USA, 2016.
47. *Zhou P., Fang X., Fang Y., He R., Long Y. and Huang G.* Beam Management and Self-Healing for mmWave UAV Mesh Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – Vol. 68 (2). – P. 1718-1732. – DOI: 10.1109/TVT.2018.2890152.
48. *Li N., Cürüklü B., Bastos J., Sucasas V., Fernandez J.A.S., Rodriguez J.* A Probabilistic and Highly Efficient Topology Control Algorithm for Underwater Cooperating AUV Networks // Sensors. – 2017. – Vol. 17, 1022. – <https://doi.org/10.3390/s17051022>.
49. *Kostjukov V., Medvedev M., Pshikhopov V.* Method for Optimizing of Mobile Robot Trajectory in Repeller Sources Field // Informatics and Automation. – 2021. – Vol. 20 (3). – P. 690-726.
50. *Медведев М.Ю., Костюков В.А., Пушхопов В.Х.* Оптимизация движения мобильного робота на плоскости в поле конечного числа источников-репеллеров // Тр. СПИИРАН. – 2020. – Вып. 19 (1). – С. 43-78. – <https://doi.org/10.15622/10.15622/sp.2020.19.1.2>.
51. *Sánchez-Ibáñez J.R., Pérez-del-Pulgar C.J., García-Cerezo A.* Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – P. 7898. – <https://doi.org/10.3390/s21237898>.
52. *Mac T.T., Copot C., Tran D.T., De Keyser R.* Heuristic approaches in robot path planning: A survey // Robotics and Autonomous Systems. – 2016. – Vol. 86. – P. 13-28.

REFERENCES

1. *Arteaga-Escamilla C.M., Castro-Linares R., Álvarez-Gallegos J.* Leader–follower formation with reduction of the off-tracking and velocity estimation under visibility constraints, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2021, Vol. 18 (610).
2. *Sun F., Li H., Zhu W., Kurths J.* Fixed-time formation tracking for multiple nonholonomic wheeled mobile robots based on distributed observer, *Nonlinear Dynamics*, 2021, Vol. 106, pp. 3331-3349.
3. *Dong X., Yu B., Shi Z., Zhong Y.* Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles: Theories and Applications, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 23 (1), pp. 340-348.
4. *Pack D.J., DeLima P., Toussaint G.J., York G.* Cooperative control of UAVs for localization of intermittently emitting mobile targets, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2009, Vol. 39 (4), pp. 959-970.
5. *Bezruk G.G., Martynova L.A., Saenko I.B.* Dinamicheskiy metod poiska antropogennykh ob"ektov v morskoy vode s ispol'zovaniem avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Dynamic Method of Searching Anthropogenic Objects in Use of Seabed with Autonomous Underwater Vehicles], *Tr. SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2018, Vol. 3 (58), pp. 203-226.
6. *Shepeta A.P., Nenashev V.A.* Tochnostnye kharakteristiki opredeleniya koordinat ob"ektov v dvukhpozitsionnoy sisteme malogabaritnykh bortovykh RLS [Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy [Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy]*, 2020, Vol. 2, pp. 31-36.
7. *Nenashev V.A., Shepeta A.P., Kryachko A.F.* Fusion Radar and Optical Information in Multi-Position on-Board Location Systems, *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 1-5. – DOI: 10.1109/WECONF48837.2020.9131451.
8. *Nenashev V.A., Khanykov I.G.* Formation of Fused Images of the Land Surface from Radar and Optical Images in Spatially Distributed On-Board Operational Monitoring Systems, *Journal of Imaging*, 2021, Vol. 7 (251). Available at: <https://doi.org/10.3390/jimaging7120251>.
9. *Nenashev V.A., Khanykov I.G.* Formirovanie kompleksnogo izobrazheniya zemnoy poverkhnosti na osnove klasterizatsii pikseley lokatsionnykh snimkov v mnogopozitsionnoy bortovoy sisteme [Formation of Fused Images of the Land Surface from Radar and Optical Images in Spatially Distributed On-Board Operational Monitoring Systems], *Informatika i avtomatizatsiya [Informatics and Automation]*, 2021, Vol. 20, No. 2, pp. 302-340.
10. *Lewis M.A., Tan K.-H.* High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures, *Autonomous Robots*, 1997, No. 4, pp. 387-403.
11. *Tan K.-H., Lewis M.* Virtual Structures for High-Precision Cooperative Mobile Robotic Control, *Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1996, pp. 132-139.
12. *Morozova N.S.* Virtual'nye formatsii i virtual'nye lidery v zadache o dvizhenii stroem gruppy robotov [Virtual formations and virtual leaders in the task of moving a group of robots in formation], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 10. Prikladnaya matematika // Informatika. Protsessy upravleniya [Vestnik of Saint Petersburg University Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes]*, 2015, No. 1, pp. 135-149.
13. *Endo T., Maeda R., Matsuno F.* Analiz ustoychivosti roya geterogennykh robotov s ogranichenym polem zreniya [Stability Analysis of Swarm Heterogeneous Robots with Limited Field of View], *Informatika i avtomatizatsiya [Informatics and Automation]*, 2020, Vol. 19 (5), pp. 942-966.
14. *Gayduk A.R., Mart'yanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Khamdan N., Farkhud A.* Neyrosetevaya sistema upravleniya gruppy robotov v neopredelennoy dvumernoy srede [Neural network based control system for robots group operating in 2-d uncertain environment], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*, 2020, Vol. 21 (8), pp. 470-479.
15. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Gruppovoe upravlenie dvizheniem mobil'nykh robotov v neopredelennoy srede s ispol'zovaniem neustoychivykh rezhimov [Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes], *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2018, Issue 60, pp. 39-63.

16. Medvedev M., Pshikhov V., Gurenko B., Hamdan N. Path planning method for mobile robot with maneuver restrictions, *Proc. of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME) 7-8 October 2021, Mauritius*. 10.1109/ICECCME52200.2021.9591090.
17. Carlos A., Hebertt S., Jos'e A. Stability of Active Disturbance Rejection Control for Uncertain Systems: a Lyapunov Perspective, *International Journal of Robust Nonlinear Control*, 2017, Vol. 27, pp. 4541-4553. DOI: 10.1002/rnc.3812.
18. Vorotnikov V.I., Vokhmyanina A.V. Metod linearizuyushchey obratnoy svyazi v zadache upravleniya po chasti peremennykh pri nekontroliruemyykh pomekhakh [Feedback Linearization Method for Problem of Control of a Part of Variables in Uncontrolled Disturbances], *Tr. SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2018, Issue 6 (61), pp. 61-93.
19. Fel'dbaum A.A. O raspredelenii korney kharakteristicheskogo uravneniya sistemy regulirovaniya [On the distribution of the roots of the characteristic equation of control systems], *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, 1948, No. 4, pp. 253-279.
20. Finaev V.I., Medvedev M.Yu., Pshikhov V.K., Pereverzev V.A., Soloviev V.V. Unmanned Powerboat Motion Terminal Control in an Environment with Moving Obstacles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, Vol. 22 (3), pp. 145-154. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.22.145-154>.
21. Park B.-S., Yoo, S.-J. Adaptive Secure Control for Leader-Follower Formation of Nonholonomic Mobile Robots in the Presence of Uncertainty and Deception Attacks, *Mathematics*, 2021, Vol. 9. Available at: <https://doi.org/10.3390/math9182190>.
22. Hirata-Acosta J., Pliego-Jiménez J., Cruz-Hernández C., Martínez-Clark R. Leader-Follower Formation Control of Wheeled Mobile Robots without Attitude Measurements, *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11 (12), 5639. – <https://doi.org/10.3390/app11125639>.
23. Maghenem M., Loria A., Panteley E. Cascades-based leader-follower formation tracking and stabilization of multiple nonholonomic vehicles, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 65 (8), pp. 3639-3646.
24. Wang Z., Wang L., Zhang H., Chen Q., Liu J. Distributed regular polygon formation control and obstacle avoidance for non-holonomic wheeled mobile robots with directed communication topology, *IET Control Theory and Applications*, 2020, Vol. 14 (9), pp. 1113-1122.
25. Sun J., Chen J. A survey on Lyapunov-based methods for stability of linear time-delay systems, *Frontiers of Computer Science*, 2017, Vol. 11, pp. 555-567. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11704-016-6120-3>.
26. Hu J., Bhowmick P., Lanzon A. Group Coordinated Control of Networked Mobile Robots With Applications to Object Transportation, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, Vol. 70 (8), pp. 8269-8274. DOI: 10.1109/TVT.2021.3093157.
27. Arnold W.F., Laub A.J. Generalized Eigenproblem Algorithms and Software for Algebraic Riccati Equations, *Proceedings of the IEEE*, 1984, Vol. 72 (12), pp. 1746-1754.
28. Pshikhov V., Medvedev M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks, *Automation and Remote Control*, 2020, Vol. 81 (11), pp. 2078-2093. – <https://doi.org/10.1134/S0005117920110090>.
29. Stephen T. Thornton, Jerry B. Marion. Classical Dynamics of Particles and Systems. Brooks Cole. 5th ed., 2003, 672 p. ISBN-10: 0534408966.
30. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A. Sistema pozitsionno-traektornogo upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: matematicheskaya model' [Positional trajectory control system of a robotic aeronautical platform: mathematical model], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*, 2013, No. 6, pp. 14-21.
31. Götten F., Finger D.F., Havermann M. et al. Full configuration drag estimation of short-to-medium range fixed-wing UAVs and its impact on initial sizing optimization, *CEAS Aeronautical Journal*, 2021, Vol. 12, pp. 589-603. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00522-w>.
32. Milne-Thomson L.M. Theoretical aerodynamics. Courier Corporation, 2012.
33. Li X., Qi G., Zhang L. Time-varying formation dynamics modeling and constrained trajectory optimization of multi-quadrotor UAVs, *Nonlinear Dynamics*, 2021, Vol. 106, pp. 3265-3284. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06788-3>.
34. Medvedev M., Pshikhov V. Path Planning of Mobile Robot Group Based on Neural Networks, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2020, pp. 51-62. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55789-8_5.

35. Ren X.X., Yang G.H. Noise covariance estimation for networked linear systems under random access protocol scheduling, *Neurocomputing*, 2021, Vol. 455 (30), pp. 68-77.
36. Golnaraghi F., Kuo B.C. Automatic Control Systems. 9-th ed. JOHN WILEY & SONS, 2010, 944 p.
37. Diebold F. Elements of Forecasting (Fourth ed.). Thomson/South-Western, 2007, 366 p.
38. El-Sheimy N., Hou H., Niu X. Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, Vol. 57 (1), pp. 140-149.
39. Consolini L., Morbidi F., Prattichizzo D., et al. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints, *Automatica*, 2008, Vol. 44 (5), pp. 1343-1349.
40. Cocetti M., Tarbouriech S., Zaccarian L. High-Gain Dead-Zone Observers for Linear and Nonlinear Plants, *IEEE Control Systems Letters*, 2019, Vol. 3 (2), pp. 356-361. DOI: 10.1109/LCSYS.2018.2880931.
41. Liu Y., Chen C., Wu H. et al. Structural stability analysis and optimization of the quadrotor unmanned aerial vehicles via the concept of Lyapunov exponents, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, Vol. 94, pp. 3217-3227. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9311-z>.
42. Ömürlü V.E., Büyüksahin U., Artar R. et al. An experimental stationary quadrotor with variable DOF, *Sadhana*, 2013, Vol. 38, pp. 247-264. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0132-6>.
43. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Algoritmy terminal'nogo upravleniya podvizhnymi ob'ektami mul'tikopternogo tipa [Algorithms for terminal control of moving objects of multicopter type], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*, 2019, Vol. 20, No. 1, pp. 44-51. 10.17587/mau.20.44-51.
44. Bayindir L. A review of swarm robotics tasks, *Neurocomputing*, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.05.116>.
45. Shi Y. Particle swarm optimization: Developments, applications and re- 23 sources, *Evolutionary Computing, 2001 IEEE International Conference on*, 2001, Vol. 1, pp. 81-86.
46. Bruce P.C., Bruce A.G. Practical Statistics for Data Scientists. 1-st ed. O'Reilly Media. USA, 2016.
47. Zhou P., Fang X., Fang Y., He R., Long Y. and Huang G. Beam Management and Self-Healing for mmWave UAV Mesh Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, Vol. 68 (2), pp. 1718-1732. DOI: 10.1109/TVT.2018.2890152.
48. Li N., Cürüklü B., Bastos J., Sucasas V., Fernandez J.A.S., Rodriguez J. A Probabilistic and Highly Efficient Topology Control Algorithm for Underwater Cooperating AUV Networks, *Sensors*, 2017, Vol. 17, 1022. Available at: <https://doi.org/10.3390/s17051022>.
49. Kostjukov V., Medvedev M., Pshikhopov V. Method for Optimizing of Mobile Robot Trajectory in Repeller Sources Field, *Informatics and Automation*, 2021, Vol. 20 (3), pp. 690-726.
50. Medvedev M.Yu., Kostjukov V.A., Pshikhopov V.Kh. Optimizatsiya dvizheniya mobil'nogo robota na ploskosti v pole konechnogo chisla istochnikov-repellerov [Optimization of mobile robot movement on a plane with finite number of repeller sources], *Tr. SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2020, Issue 19 (1), pp. 43-78. Available at: <https://doi.org/10.15622/sp.2020.19.1.2>.
51. Sánchez-Ibáñez J.R., Pérez-del-Pulgar C.J., García-Cerezo A. Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review, *Sensors*, 2021, Vol. 21, pp. 7898. Available at: <https://doi.org/10.3390/s21237898>.
52. Mac T.T., Copot C., Tran D.T., De Keyser R. Heuristic approaches in robot path planning: A survey, *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, Vol. 86, pp. 13-28.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

Медведев Михаил Юрьевич – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; д.т.н.; в.н.с.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – e-mail: pshichop@rambler.ru; д.т.н.; профессор; директор.

Medvedev Mikhail Yurjevich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Pshikhopov Viacheslav Khasanovich – e-mail: pshichop@rambler.ru; dr. of eng. sc.; professor; director.