

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 629.7

Л. М. НЕУГОДНИКОВА

## ЗАДАЧА ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕЙСТВИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Рассмотрены наиболее распространенные стратегии управления беспилотными летательными аппаратами в группе. Сформулирована задача планирования действий летательного аппарата при заданных ограничениях. Предложен критерий оптимальности для оценки полученного решения.

*Ключевые слова:* беспилотный летательный аппарат, управление группами мобильных объектов, траекторное управление.

**Введение.** Одной из актуальных в настоящее время является задача управления группами автономных мобильных объектов (в том числе, в заранее неизвестной среде), в качестве которых могут выступать автомобильные, робототехнические и авиационные системы.

Известны различные подходы к управлению системами, включающими несколько летательных аппаратов (ЛА). В рамках одного из подходов объект управления — это группа ЛА с четко определенным положением одних аппаратов относительно других. Для этого в группе выделяются ведущий и ведомые ЛА, составляющие вместе единицу группы — звено. Стратегия, используемая для управления звеном, заключается в соблюдении заданных расстояний между его элементами, а также в необходимом для этого поддержании соответствующих скоростей и ускорений [1].

Разнообразие существующих конструкций беспилотных ЛА и ряд возможностей, которыми они обладают, обуславливает широкий спектр областей их применения, при этом наибольшее распространение имеют информационные системы, предназначенные для разведки и мониторинга. Управление двумя-тремя беспилотными ЛА можно организовать с привлечением операторов, осуществляющих дистанционное пилотирование. Для управления более многочисленными группами небольших ЛА используются различные стратегии. Например, вся рабочая зона разбивается на участки, и за каждым из них закрепляется один ЛА, осуществляющий все свои действия в его пределах [2]. Другой подход, получивший распространение в последнее время, основан на принципах, базирующихся на имитации поведения общественных насекомых. Каждый ЛА оставляет „след“, воспринимаемый датчиками других беспилотных ЛА, что позволяет им определять, какой из участников группы оставил этот „след“ и когда. При этом все ЛА непрерывно передают информацию о своем местонахождении и обнаруженных „следах“ в наземную систему управления, где в результате комплексирования формируется наиболее полная информация о ситуации в рабочей зоне. Такие множества однотипных беспилотных ЛА называют „роями“ (swarms) [3].

Краткий анализ существующих стратегий управления группами беспилотных ЛА позволил выявить следующие недостатки:

- управляемые комплексы состоят из однотипных ЛА;
- перед всеми ЛА, находящимися в составе таких комплексов, ставятся аналогичные или идентичные цели;
- в общем случае не учитывается топливно-временной ресурс ЛА и его возможные изменения, связанные с выполнением летного задания.

В то же время современные авиационные комплексы могут иметь в своем составе различные беспилотные летательные аппараты, выполняющие в рамках глобальной задачи решение более простых подзадач, соответственно эффективность управления всей группой будет напрямую зависеть от качества управления каждым объектом в ее составе. Таким образом, возникает задача управления ЛА определенного типа, предназначенным для решения конкретной подзадачи (разведки, транспортировки, слежения и т.д.) с учетом его летно-технических характеристик и ограничений, а также требований, предъявляемых к функционированию группы в целом.

**Задача управления автономным мобильным объектом в составе группы.** Управление объектом, входящим в состав группы, можно рассматривать как задачу планирования его действий, направленных на достижение определенной поставленной перед ним цели. Приведем формальное описание такой задачи, используя подход, описанный в работе [4].

Пусть в некоторой среде  $E$ , состояние которой описывается вектор-функцией  $E(t) = \langle e_1, e_2, \dots, e_l \rangle$ , функционирует объект  $S$ , состояние которого описывается вектор-функцией  $S(t) = \langle s_1, s_2, \dots, s_m \rangle$ . Тогда текущая ситуация в среде  $P = \langle S, E \rangle$ ,  $P(t) = \langle p_1, p_2, \dots, p_{m+l} \rangle$ , определяется текущими значениями функций  $S = S(t)$  и  $E = E(t)$ , где  $t$  — текущий момент времени.

Предположим, что объект может выполнять некоторые действия, описываемые вектор-функцией  $A(t) = \langle a_1, a_2, \dots, a_h \rangle$ , с помощью которых он может изменять как свое собственное состояние, так и состояние окружающей его среды. В общем случае эти изменения имеют непрерывный характер и определяются системой дифференциальных уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= f(A, S, E), \\ \frac{dE}{dt} &= f^*(A, S, E) \end{aligned} \right\} \text{или } \frac{dp_i}{dt} = f_i(A, P), \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Заметим, что ряд ситуаций в системе „объект—среда“ может быть запрещен. Поэтому в пространстве ситуаций  $\{P\}$  необходимо ввести некоторую систему ограничений, например, в виде неравенства

$$\alpha(P) \leq 0. \quad (2)$$

Аналогично, ограничения для пространства действий могут быть представлены в виде неравенства

$$\beta(A, P) \leq 0. \quad (3)$$

В общем случае может существовать несколько функций  $A(t)$ , удовлетворяющих данным условиям. Тогда для выбора оптимального решения задачи можно использовать функционал, определяющий успешность выполнения объектом конкретной функции действий на интервале времени  $[t_0, t_k]$ :

$$J = \int_{t_0}^{t_k} f_0(P, S, E) dt = \int_{t_0}^{t_k} f_0(A, P) dt. \quad (4)$$

При этом если объект функционирует в динамической среде, состояние которой постоянно изменяется по неизвестным законам, то решать задачу планирования на всем временном интервале  $[t_0, t_k]$  не имеет смысла. В этом случае целесообразно определять только начальное значение функции  $A(t_0)$  в момент времени  $t_0$ . Тогда каждый новый расчет значения  $A(t_0)$  будет осуществляться с учетом всех изменений ситуации  $P$ , что позволит оперативно корректировать действия ЛА. Таким образом, при функционировании ЛА в динамической среде задача планирования действий может быть сформулирована следующим образом: определить значение вектор-функции  $A(t_0)$ , реализующей экстремум функционала (4) при граничных условиях  $P(t_0) = P_0$  и  $P(t_k) \in \{P\}_k$  (здесь  $\{P\}_k$  — множество целевых ситуаций), связях (1) и ограничениях (2), (3).

**Задача управления траекторией беспилотного летательного аппарата.** Опишем формально поведение в исполнительной зоне (среде)  $j$ -го ЛА с единственной задачей: произвести обработку (фотосъемку) некоторой области I (рис. 1). Рассмотрим простейшую модель движения ЛА в плоской прямоугольной системе координат  $XOZ$ , оси которой лежат в горизонтальной плоскости. „Полет“ над областями II запрещен (здесь  $X_{jЛА}$  и  $Z_{jЛА}$  — текущие координаты ЛА). Нахождение ЛА над областью III разрешено, но ее обработка не требуется (или запрещена). Будем считать, что изображение, формируемое видеокамерой, имеет форму квадрата.

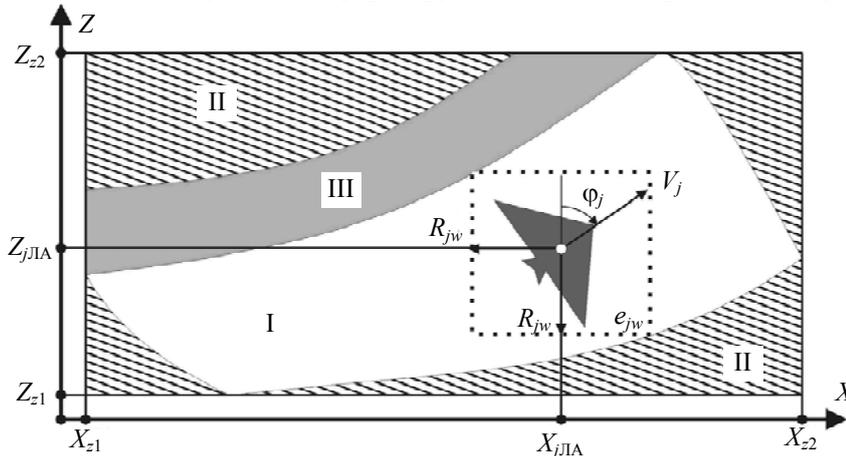


Рис. 1

Множество  $P_j$  (ситуация в исполнительной зоне для  $j$ -го ЛА) определяется следующими параметрами:

$p_{j1} = V_j$  — горизонтальная скорость ЛА;

$p_{j2} = \omega_j$  — угловая скорость ЛА при изменении направления движения;

$p_{j3} = \varphi_j$  — курсовой угол в выбранной системе координат;

$p_{j4} = x_j$  — координата положения ЛА;

$p_{j5} = z_j$  — координата положения ЛА;

$p_{j6} = e_{jw}$  — площадь участка исполнительной зоны (ИЗ), обработанного в единицу времени.

Ограничения для пространства ситуаций  $P$ , в которых может находиться ЛА, определяются его летно-техническими характеристиками, а также параметрами установленного на нем оборудования [5]:

$$\alpha = \{V_j, n_y, t, h_w, R_{jw}\}, \quad (5)$$

где

- $V_{\min} \leq V_j \leq V_{\max}$  — скорость полета;
- $n_y \leq n_{y\max}$  — нормальная перегрузка;
- $t \leq t_{\max}$  — время полета;
- $h_w \pm \Delta h$  — высота полета при выполнении задания;
- $R_{jw} \pm \Delta R(\Delta h)$  — радиус обзора видеокамеры ЛА при высоте полета  $h_w$ .

Перечислим возможные действия ЛА в исполнительной зоне с учетом ограничений:

$$\beta = \{a_{j1}, a_{j2}, a_{j3}\}, \tag{6}$$

где

- $a_{j1}$  — задать линейное ускорение  $a_{j1}^{\min} \leq a_{j1} \leq a_{j1}^{\max}$ ;
- $a_{j2}$  — задать угловое ускорение  $a_{j2}^{\min} \leq a_{j2} \leq a_{j2}^{\max}$ ;
- $a_{j3}$  — начать обработку ИЗ  $0 \leq a_{j3} \leq a_{j3}^{\max}$ .

Связь между ситуацией в ИЗ и действиями ЛА определяется выражениями

$$\begin{aligned} \frac{dp_{j1}}{dt} &= a_{j1}; & \frac{dp_{j2}}{dt} &= a_{j2}; & \frac{dp_{j3}}{dt} &= p_{j2}; & \frac{dp_{j4}}{dt} &= p_{j1} \cos p_{j3}; \\ \frac{dp_{j5}}{dt} &= p_{j1} \sin p_{j3}; & \frac{dp_{j6}}{dt} &= 2R_{jw} a_{j3} p_{j1}. \end{aligned} \tag{7}$$

Далее в тексте индекс  $j$  (характеризующий ситуацию для одного  $j$ -го ЛА) опустим.

Для описания исполнительной зоны необходимо представить ее в виде совокупности некоторого множества  $d$  прямоугольных областей  $D_k, k = \overline{1, d}$  (провести ее дискретизацию) (рис. 2). Разрешенная для полетов зона I определяется разностью общей площади ИЗ и запрещенных зон II и III. Шаг дискретизации следует выбрать исходя из величины  $e_w$ , а также с учетом скорости полета и перегрузки. Таким образом, дискретное изображение ИЗ может быть различным для разных типов ЛА.

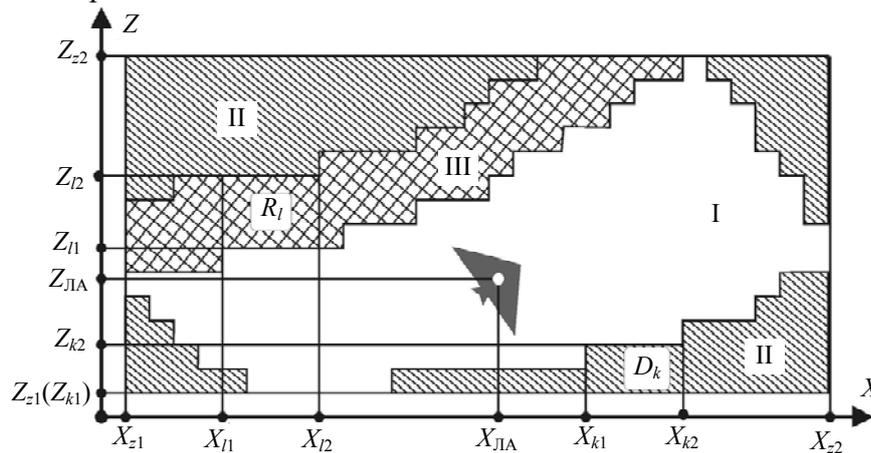


Рис. 2

Условие нахождения ЛА вне запрещенного участка  $D_k$  — области II — можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} X_{k2} &\leq X_{ЛА} \leq X_{k1}, \\ Z_{k2} &\leq Z_{ЛА} \leq Z_{k1}. \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

Далее, пусть в исполнительной зоне есть участок — область  $\Pi$ , при „полете“ над которым обработка запрещена (см. рис. 2 — представлен в виде совокупности некоторого множества  $r$  прямоугольных областей  $R_l, l = \overline{1, r}$ ). Тогда обработка ИЗ разрешена только в то время, когда координаты ЛА удовлетворяют следующим неравенствам:

$$\left. \begin{aligned} X_{l2} \leq X_{\text{ЛА}} \leq X_{l1}, \\ Z_{l2} \leq Z_{\text{ЛА}} \leq Z_{l1}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Для полного описания ИЗ неравенства (8) и (9) необходимо дополнить условием

$$\left. \begin{aligned} X_{z1} \leq X_{\text{ЛА}} \leq X_{z2}, \\ Z_{z1} \leq Z_{\text{ЛА}} \leq Z_{z2}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

характеризующим внешние границы рабочей области.

Зададим критерий оптимальности в виде требования минимизации участка ИЗ, необработанного за время  $[t_0, t_k]$ :

$$J = \int_{t_0}^{t_k} (2R_w V - e_w) dt = \int_{t_0}^{t_k} (2R_w p_1 - p_6) dt, \quad (11)$$

где  $2R_w V$  — участок ИЗ, который должен быть обработан ЛА при прямолинейном движении со скоростью  $V$  в области, удовлетворяющей условиям (8) и (9) за единицу времени;  $e_w = 4R_w^2 a_3$ .

Таким образом, сформулирована задача: определить в текущий момент времени  $t_0$  значение вектор-функции  $A(t) = \langle a_1(t), a_2(t), a_3(t) \rangle$ , обеспечивающее минимум функционала (11) при уравнениях связей (7) с учетом ограничений (5), (6) и условий (8)—(10).

**Заключение.** Траекторное управление группой разнотипных летательных аппаратов является актуальной задачей, для успешного решения которой необходимо максимально эффективно управлять каждым ЛА. Формализована задача управления траекторией отдельного беспилотного ЛА, выполняющего фотосъемку окружающей среды в исполнительной зоне произвольной формы, в условиях действия ограничений. Сформулирован критерий оптимальности для выбора наилучшего решения из нескольких возможных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боднер В. А. Теория автоматического управления полетом. М.: Наука, 1964. 700 с.
2. Hexmoor H., McLaughlan B., Baker M. Swarm control in unmanned aerial vehicles // The Society for Modeling & Simulation International [Электронный ресурс]: <<http://www2.cs.siu.edu/~brianm/Papers/SwarmControl05.pdf>> (21.04.2013).
3. Walter B., Sannier A., Reiners D., Oliver J. UAV Swarm control: calculating digital pheromone fields with the GPU // The Society for Modeling & Simulation International [Электронный ресурс]: <<http://www.scs.org/pubs/jdms/vol3num3/JDMSIITSE Cvol3no3Walter167-176.pdf>> (21.04.2013).
4. Интеллектуальные роботы: Учеб. пособие / И. А. Каляев, В. М. Лохин, И. М. Макаров и др.; Под общ. ред. Е. И. Юревича. М.: Машиностроение, 2007. 360 с.
5. Петунин В. И., Неугодникова Л. М. Синтез системы автоматического управления углом курса и ограничения нормальной перегрузки летательного аппарата // Авиакосмическое приборостроение. 2012. № 11. С. 10—18.

#### Сведения об авторе

**Любовь Михайловна Неугодникова** — аспирант; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра информационно-измерительной техники; E-mail: Grifon\_love@mail.ru