

УДК 681.51:004.7:623.746.4-519

Алгоритмы автономного группового управления горизонтальными движениями БЛА*

А.Р. ГАЙДУК¹, А.А. ДЬЯЧЕНКО², С.Г. КАПУСТЯН³, Е.А. ПЛАКСИЕНКО⁴

¹ 347928, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Южный федеральный университет, доктор технических наук, профессор; 337700, РФ, г. Кисловодск, пр. Победы, 37А, Кисловодский гуманитарно-технический институт, заведующий кафедрой. E-mail: gaiduk_2003@mail.ru

² 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, НИИ МВС им. академика А.В. Каляева ЮФУ, младший научный сотрудник. E-mail: aleksandernet@yandex.ru

³ 347928, РФ, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, ЮНЦ РАН, ведущий научный сотрудник; НИИ МВС им. академика А.В. Каляева ЮФУ, заведующий отделом, доктор технических наук. E-mail: kar56@mail.ru

⁴ 347900, РФ, г. Таганрог, ул. Петровская, 45, Таганрогский институт управления и экономики, кандидат технических наук, доцент. E-mail: pumkad@mail.ru

Информационные технологии находят все более широкое применение, в том числе и в задачах управления различными техническими объектами. В статье рассматривается их применение для реализации алгоритмов автономного управления горизонтальными движениями группы однотипных БЛА, выполняющих схожие задачи. Отличительной особенностью БЛА является необходимость решения интеллектуальных задач по управлению летательным аппаратом при отсутствии экипажа на его борту. Это требует разработки специальных информационных технологий принятия управленческих решений в автономном режиме. Сложность задачи управления обусловливается сложностью траекторий полета БЛА, включающих как прямолинейные, так и криволинейные участки. Представленные в статье алгоритмы обеспечивают автономную стабилизацию скорости продольного движения, смещение БЛА в поперечном направлении, а также изменение направления движения на заданный угол. Разработан оригинальный алгоритм автономного выполнения разворота БЛА с целью выхода на движение в обратном направлении по траектории, смещенной на заданное расстояние по отношению к предыдущей траектории. Предложен алгоритм автономного предотвращения столкновений БЛА, совершающих полет на одной и той же высоте. Результаты компьютерного моделирования предложенных алгоритмов свидетельствуют, что они обеспечивают выполнение требуемых движений и маневров в автономном полете БЛА.

Полученные алгоритмы автономного управления движением БЛА ориентированы на реализацию с применением бортовых вычислительных средств и современных информационных технологий. Эти алгоритмы могут применяться при разработке как бортовых систем группового управления, так и аппаратуры наземных пунктов обслуживания полетов БЛА, предназна-

* Статья получена 13 марта 2017 г.

Работа выполнена в ЮФУ при поддержке РФФИ, проект №16-29-04194, а также в рамках Программы фундаментальных исследований РАН I.31 П, проект № 0256-2015-0079.

ченных для решения разнообразных задач. В то же время подход, лежащий в основе создания предложенных в данной работе алгоритмов, может использоваться при решении задач управления другими техническими объектами.

Ключевые слова: система, автономное управление, алгоритм, безэкипажный летательный аппарат (БЛА), траектория, маневр, разворот, группа БЛА, предотвращение столкновения

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-120-134

ВВЕДЕНИЕ

Как разносторонние инструментальные средства, беспилотные летательные аппараты (БЛА) играют все более важную роль при решении многих задач гражданского и оборонного характера. Успешное применение БЛА зависит от многих факторов, в частности от алгоритмов автономного управления выполнением ими различных маневров. Качество выполнения БЛА этих маневров имеет важное значение при решении практически всех возлагаемых на БЛА задач, так как все они требуют принятия интеллектуальных решений по управлению летательным аппаратом в условиях отсутствия экипажа на борту. Действительно, вряд ли БЛА способен выполнять различные миссии, если в автономном режиме он способен осуществлять только лишь прямолинейное движение. Как известно, группы БЛА привлекаются для решения таких задач, как мониторинг некоторой сухопутной области, мониторинг морской акватории, разведка и патрулирование некоторого участка горной дороги или участка границы, грузовые поставки и т. п. [1–6]. Очевидно, что при решении этих задач БЛА должен в автономном режиме выполнять движение по сложным траекториям, включающим как прямолинейные, так и криволинейные участки. Одной из наиболее важной, но и сложной является проблема разработки алгоритмов автономного предотвращения столкновений БЛА. Это связано с тем, что несчастные случаи столкновения причиняют очень серьезные, катастрофические сбои в работе БЛА [2, 5]. Указанные особенности обуславливают необходимость применения информационных технологий, которые все чаще применяются для решения различных задач [7, 8].

Проблема разработки алгоритмов управления движением БЛА рассматривалась во многих других работах, где исследовались различные ее аспекты [9–14]. Так, в работе [9] для синтеза бортовых систем управления БЛА применялся известный метод *backstepping*; самоорганизующееся и адаптивное управления предложены в работах [10, 11]. В работах [12–14] основное внимание уделяется групповому управлению БЛА в средах как без препятствий, так при их наличии. Однако многие вопросы управления движением БЛА в автономном режиме все еще остаются нерешенными. В частности, это вопросы автономного выполнения БЛА различных маневров, связанных с полетом по весьма сложным траекториям и предотвращением столкновений аппаратов во время полета.

В данной работе рассматриваются алгоритмы решения всего комплекса задач по автономному управлению движением БЛА по сложным траекториям с предотвращением столкновений. При этом управление БЛА группы осуществляется трехканальным комплексом систем автономного управления, алгоритмы которого разработаны на основе непрерывных законов управления и ориентированы на реализацию с применением информационных техно-

логий [14, 15]. Предполагается, что реализация автономного управления группой осуществляется с использованием распределенной вычислительной системы, элементами которой являются бортовые вычислители отдельных БЛА [8]. Поэтому предложенные алгоритмы рассматриваются применительно к группе БЛА.

1. ДИСКРЕТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЛА

Движение группы БЛА описывается в двух системах координат: земной $O(X_0, Y_0, Z_0)$, начало которой помещается в некоторой точке на земле, и связанной $O(X, Y, Z)$, начало которой совмещено с центром тяжести БЛА. При этом предполагается, что ось OX_0 земной системы координат направлена на север, ось OZ_0 – вправо, а ось OY_0 – вертикально вверх. В качестве обобщенных координат приняты три координаты положения центра тяжести БЛА x_0, y_0, z_0 в земной системе и три угла Эйлера: ψ – рыскание (курс), ϑ – тангаж и γ – крен. При $\psi = 0, \vartheta = 0$ и $\gamma = 0$ – оси связанной системы параллельны одноименным осям земной системы координат [14, 15]. Положительным направлением всех углов считается поворот против часовой стрелки.

Далее рассматриваются лишь плоские, горизонтальные движения БЛА, наиболее характерные для указанных выше задач БЛА. К ним относятся движения на постоянной высоте полета всей группы БЛА, т. е. при $y_{0i} = \text{const}$ и $\gamma_i = 0$. В этом случае дискретные значения $x_{0ik}, y_{0ik}, z_{0ik}, k = 0, 1, 2, \dots$ координат i -го БЛА группы в земной системе связаны с координатами в связанной системе следующими выражениями:

$$\begin{aligned} x_{0i,k+1} &= x_{0i,k} + [V_{xik} \cos \psi_{ik} + V_{zik} \sin \psi_{ik}]T, & y_{0i,k+1} &= y_{0i,k-1} + V_{yik}T, \\ z_{0i,k+1} &+ z_{0i,k-1} + [V_{zik} \cos \psi_{ik} - V_{xik} \sin \psi_{ik}]T, \end{aligned} \quad (1)$$

где $V_{xik}, V_{yik}, V_{zik}$ – дискретные значения проекций скорости i -го БЛА на оси связанной системы координат, $i = \overline{1, N_{\text{БЛА}}}$; $k = 0, 1, 2, \dots$; $N_{\text{БЛА}}$ – число БЛА в группе; T – период дискретизации цифрового устройства управления.

Уравнения динамики БЛА. Формально уравнения дискретной модели БЛА не требуются для представления алгоритмов управления им, однако они могут использоваться при исследовании этих алгоритмов. Поэтому приведем здесь и разностные уравнения динамической модели i -го БЛА, соответствующие несколько модифицированным непрерывным уравнениям, предложенным в работах [14, 15]. С учетом линейной аппроксимации, аэродинамических сил сопротивления и влияния ветра разностные уравнения, определяющие дискретные значения переменных в связанной системе координат, имеют вид

$$x_{i,k+1} = x_{i,k} + 0,5(v_{xik} + v_{xi,k-1})T, \quad v_{xi,k+1} = v_{xi,k} + 0,5(f_{xik} + f_{xi,k-1})T, \quad (2)$$

$$z_{i,k+1} = z_{i,k} + 0,5(v_{zik} + v_{zi,k-1})T, \quad v_{zi,k+1} = v_{zi,k} + 0,5(f_{zik} + f_{zi,k-1})T \quad (3)$$

$$\psi_{i,k+1} = \psi_{i,k} + 0,5(v_{\psi ik} + v_{\psi i,k-1})T, \quad v_{\psi i,k+1} = v_{\psi i,k} + 0,5(f_{\psi ik} + f_{\psi i,k-1})T, \quad (4)$$

где

$$f_{xik} = \left[b_{xi} u_{xik} - \beta_{xi} v_{xik}^2 - \zeta_{xi} V_{вет,k}^2 \cos(\psi_{ik} - \psi_{вет,k}) \right] / m_i,$$

$$f_{z_{ik}} = \left[b_{zi} u_{z_{ik}} - \beta_{zi} v_{z_{ik}}^2 - \zeta_{zi} V_{вет,k}^2 \sin(\psi_{ik} - \psi_{вет,k}) \right] / m_i,$$

$$f_{\psi_{ik}} = \left[b_{\psi i} u_{\psi_{ik}} - \beta_{\psi i} v_{\psi_{ik}}^2 + \zeta_{\psi i} V_{вет,k}^2 \sin(\psi_{ik} - \psi_{вет,k}) \right] / J_{yi}.$$

В выражениях (2)–(4) $k = 0, 1, 2, \dots$; $x_{ik} = x_i(kT)$, $z_{ik} = z_i(kT)$, $v_{xik} = v_{xi}(kT)$, $v_{z_{ik}} = v_{zi}(kT)$ – значения отклонений координат и скоростей i -го БЛА по соответствующим осям координат; $u_{xik} = u_{xi}(kT)$, $u_{z_{ik}} = u_{zi}(kT)$ – значения управлений по продольной OX_i и поперечной OZ_i осям соответственно; $u_{\psi_{ik}}$ – значения управление курсом; m_i – масса, а b_{xi} , β_{xi} , b_{zi} , β_{zi} , $b_{\psi i}$, $\beta_{\psi i}$, ζ_{xi} , ζ_{zi} , $\zeta_{\psi i}$ – коэффициенты i -го БЛА; J_{yi} – момент инерции относительно вертикальной оси; $V_{вет,k}$, $\psi_{вет,k}$ – значения скорости и угла направления ветра в земной системе координат. Начальные условия: $x_{i0} = 0$ м, $z_{i0} \neq 0$ м, $z_{i0} \neq z_{j0}$, $\psi_{i0} = 0$, $i \neq j$, $v_{xi0} = v_{x0} \neq 0$ м/с, $v_{z_{i0}} = v_{\psi_{i0}} = 0$, $i, j = \overline{1, N_{БЛА}}$.

2. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЛА

Продольное и поперечное движение. При движении в установившемся режиме с постоянной скоростью V_{xik} вдоль оси OX всех БЛА группы выходные переменные $x_{ik} = x_i(kT)$ их систем управления по каналам $g_{xi} \rightarrow x_i$ являются линейными функциями времени, т. е. $g_{xik}(k) = V_{xi}(kT - k_0T) + x_{i0}$. Поддержание заданной скорости и заданного расстояния между отдельными БЛА обеспечивается цифровым устройством управления, алгоритм работы которого имеет вид

$$w_{xi1,k+1} = w_{xi2,k} - T \left(\frac{2347,2}{(t_{p,xi}^*)^2} w_{xi2,k} - \frac{20736 m_i}{b_{xi} (t_{p,xi}^*)^4} \varepsilon_{xi,k} \right), \quad (5)$$

$$w_{xi2,k+1} = w_{xi2,k} + T \left(w_{xi1k} - \frac{86,4}{t_{p,xi}^*} w_{xi2k} + \frac{20390,4 m_i}{b_{xi} (t_{p,xi}^*)^3} \varepsilon_{xik} \right), \quad u_{xik} = w_{xi2k}. \quad (6)$$

Здесь $\varepsilon_{ik} = g_{xik} - x_{ik}$, $k = 0, 1, 2, \dots$; $i = \overline{1, N_{БЛА}}$.

Алгоритм устройства управления поперечным движением БЛА:

$$w_{zi,k+1} = w_{zi,k} - \left(\frac{18,93}{t_{p,zi}^*} w_{zik} - \frac{251,24m_i}{b_{zi}(t_{p,zi}^*)^3} g_{zik}^* - \frac{2009,95m_i}{b_{zi}(t_{p,zi}^*)^3} z_{ik} \right) T, \quad (7)$$

$$u_{zik} = w_{zik} - \frac{119,45m_i}{b_{zi}(t_{p,zi}^*)^2} z_{ik}, \quad i = \overline{1, N_{\text{БЛА}}}, \quad (8)$$

где g_{zik}^* – значения задающего воздействие по каналу $g_{zi} \rightarrow z_i$ i -го БЛА; $k = 0, 1, 2, \dots$

Управление курсом БЛА. В процессе полета по заданной траектории БЛА обычно несколько раз изменяет направление полета, поэтому алгоритм устройства управления курсом БЛА записывается следующим образом:

$$w_{\psi i,k+1} = w_{\psi i,k} - \left(\frac{18,93}{t_{p,zi}^*} (w_{\psi ik} - w_{\psi i0}) + \frac{251,24J_{yi}}{b_{\psi i}(t_{p,zi}^*)^3} g_{\psi ik}^* + \frac{2009,95J_{yi}}{b_{\psi i}(t_{p,zi}^*)^3} (\psi_{ik} - \psi_{i0}) \right) T, \quad (9)$$

$$u_{\psi ik} = (w_{\psi ik} - w_{\psi i0}) - \frac{119,45J_{yi}}{b_{\psi i}(t_{p,zi}^*)^2} (\psi_{ik} - \psi_{i0}), \quad (10)$$

где $w_{\psi i0}$, ψ_{i0} – значения переменных $w_{\psi ik}$ и ψ_{ik} , которые они имеют в момент поступления нового значения угла направления полета i -го БЛА, $i = \overline{1, N_{\text{БЛА}}}$. Изменение направления полета БЛА осуществляется путем изменения в заданной точке траектории значения курса $g_{\psi i}^*$ в уравнении (9).

Исследование алгоритма управления курсом БЛА осуществлялось путем моделирования в MATLAB. На рис. 1 приведены отрезки траекторий движения группы из трех БЛА при выполнении ими поворотов: на угол $g_{\psi i}^* = -\pi/2$ (рис. 1, а) в заданных точках $(x_{ik} = 225, z_{ik} = (i-1)100, i = -1, 2, 3)$, и на угол $-\pi/4$ (рис. 1, б) в тех же точках. Как видно, заданные изменения направления полета выполняются всеми БЛА группы с высокой точностью.

При решении некоторых задач (например, картографирования или мониторинга площадей) БЛА должен осуществлять развороты для полетов в противоположном направлении по траектории, отстоящей на заданном расстоянии от траектории движения до разворота [15–18]. Рассмотрим алгоритм расчета задающего воздействия по каналу курса для выполнения данного маневра.

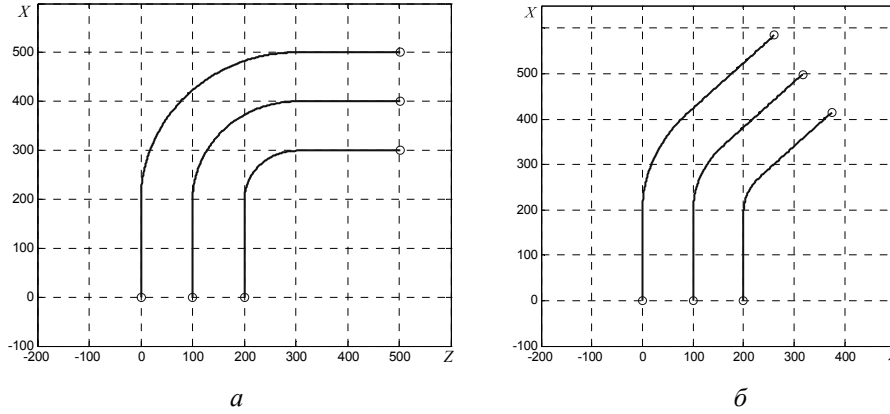


Рис. 1. Повороты группы БЛА:

a – на угол $-\pi/2$; *b* – на угол $-\pi/4$

Разворот БЛА. Этот маневр в автономном режиме целесообразно выполнять при постоянных скоростях продольного и углового движений, т. е. $V_{xik} = \text{const} \neq 0$ и $v_{\psi ik} = \text{const} \neq 0$, а также при нулевой скорости поперечного движения $V_{zik} = 0$. При этих условиях из выражений (1) вытекают следующие соотношения, которые позволяют найти значения координат *i*-го БЛА в наземной системе координат в момент времени $t_{\pi} = k_{\pi}T$:

$$x_{0ik_{\pi i}} = x_{0ik_{0i}} + V_{xik} [\sin(\psi_{0ik_{0i}} + v_{\psi i} k_{\pi i} T) - \sin(\psi_{0ik_{0i}} + v_{\psi i} k_{0i} T)] / v_{\psi i}, \quad (11)$$

$$z_{0ik_{\pi i}} = z_{0ik_{0i}} + V_{xi} [\cos(\psi_{0ik_{0i}} + v_{\psi i} k_{\pi i} T) - \cos(\psi_{0ik_{0i}} + v_{\psi i} k_{0i} T)] / v_{\psi i}. \quad (12)$$

Здесь k_{0i} , $k_{\pi i}$ – значения дискретного времени *k*, при которых начинается и заканчивается разворот; $v_{\psi ik} = \psi_{\pi i}^* / k_{\pi i} T$ – угловая скорость *i*-го БЛА вокруг оси OY_i ; $\psi_{\pi i}^*$ – заданный угол разворота.

3. ЧИСЛОВЫЕ ПРИМЕРЫ

Пример 1. Предположим некоторый БЛА из состояния, характеризующегося переменными: $\psi_{0i} = 0$, $x_{0i} = 120$, $z_{0i} = 0$, $k_{0i} = 0$. $V_{xik} = 25$ м/с, $V_{zik} = 0$, должен совершить разворот вправо, так чтобы его траектория сместилась на $\Delta_{si}^* = 200$ м. Найти его координаты на половинном и полном углах разворота, а также реальное смещение траектории.

Решение. В данном случае половинный угол разворота $\psi_{\pi i}^* / 2 = -\pi / 2$, а полный $\psi_{\pi i}^* = -\pi$, при этом время полного разворота $t_{\pi i} = k_{\pi i} T$. Следовательно, скорость изменения курсового угла $v_{\psi ik} = -\pi / T k_{\pi i} = \text{const}$. Так как

$\psi_{0i} = 0$, то смещение БЛА происходит вдоль оси OZ , т. е. $\Delta_{Si} = z_{0i}(k_{\Pi i})$. Поэтому, подставляя численные значения в формулы (11) и (12), получим

$$\begin{aligned} x_{0i}(k_{\Pi i} / 2) &= 120 + V_{xi} k_{\Pi i} T / \pi, & x_{0ik_{\Pi i}} &= x_{0i} = 120, \\ \Delta_{Si} &= z_{0i}(k_{\Pi i}) = 2V_{xi} k_{\Pi i} T / \pi. \end{aligned} \quad (13)$$

При заданных значениях $V_{xi} = 25$ м/с и $\Delta_{Si}^* = 200$ м находим $k_{\Pi i}^* = 200\pi / 50T = 12,56 / T$, $v_{\psi ik} = -\pi / 12,56 = 0,25$ рад/с. По формулам (13) находим

$$x_{0i}(t_{\Pi i}^* / 2) = x_{0i}(k_{\Pi i}^* / 2) = 120 + 25 \cdot 12,56 / 3,14 = 220 \text{ м}, \quad x_{0ik_{\Pi i}} = x_{0i} = 120 \text{ м};$$

$$\Delta_{Si} = z_{0i}(k_{\Pi i}) = 2 \cdot 25 \cdot 12,56 / 3,14 = 200 \text{ м}.$$

В данном случае траектории БЛА до и после разворота параллельны оси OX , поэтому реальные координаты БЛА при $t_{\Pi i}^* / 2$ и $t_{\Pi i}^*$, а также реальное смещение БЛА вдоль оси OZ можно оценить по проекции его траектории полета на земную поверхность. Эта проекция, полученная в MATLAB, приведена на рис. 2, а. Как видно, реальное смещение $\Delta_{Si} \approx 201 \div 202$ м, т. е. несколько больше расчетного значения. Это объясняется тем, что в начале и в конце разворота в системе управления направлением полета протекают переходные процессы, вызванные сменами задающего воздействия по каналу курса.

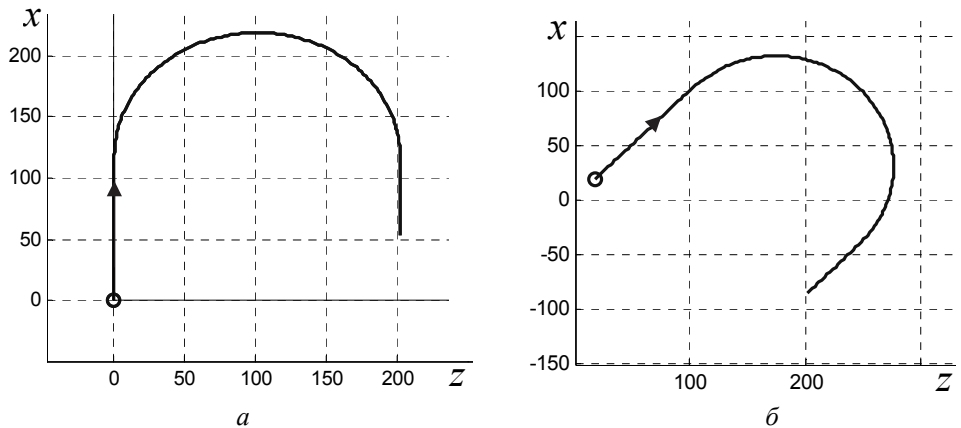


Рис. 2. Развороты БЛА:

а – вправо при $\psi_0 = 0$; б – вправо при $\psi_0 = -\pi/4$

Из выражений (13) вытекает алгоритм расчета параметров разворота – требуемой длительности разворота и скорости изменения курсового угла при заданном смещении Δ_{si}^* . Этот алгоритм составляют выражения:

$$t_{\pi i}^* = \frac{\Delta_{si}^* \pi}{2V_{xi}}, \quad v_{\psi i} = \begin{cases} -\pi/t_{\pi i}^*, & \text{разворот вправо,} \\ \pi/t_{\pi i}^*, & \text{разворот влево.} \end{cases} \quad (14)$$

Покажем эффективность предложенного алгоритма (14) на численном примере при начальном значении угла $\psi \neq 0$.

Пример 2. Пусть $\psi_{0i} = -45^\circ = -\pi/4$, $x_{0i} = 100$, $z_{0i} = 100$, $t_{0i} = 0$, $V_{xi} = 25$, $V_{zi} = 0$. Найти параметры разворота, координаты БЛА и смещение траектории при полном развороте.

Решение. По формулам (14) получаем те же значения, что и в предыдущем случае: $k_{\pi i}^* = 12,56/T$ с, $v_{\psi ik} = -0,25$ рад/с. Подставляя найденные значения в формулы (11) и (12), получим расчетные значения координаты БЛА после его разворота: $x_{0i}(k_{\pi i}^*) = -41,4$; $z_{0i}(k_{\pi i}^*) = 241,4$.

В результате моделирования данного случая в MATLAB получена проекция траектории движения i -го БЛА, приведенная на рис. 2, б. Нетрудно установить, что полученная траектория полета БЛА достаточно точно соответствует расчетной.

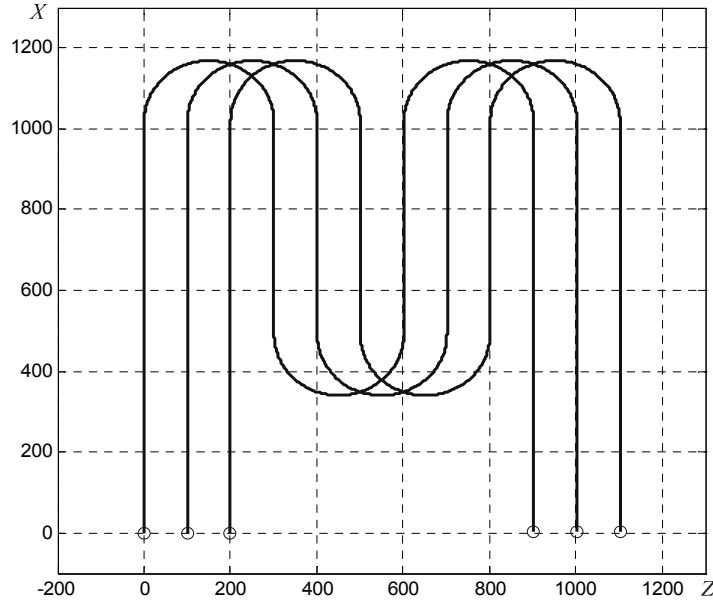


Рис. 3. Траектория полета группы БЛА в процессе мониторинга

Мониторинг земной поверхности. В процессе мониторинга некоторой территории группы БЛА обычно совершают полет по параллельным траекториям в чередующихся направлениях [17, 18]. При заданной скорости продольного движения БЛА и требуемом смещении прямолинейных участков

полета по формулам алгоритма (14) находятся параметры разворотов. Предположим, координаты площади, подлежащей мониторингу, лежат в пределах по оси OX от 475 до 1050 м, а по оси OZ_0 от 50 м до 1150 м. При прямолинейных полетах БЛА вдоль оси OX контролируемая площадь в поперечном направлении простирается от -50 м до $+1150$ м, т. е. общее смещение группы равно 1200 м. За один пролет группа из трех БЛА осуществляет мониторинг полосы шириной $100 \times 3 = 300$ м, $100 \Delta_{s1}^* = 200$ м. Следовательно, для мониторинга заданной территории группа БЛА должна выполнить $N_{пу} = 1200 / 300 = 4$ прямолинейных полета, траектории которых смещены друг относительно друга на 300 м. Результаты моделирования в MATLAB данной ситуации приведены на рис. 3.

4. АЛГОРИТМ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ БЛА

При выполнении маневров в некоторых случаях траектории БЛА могут пересекаться (см. рис. 3), что может привести к столкновениям БЛА. Поэтому в системы группового управления БЛА включаются алгоритмы предотвращения столкновений БЛА [5, 14, 17]. В тех случаях, когда высота полета не является постоянной, предотвратить столкновение можно путем изменения высоты полета одного из БЛА. Однако в рассматриваемом случае все БЛА группы совершают движения в одной плоскости, поэтому в данной работе предлагается логический алгоритм предотвращения столкновений БЛА в горизонтальной плоскости. Он активируется в системах группового управления тех пар БЛА, расстояние между которыми становится меньше $mS_{доп}$, где $S_{доп}$ – допустимое расстояние между БЛА, $m > 1$ – коэффициент запаса, назначаемый исходя из динамики БЛА. Для описания указанного алгоритма, учитывая дискретный характер систем управления, введем дополнительные переменные:

$$S_{ij}(k) = \sqrt{(x_{ik} - x_{jk})^2 + (z_{ik} - z_{jk})^2}, \quad v_i(k) = \sqrt{v_{xik}^2 + v_{zik}^2}, \quad (15)$$

$$\Delta S_{ij}(k) = S_{ij}(k) - S_{ij}(k-1), \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{1, N_{БЛА}}. \quad (16)$$

где $S_{ij}(k)$ и $\Delta S_{ij}(k)$ – дискретные значения расстояния между i -м и j -м БЛА и их разность. Алгоритм предотвращения столкновений включает следующие условия.

1. В течение всего времени полета системы управления каждого БЛА определяют указанные величины по формулам (17), (18).

2. Предполагается, что после набора высоты (при $t = 0$) выполняется условие $S_{ij}(0) > mS_{доп}$; вспомогательные величины: $\mu_i = 0, i = \overline{1, N_{БЛА}}$.

3. Если при некотором $k = k_{ij}$ выполнится условие $S_{ij}(k_{ij}) < mS_{доп}$ и $\Delta S_{ij}(k_{ij}) < 0$, то запоминаются значения $g_{xi}(k_{ij})$ и $g_{zj}(k_{ij})$ и изменяются соответствующие величины: $\mu_i = \mu_j = 1$.

3а. Если $v_{zik} \cdot v_{zjk} > 0$, т. е. i -й и j -й БЛА вдоль оси z движутся в одном направлении, то для предотвращения столкновения изменяется задающее воздействие по координате z одного из БЛА так, чтобы точку пересечения своих траекторий i -й и j -й БЛА прошли в разные моменты времени. С этой целью

если $|z_i(k_{ij})| < |z_j(k_{ij})|$ и $v_{zi}(k_{ij}) > 0$, то $g_{zik} = z_{i0} - mS_{\text{доп}} \text{sign}(v_{zi}(k_{ij}))$ и $z_{i0} = z_i(k_{ij})$;

если $|z_j(k_{ij})| < |z_i(k_{ij})|$ и $v_{zj}(k_{ij}) > 0$, то $g_{zjk} = z_{j0} - mS_{\text{доп}} \text{sign} \times (v_{zj}(k_{ij}))$ и $z_{j0} = z_j(k_{ij})$;

если $|z_i(k_{ij})| < |z_j(k_{ij})|$ и $v_{zi}(k_{ij}) < 0$, то $g_{zjk} = z_{j0} - mS_{\text{доп}} \text{sign}(v_{zj}(k_{ij}))$ и $z_{j0} = z_j(k_{ij})$;

если $|z_j(k_{ij})| < |z_i(k_{ij})|$ и $v_{zj}(k_{ij}) < 0$, то $g_{zik} = z_{i0} - mS_{\text{доп}} \text{sign}(v_{zi}(k_{ij}))$ и $z_{i0} = z_i(k_{ij})$.

3б. Если же $v_{zi}(k_{ij}) \cdot v_{zj}(k_{ij}) < 0$, т. е. i -й и j -й БЛА вдоль оси OZ_0 движутся навстречу друг другу, то для предотвращения столкновения также изменяются задающие воздействия по координате z обеих БЛА так, чтобы точку пересечения своих траекторий i -й и j -й БЛА прошли в разные моменты времени, т. е.

если $v_{zi}(k_{ij}) \cdot v_{zj}(k_{ij}) < 0$, то $z_{\gamma 0} = z_{\gamma}(k_{ij})$, $g_{z\gamma k} = z_{\gamma 0} - mS_{\text{доп}} \text{sign} \times (v_{z\gamma}(k_{ij}))$, $\gamma = \min\{i, j\}$.

Далее БЛА продолжают движение при новых заданных значениях до тех пор, пока расстояние между ними не станет больше $mS_{\text{доп}}$. Тогда

если $S_{ij}(k'_{ij}) \geq mS_{\text{доп}}$ и $\mu_i = \mu_j = 1$, то $\mu_{\gamma} = 0$, $z_{\gamma 0} = z_{\gamma}(k'_{ij})$, $g_{z\gamma} = g_{z\gamma}(k'_{ij})$, $\gamma = i, j$.

Об эффективности работы предложенного алгоритма предотвращения столкновений можно судить по графикам, приведенным на рис. 4, где показаны траектории двух БЛА. Траектория первого БЛА не показана, так как он не влияет на ситуацию. Здесь параметры полета: $g_{x2k} = 25kT$ м, $g_{x3k} = x_{2k} - S_{23}$ м, $g_{z2k} = 4000$ м, $g_{z3k} = z_{2k} + 3000$ м, $z_{20} = 4100$ м, $z_{30} = 4000$ м, $T = 0,1$ с. Исходное расстояние между вторым и третьим БЛА по координате x : $S_{x23} = 100$ м, допустимое расстояние $S_{\text{доп}} = 20$ м, $m = 2,5$. При этих условиях возможно столкновение второго и третьего БЛА, так как их траектории пересекаются. Это хорошо видно на рис. 4, а. Моделирование полета группы из трех БЛА позволило установить, что при $k = k_{23} \approx 38$ расстояние S_{23} между вторым и третьим БЛА становится меньше допустимого значения $mS_{\text{доп}} = 50$ м (см. рис. 4, б), причем $v_{z2k} < 0$, $v_{z3k} > 0$ и $i < j$. Поэтому в соответствии с алгоритмом предотвращения столкновений при $k = 38$ (на рис. 4, а этот момент отмечен кружками) изменяются задающие воздействия g_{zk} по каналу z второго и третьего БЛА.

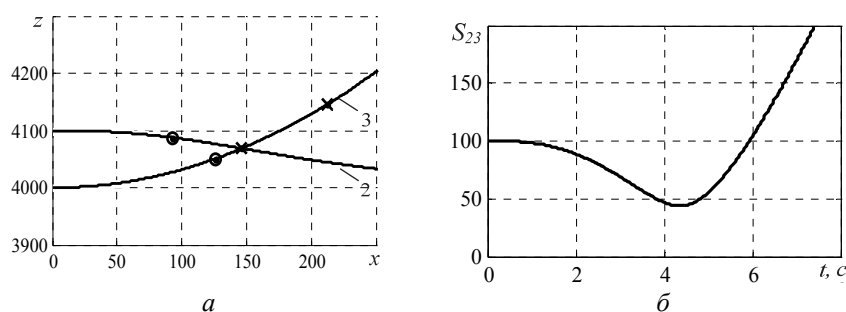


Рис. 4. К работе алгоритма предотвращения столкновений

Практически алгоритм предотвращения столкновений в данном случае осуществляет задержку второго БЛА, в результате чего второй и третий БЛА проходят точку пересечения их траекторий в разные моменты времени. На рис. 4, а крестиками показаны положения второго и третьего БЛА в момент прохождения вторым БЛА точки пересечения их траекторий. Изменение расстояния между вторым и третьим БЛА показано на рис. 4, б. Согласно этому рисунку алгоритм предотвращения столкновений отключается при $k'_{23} \approx 48$, и БЛА переходят к реализации исходных задающих воздействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы. Разработанные алгоритмы управления и предотвращения столкновений обеспечивают безопасное движение беспилотных летательных аппаратов в автономном режиме по сложным траекториям на постоянной высоте. В частности, они позволяют рассчитать непосредственно на борту беспилотных летательных аппаратов параметры разворота для их движений в противоположном направлении по траекториям, смещенным на заданное расстояние по отношению к предыдущим траекториям.

Полученные результаты могут использоваться при разработке как бортовых систем группового управления, так и аппаратуры пунктов дистанционного управления беспилотными летательными аппаратами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение беспилотных летательных аппаратов в целях повышения эффективности систем жизнеобеспечения населения / А.В. Лазутин, Д.В. Рыбаков, А.В. Флоров, М.В. Шинкевич // Материалы Десятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Шестой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»: в 2 т. – Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т. 1. – С. 58–61.
2. White B.A., Shin H.S., Tsourdos A. UAV obstacle avoidance using differential geometry concepts // Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 28 August – 2 September 2011. – [S. 1.]: IFAC, 2011. – P. 6325–6330.
3. Canny J., Lin M. An opportunistic global path planner // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotic and Automation, Cincinnati, OH, 13–18 May 1990. – Cincinnati, 1990. – P. 1554–1559.
4. Online path planning for UAV using an improved differential evolution algorithm / X. Zhang, J. Chen, B. Xin, H. Fang // Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 28 August – 2 September 2011. – [S. 1.]: IFAC, 2011. – P. 6349–6354.

5. *Kuchar J., Yang L.* Review of conflict detection and resolution modeling methods // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* – 2000. – Vol. 1, N 4. – P. 179–189.
6. *Абросимов В.К., Гончаренко В.И.* Мониторинг объектов территорий группой интеллектуальных беспилотных летательных аппаратов // *Материалы Десятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Шестой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»: в 2 т.* – Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т. 1. – С. 14–23.
7. *Дао Зуи Нам, Ивановский С.А.* Приближенные алгоритмы локализации мобильного робота // *Научный вестник НГТУ.* – 2014. – № 2 (55). – С. 109–121.
8. *Мищенко П.В., Беляшов А.В.* Программная организация высокопродуктивных распределенных вычислительных систем с программируемой структурой // *Научный вестник НГТУ.* – 2016. – № 2 (63). – С. 115–128. – doi: 10.17212/1814-1196-2016-2-115-128.
9. *Ahmed B., Pota H.R., Garratt M.* Flight control of a rotary wing UAV using backstepping // *International Journal of Robust and Nonlinear Control.* – 2009. – Vol. 20. – P. 639–658.
10. *Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Shapovalov I.O.* Self-organization in groups of intelligent robots // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* – 2015. – Vol. 345. – P. 171–181.
11. *Пишихонов В.Х., Медведев М.Ю.* Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2010. – № 3 (104). – С. 187–196.
12. *Гайдук А.Р., Медведев М.Ю., Плаксиенко Е.А.* Синтез грубых систем группового управления роботами // *Наука и образование на рубеже тысячелетий: сборник научно-исследовательских работ / Кисловодский гуманитарно-технологический институт.* – Кисловодск, 2016. – Вып. 1. – С. 6–23.
13. *Пишихонов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р.* Алгоритмы управления неоднородными группами подвижных объектов в двумерных средах с препятствиями // *Мехатроника, автоматизация и управление.* – 2016. – Т. 18, № 8. – С. 515–524.
14. *Групповое управление БЛА / А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян, В.И. Меркулов, К.В. Бесклубова* // *Информационно-измерительные и управляющие системы.* – 2014. – № 11. – С. 24–36.
15. *Система автономного управления маневрами БЛА / А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян, А.А. Дьяченко, Е.А. Плаксиенко* // *Системный анализ, управление и обработка информации: труды VII Международного научного семинара (п. Дивноморское, 6–12 октября 2016 г.) / под общ. ред. Р.А. Нейдорфа.* – Ростов н/Д., 2016. – С. 24–30.
16. *Анисимов В.Н., Кабанов С.А.* Управление траекторией движения летательного аппарата при облете препятствий с применением методов аналитической механики // *Автоматика и телемеханика.* – 2005. – № 3. – С. 3–10.
17. *UAV route planning using multiobjective and colony system / Z.H. Wang, W.G. Zhang, J.P. Shi, Y. Han* // *Proceedings of IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent System, Chengdu, China, 21–24 September 2008.* – Chengdu, 2008. – P. 797–800.
18. *Каршаков Е.В.* Особенности алгоритмов управления летательным аппаратом при аэросъемке // *Проблемы управления.* – 2012. – № 3. – С. 71–76.

Гайдук Анатолий Романович, доктор технических наук, профессор Южного федерального университета; заведующий кафедрой Кисловодского гуманитарно-технического института; действительный член Академии инженерных наук имени А.М. Прохорова. Основное направление научных исследований – теория систем автоматического управления и робототехнических комплексов, анализ и синтез. Имеет более 330 научных публикаций, в том числе 17 монографий. E-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Дьяченко Александр Александрович, младший научный сотрудник НИИ МВС им. академика А.В. Каляева ЮФУ. Основное направление научных исследований – групповая робототехника, обработка изображений. Имеет более 20 научных публикаций. E-mail: aleksandernet@yandex.ru

Капустян Сергей Григорьевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ЮНЦ РАН; заведующий отделом НИИ МВС им. академика А.В. Каляева ЮФУ. Основное направление научных исследований – групповая робототехника, многопроцессорные информационно-управляющие и вычислительные системы. Имеет более 280 научных публикаций, в том числе 5 монографий. E-mail: kap56@mail.ru

Плаксиенко Елена Анатольевна, доцент Таганрогского института управления и экономики. Основное направление научных исследований – управление в технических и экономических системах. Имеет более 50 публикаций, в том числе 2 монографии. E-mail: pumkad@mail.ru

Algorithms of autonomous group control of UAV horizontal motion *

A.R. GAIDUK¹, A.A. DYACHENKO², S.G. KAPUSTYAN³, E.A. PLAKSIENKO⁴

¹ Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy lane, Taganrog, 347928, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor; Kislovodsk Humanitarian-Technical Institute, 37A, Victory Ave., Kislovodsk, 337700, Russian Federation, head of department. E-mail: gaiduk_2003@mail.ru

² SFedU Acad. Kalyaev Research Institute of Multiprocessor Computer Systems, 2, Chekhov St., Taganrog, 347928, Russian Federation, junior researcher. E-mail: aleksandernet@yandex.ru

³ Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2, Chekhov St., Taganrog, 347928, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), leading researcher; SFedU Acad. Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems, head of department. E-mail: kap56@mail.ru

⁴ Taganrog Institute of Management and Economics, 45, Petrovskaya St., Taganrog, 347900, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: pumkad@mail.ru

Information technologies are finding increasing application including problems of engineering object control. The application of information technologies for implementing autonomous control algorithms of horizontal movements of a group of one-type unmanned airborne vehicles (UAV) carrying out similar tasks is considered in the article. A distinctive feature of UAV is a necessity to solve intellectual problems of flying vehicle control in the absence of crew on its board. It calls for the development of special information technologies for making control decisions in an autonomous mode. The complexity of the control problem is caused by the complexity of UAV trajectories which include both rectilinear and curvilinear sections. The algorithms proposed in article provide autonomous stabilization of the longitudinal motion speed, the displacement of UAV in the transverse direction, and also a change in the traffic route through a specified angle. An original algorithm of autonomous turn of UAV aimed at its moving in the opposite direction along the trajectory displaced for a required distance relative to the previous trajectory has been developed. An algorithm of autonomous collision avoidance of UAVs flying at the same altitude is proposed. The results of computer simulation of the suggested algorithms testify that these algorithms ensure executing the required maneuvers in an autonomous UAV flight.

The developed algorithms of autonomous control of UAV flight are designed for their implementation with the use of onboard computing facilities and modern information technologies. These algorithms can be applied when developing both onboard group control systems and the equipment of ground service stations of UAV flights intended for solving various problems. At the same time the approach that the proposed algorithms are based on can be used for solving control problems of other engineering objects.

Keywords: system, autonomous control, algorithm, unmanned airborne vehicle (UAV), trajectory, maneuver, turn, UAV group, collision avoidance

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-120-134

* Received 13 March 2017.

REFERENCES

1. Lazutin A.V., Rybakov D.V., Florov A.V., Shinkevich M.V. [Application of unmanned aerial vehicle with a view of increase of efficiency of the population life-support systems]. *Materialy Desyatoy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya" i Shestoi molodezhnoi shkoly-seminara "Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh"*. V 2 t. T. 1 [Materials of the Tenth All-Russia scientific-practical conference "Perspective systems and problems of control" and the Sixth youth a school-seminar "Control and processing of the information in technical systems". In 2 vol. Vol. 1]. Rostov-on-Don, SFEDU Publ., 2015, pp. 58–61. (In Russian).
2. White B.A., Shin H.S., Tsourdos A. UAV obstacle avoidance using differential geometry concepts. *Preprints of the 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, 28 August – 2 September 2011, pp. 6325–6330.
3. Canny J., Lin M. An opportunistic global path planner. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotic and Automation*, Cincinnati, OH, 13–18 May, 1990, pp. 1554–1559.
4. Zhang X., Chen J., Xin B., Fang H. Online path planning for UAV using an improved differential evolution algorithm. *Preprints of the 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, 28 August – 2 September 2011, pp. 6349–6354.
5. Kuchar J., Yang L. Review of conflict detection and resolution modeling methods. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2000, vol. 1, no. 4, pp. 179–189.
6. Abrosimov V.K., Goncharenko V.I. [Monitoring of the territories objects by group of intellectual unmanned aerial vehicle]. *Materialy Desyatoy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya" i Shestoi molodezhnoi shkoly-seminara "Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh"*. V 2 t. T. 1 [Materials of the Tenth All-Russia scientific-practical conference "Perspective systems and problems of control" and the Sixth youth a school-seminar "Control and processing of the information in technical systems". In 2 vol. Vol. 1]. Rostov-on-Don, SFEDU Publ., 2015, pp. 14–23. (In Russian).
7. Dao Duy Nam, Ivanovskiy S.A. Priblizhennyye algoritmy lokalizatsii mobil'nogo robota [Approximation algorithms for the mobile robot localization]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 2 (55), pp. 109–121.
8. Mishchenko P.V., Belyashov A.V. Programmaya organizatsiya vysokoproduktivnykh raspredelennykh vychislitel'nykh sistem s programmiruemoi strukturoi [Program organization of high-performance distributed computing systems with a programmable structure]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (63), pp. 115–128. doi: 10.17212/1814-1196-2016-2-115-128.
9. Ahmed B., Pota H.R., Garratt M. Flight control of a rotary wing UAV using backstepping. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2009, vol. 20, pp. 639–658.
10. Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Shapovalov I.O. Self-organization in groups of intelligent robots. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, vol. 345, pp. 171–181.
11. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sintez adaptivnykh sistem upravleniya letatel'nyimi apparatami [Synthesis of adaptive control systems by flying devices]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2010, no. 3 (104), pp. 187–196.
12. Gaiduk A.R., Medvedev M.Yu., Plaksienko E.A. [Synthesis of rough systems of group control by robots]. *Nauka i obrazovanie na rubezhe tysyacheletii: sbornik nauchno-issledovatel'skikh rabot* [Science and education on a boundary of millennia: the collection of research works]. Kislovodsk Humanitarian-Technological Institute. Kislovodsk, 2016, iss. 1, pp. 6–23. (In Russian).
13. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R. Algoritmy upravleniya neodnorodnymi gruppami podvizhnykh ob'ektov v dvumernykh sredakh s prepyatstviyami [Control algorithms of non-uniform groups of mobile objects in two-dimensional environments with obstacles]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2016, vol. 18, no. 8, pp. 515–524.

14. Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Merkulov V.I., Besklubova K.V. Gruppovoe upravlenie BLA [Group control of UAV]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayuschie sistemy – Information-measuring and Control Systems*, 2014, no. 11, pp. 24–36.

15. Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Dyachenko A.A., Plaksienko E.A. [System of independent control of the UAV maneuvers]. *Sistemnyi analiz, upravlenie i obrabotka informatsii: trudy VII Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara* [System analysis, control and processing of the information: works of 7th International seminar]. Rostov-on-Don, 2016, pp. 24–30. (In Russian).

16. Anisimov V.N., Kabanov S.A. Upravlenie traektoriei dvizheniya letatel'nogo apparata pri oblete prepyatstviy s primeneniem metodov analiticheskoi mekhaniki [Control of movement trajectory of the flying device at flight of obstacles with application of the analytical mechanics methods]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote control*, 2005, no. 3, pp. 3–10. (In Russian).

17. Wang Z.H., Zhang W.G., Shi J.P., Han Y. UAV route planning using multiobjective and colony system. *Proceedings of IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent System*, Chengdu, China, 21–24 September 2008, pp. 797–800.

18. Karshakov E.V. Osobennosti algoritmov upravleniya letatel'nym apparatom pri aeros"emke [Features of control algorithms of the device flying at aerial photograph]. *Problemy upravleniya – Control Sciences*, 2012, no. 3, pp. 71–76.