

УДК 621.396.4

**Лысенко А.И.**Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**Алексеева И.В.**Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**Тачинина Е.Н.**

Национальный авиационный университет

## АЛГОРИТМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОДСКАЗЧИКА ДЛЯ ОПЕРАТОРА, УПРАВЛЯЮЩЕГО ГРУППОЙ БПЛА

*В статье предложен алгоритм «интеллектуального подсказчика», позволяющий задавать маневры беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оценивать координаты текущего положения БПЛА относительно заданной траектории, идентифицировать оптимальные моменты времени выполнения групповых маневров. Синтезированный алгоритм вырабатывает оптимальное, с учетом заданного критерия качества, управление движением метки текущего положения к заданному положению и рассчитывает оптимальный момент времени и фазовую координату разделения группы БПЛА.*

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, интеллектуальный подсказчик, оптимальное управление, ветвящаяся траектория.

**Постановка проблемы.** В настоящее время беспилотные летательные аппараты широко используются для управления в кризисных ситуациях и получения оперативной информации в зоне чрезвычайной ситуации.

При проведении спасательных операций беспилотные летательные аппараты являются наиболее достоверным и безопасным источником информирования наземных групп. БПЛА проводят оперативную разведку и детальное обследование местности, что позволяет своевременно оценивать обстановку и принимать управленческие решения по координации действий аварийно-спасательных отрядов.

Для решения такого рода задач перспективным является групповое применение беспилотных летательных аппаратов. Преимущество применения группы БПЛА становится очевидным в задачах, в которых возможно распараллеливание сложной задачи на несколько аппаратов – например, при проведении мониторинга обширных территорий за короткое время; в задачах обеспечения связи с мобильными абонентами для эффективного взаимодействия наземных поисково-спасательных служб; для транспортировки и сброса по команде оператора малогабаритных грузов в

заданную точку, что является затруднительным при использовании одиночных БПЛА [5].

Вместе с тем, управление БПЛА в составе группы значительно сложнее, чем управление одиночным аппаратом [7]. Это связано с тем, что помимо управления полетом и действиями собственно летательного аппарата необходимо обеспечить определенную взаимосвязь и согласованность его действий с другими участниками группы с учетом их групповой задачи.

Для группового управления БПЛА в этой статье предлагается использовать полиэргатическую систему управления движением группы БПЛА. Схема функционирования полиэргатической системы управления движением группы БПЛА представлена на рис. 1.

При таком способе построения системы управления (рис. 1) выполнение спланированных действий БПЛА в процессе решения общей задачи возлагается на оператора.

Оператору необходимо решить штурманскую задачу, то есть задать группе БПЛА программную траекторию движения, фазовую координату разделения группы, интервал времени, в течение которого допускается разделение группы.

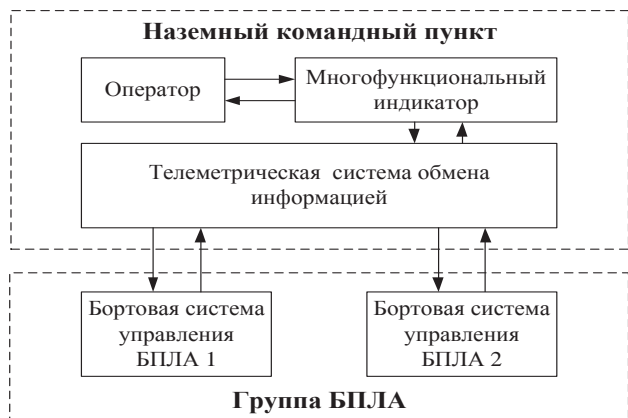


Рис. 1. Полиэргатическая система управления движением группы БПЛА

Однако, кроме штурманской задачи, существует еще задача удержания (стабилизации) группы и отдельных БПЛА на программной траектории движения и назначения наиболее благоприятного для разделения момента времени внутри заданного интервала.

Для решения перечисленных задач оператору необходимо иметь специальное устройство выработки решения, которое, выполняя функцию «интеллектуального подсказчика», помогло бы ему задавать маневры БПЛА, оценивать координаты их текущего расположения относительно заданной траектории, идентифицировать оптимальные моменты времени выполнения групповых маневров. Разработке алгоритма для «интеллектуального подсказчика» из состава многофункционального индикатора (МФИ) наземного командного пункта и посвящена эта статья.

Постановка проблемы. Для разработки алгоритма оптимального управления движением группы БПЛА предлагается использовать теорию ветвящихся траекторий [8]. Концепция применения теории оптимизации ветвящихся траекторий к решению задачи управления группой БПЛА приведена на рис 2.

На рис. 2 приняты такие обозначения: ИПМ – исходный пункт маршрута; ППМ – промежуточный пункт маршрута; ПРГ – пункт разделения группы;  $\Delta$  – метка текущего положения группы;  $\Delta_i (i=1, 2)$  – метка текущего положения  $i$ -го БПЛА после разделения;  $\Theta$  – метка заданного положения группы или отдельного БПЛА;

1 – траектория движения группы БПЛА с расположенными на ней пунктами маршрута, полученная в результате штурманского расчета; 2 – истинная траектория движения; 3– истинная точка разделения группы;  $x$  или  $x_i (i=1, 2)$  – расстояние

между заданным и текущим положением группы или отдельного БПЛА.

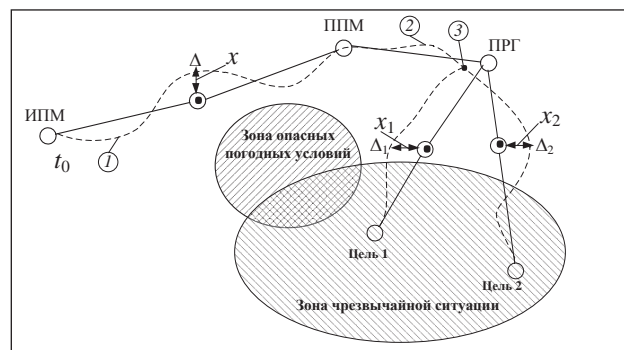


Рис. 2. Представление информации на экране многофункционального индикатора оператора

С целью физического воспроизведения образа полета группы БПЛА рис. 2. может быть перенесен на экран многофункционального индикатора (МФИ), на котором оператор наблюдает за воздушной обстановкой в районе зоны чрезвычайной ситуации, погодными условиями, следит за положением целей сбрасываемого десантируемого груза.

В силу действия различных возмущений текущее положение группы или отдельных БПЛА отличается от заданного.

Алгоритм «интеллектуального подсказчика» вырабатывает оптимальное, в смысле заданного критерия качества, управление движением метки текущего положения к заданному положению и рассчитывает оптимальный момент времени и фазовую координату разделения группы.

Командные значения оптимального управления и момента времени разделения передаются для отработки на бортовую систему управления (БСУ) БПЛА. Эволюция метки текущего положения на экране МФИ вблизи программной траектории обычно описывается детерминированными или стохастическими линейными дифференциальными уравнениями [2].

Отметим, что в качестве  $x$  или  $x_i (i=1, 2)$  используется метрика того пространства, в котором решается задача.

Возможность представления группы БПЛА одной меткой на экране МФИ на участке траектории между точками ИПМ и 3 объясняется тем, что геометрические размеры строя БПЛА на несколько порядков меньше, чем расстояние, на которое они перемещаются, и поэтому для задачи оптимизации ветвящихся траекторий такое допущение является корректным [6].

Решение задачи. Предполагается, что группа БПЛА состоит из двух аппаратов, штурманская

задача уже решена и рассматривается линейная детерминированная модель движения метки текущего положения относительно заданного положения [3; 4].

$${}_q \dot{x} = {}_q a_q x(t) + {}_q b_q u(t), \quad (1)$$

где  ${}_q x(t) \in E^1$ ,  ${}_q u(t) \in E^1$ ,  $q=1,11,12$ . Схема ветвящейся траектории представлена на рис. 3.

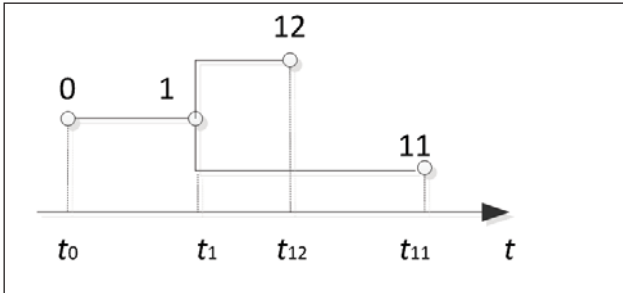


Рис. 3. Схема ветвящейся траектории

Оператору необходимо задать такую координату точки начала совместного движения группы БПЛА  ${}_1 \hat{x}(t_0)$ , момент времени  $t_1$  и координату точки разделения группы БПЛА  ${}_1 \hat{x}(t_1)$ , чтобы БПЛА «11» через  $t_{11}=6$ с после начала совместного движения и последующего отделения достигла точки с координатой  ${}_{11} x(t_{11}) = 4$  км, а БПЛА «12» через  $t_{12}=4$ с достигла точки  ${}_{12} x(t_{12})=6,92$  км, минимизировав при этом критерий

$$J = \frac{1}{2} {}_1 F_1 x^2(t_1) + \int_{t_0}^{t_1} [{}_1 Q_1 x^2(t) + {}_1 R_1 u^2(t)] dt + \sum_{j=1}^2 \int_{t_j}^{t_{1j}} [{}_{1j} Q_{1j} x^2(t) + {}_{1j} R_{1j} u^2(t)] dt \quad (2)$$

где  ${}_1 F=0,3$ ;  ${}_{11} F=0,1$ ;  ${}_{12} F=0,2$ ;  ${}_1 Q=2$ ;  ${}_{11} Q=1$ ;  ${}_{12} Q=1$ ;  ${}_1 R=2$ ;  ${}_{11} R=1$ ;  ${}_{12} R=1$ .

Для решения задачи (1), (2), в которой принято, что  ${}_1 a=-2,5$ ;  ${}_{11} a=-1$ ;  ${}_{12} a=-1,5$ ;  ${}_1 b=1$ ;  ${}_{11} b=0,5$ ;  ${}_{12} b=0,5$ , воспользуемся принципом оптимальности Беллмана [1].

Исходя из (1)–(2), выражение для оптимального значения управления будет иметь вид

$${}_q \hat{u}(t) = -{}_q R^{-1} {}_q b^T {}_q P(t) {}_q \hat{x}(t), \quad (3)$$

$$t \in [t_{q^*}, t_q] (q=1, q^*=0; q=11,12, q^*=1)$$

где  ${}_q P(t)$  является решением дифференциального уравнения

$${}_q \dot{P}(t) = -{}_q P(t) {}_q a - {}_q a^T {}_q P(t) + {}_q P(t) {}_q b {}_q R^{-1} {}_q b^T {}_q P(t) - {}_q Q \quad (4)$$

для соответствующих краевых условий

$${}_q P(t_q) = {}_q F (q=11,12), {}_1 P(t_1) = {}_1 F + {}_{11} P(t_1) + {}_{12} P(t_1) (q=1). \quad (5)$$

Основное отличие предложенного алгоритма вычисления оптимального управления (3)–(5) от известного состоит в граничном условии (5) для  $q=1$ , когда граничное значение для вспомогательной переменной  ${}_1 P(t_1)$  рассчитывается с учетом значений вспомогательных переменных  ${}_{11} P(t_1)$  и  ${}_{12} P(t_1)$  на левом конце ветвей «1–11» и «1–12» при  $t=t_1$ .

Используя выражения (3)–(5) для скалярной задачи (1)–(2), получаем следующие аналитические выражения для вычисления фазовых координат и вспомогательных переменных, входящих в выражение для вычисления оптимального управления:

$${}_q \hat{x}(t) = {}_q x(t_q) ch[\sqrt{\delta_q}(t_q - t) + \varphi_q] ch^{-1} \varphi_q, \quad (6)$$

$${}_q P(t) = {}_q R {}_q a + \sqrt{\delta_q} th[\sqrt{\delta_q}(t_q - t) + \varphi_q] {}_q b^{-2} \quad (7)$$

$$t \in [t_{q^*}, t_q] (q=1, q^*=0; q=11,12, q^*=1),$$

$$\text{где } \varphi_{1j} = \text{arth} \left[ -{}_{1j} a + {}_{1j} b^2 {}_{1j} F {}_{1j} R^{-1} \delta_{1j}^{-\frac{1}{2}} \right],$$

Момент времени  $t_1$  разделения группы БПЛА находим из условия  ${}_{11} \hat{x}(t_1) = {}_{12} \hat{x}(t_1)$ . Затем, подставляя  $t_1$  в выражения для  ${}_{11} \hat{x}(t)$ , вычисляем координаты точки отделения и далее, полагая в выражении (6)  $t=t_0=0$  при  $q=1$ , находим  ${}_1 x(t_0)$ .

В результате расчетов получаем  ${}_1 x(t_0)=1,17$  км,  $t_1=1,094$  с,  ${}_1 x(t_1)=1,59$  км. На рис. 4. приведен график совместного и раздельного движения БПЛА.

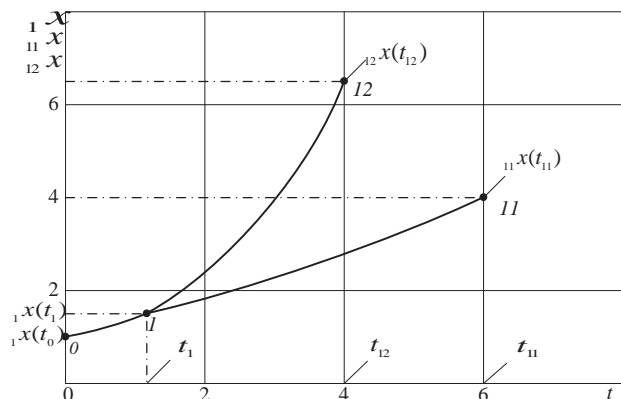


Рис. 4. График совместного и раздельного движения БПЛА

**Выводы.** В статье предложен алгоритм «интеллектуального подсказчика», позволяющий задавать маневры беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оценивать координаты текущего положения БПЛА относительно заданной траек-

тории, идентифицировать оптимальные моменты времени выполнения групповых маневров.

Синтезированный алгоритм вырабатывает оптимальное, в смысле заданного критерия качества, управление движением метки текущего положения к заданному положению и рассчиты-

вает оптимальный момент времени и фазовую координату разделения группы БПЛА.

Проведенные исследования показали, что полученный алгоритм не накладывает принципиальных ограничений на возможность его реализации.

#### Список литературы:

1. A.E. Bryson, Ho, Y.-C. Applied Optimal Control. New York-London-Sydney-Toronto. John Wiley & Sons, 1975, 481 p.
2. M. A. Richards. Fundamentals of Radar Signal Processing. McGraw-Hill Education, 2014, 472 p.
3. Ащепков Л.Т. Оптимальное управление разрывными системами. Л.Т.Ащепков – Новосибирск: Наука, 1986. – 226 с.
4. Сейдж Э.П. Оптимальное управление системами. / Э.П. Сейдж., Ч.С. Уайт. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.
5. O. Lysenko, O. Tachinina, I Alekseeva, and S. Chumachenko. "The Scenario-Based Approach for Control of Multi-Object Dynamic System Motion." 3rd International Conference: Actual problems of unmanned aerial vehicles developments, October 13-15, 2015. Organized by IEEE Ukraine Section Joint SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv), pp. 305–308.
6. O. Lysenko, I. Uryadnikova, S. Valuiskyi, S. Chumachenko, and etc. "Increasing of manet throughput using quasi-optimal UAVs placement control." Liptovsky Mikulas, Slovak Republic: Armed Forces Academy. Science&Military. no.1, vol. 8, 2013, pp. 24–35.
7. O. Lysenko, O. Tachinina, I. Uriadnikova, I. Alekseeva, and S. Chumachenko, "Features of unmanned aerial vehicles group dynamics and control." International Conference "The safety management system 2016," February 22-27, 2016. Liptovsky Mikulas, Slovak Republic, Armed Forces Academy of General Milan Rastislav Stefanik, Liptovsky Mikulas, Slovakia. Pp. 391–397.
8. Лисенко О.І. Постановка задачі застосування теорії розгалужених траєкторій для вирішення задач пошуку та рятування в зоні надзвичайних ситуацій / О.І. Лисенко, О.М. Тачиніна, С.М. Чумаченко – Технічна механіка: міжвід. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 1 – С. 73–78.

#### АЛГОРИТМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПІДКАЗУВАЧА ДЛЯ ОПЕРАТОРА, ЯКИЙ УПРАВЛЯЄ ГРУПОЮ БПЛА

*У статті запропоновано алгоритм «інтелектуального підказувача», що дає змогу задавати маневри безпілотних літальних апаратів (БПЛА), оцінювати координати поточного положення БПЛА щодо заданої траєкторії, ідентифікувати оптимальні моменти часу виконання групових маневрів. Синтезований алгоритм виробляє оптимальне, з урахуванням заданого критерію якості, управління рухом мітки поточного положення до заданого положення і розраховує оптимальний момент часу і фазову координату поділу групи БПЛА.*

**Ключові слова:** безпілотні літальні апарати, інтелектуальний підказувач, оптимальне управління, розгалужена траєкторія.

#### ALGORITHM OF SMART PROMPTER FOR OPERATOR OF UAVS GROUP

*The article proposes the algorithm of "smart prompter" allowing to set maneuvers of unmanned aerial vehicles (UAVs), to estimate the coordinates of current position of UAV relative to specified trajectory; and to identify the optimal moments of group maneuvers. The synthesized algorithm generates the optimal control of motion of current position mark to the predetermined position taking into account the specified quality criterion, and calculates the optimum time instant and the phase coordinate of UAV group separation.*

**Key words:** unmanned aerial vehicles, smart prompter, optimal control, branching path.