

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-25-32

## АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОЧЕРЕДИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ЗАХОДЕ НА ПОСАДКУ

И.А. ЧЕХОВ<sup>1</sup>, О.И. ЧЕХОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ЗАО «Позитив Текнолоджиз», г. Москва, Россия

В последнее время проявляется большой интерес к использованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как со стороны хозяйствующих субъектов, так и со стороны силовых ведомств. Однако для применения БПЛА в гражданских целях в настоящее время имеется ряд проблем, которые связаны с использованием воздушного пространства, и без их решения невозможно полноценное использование БПЛА. Необходимо отметить, что уровень безопасности полетов, как для обычных воздушных судов, так и для БПЛА, имеет первостепенное значение. Для определения уровня безопасности полетов необходимо использовать современные методы обработки информации и иметь возможность оперативно контролировать текущий уровень безопасности полетов. С этой целью должна использоваться наиболее полная информация о движении воздушных судов и беспилотных летательных аппаратов в текущий момент времени, а также структура используемого воздушного пространства. Задача разработки процедур и маневров, разрешающих потенциально конфликтную ситуацию между воздушными судами, в том числе и БПЛА, является крайне важной для обеспечения безопасности воздушного движения, особенно в районе аэродрома назначения или посадки. В статье рассматривается возможность построения алгоритма формирования динамической очереди и выбора траектории при заходе на посадку беспилотных летательных аппаратов. При сборе статистических данных использовалась технология автоматического зависимого наблюдения в режиме радиовещания. Реализация алгоритма посадки выполнена по критериям обеспечения экономичности и безопасности полетов. Разработанное программное обеспечение предусматривает использование только открытых данных о движении воздушных судов в районе аэродрома. Предложенный алгоритм может быть адаптирован для организации воздушного движения БПЛА в любом заданном воздушном пространстве.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, процедура захода на посадку, программное обеспечение, автоматическое зависимое наблюдение в радиовещательном режиме.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы обеспечения безопасности полетов (БП) воздушных судов (ВС) всегда являлись основной задачей Международной организации гражданской авиации (ИКАО). Создание в рамках ИКАО концепции CNS/АТМ прежде всего было связано с аэронавигационными требованиями по обеспечению БП. В последние годы возник новый тип воздушных средств – беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые стали активными участниками использования воздушного пространства (ИВП).

Эти новые тенденции ИВП нашли свое отражение в нормативных документах ИКАО [1, 2] и в соответствующих документах ГА РФ [3]. При этом возникли и новые проблемы, связанные с обеспечением полетов БПЛА, но, главное, с обеспечением их посадки в заранее предусмотренных местах.

В работах [5, 6] рассмотрен метод решения задачи оптимального распределения и расстановки произвольно расположенных в ВП объектов воздушного движения в очередь при заходе на посадку на примере московских аэропортов Шереметьево, Домодедово и Внуково. При этом поставленная задача решается при условии сохранения безопасных расстояний между летательными аппаратами (ЛА) путем вычисления динамических приоритетов в виде соответствующих количественных оценок, учитывающих первоначальную удаленность ЛА от линии заданного пути, ожидаемую (прогнозируемую) дальность до других ЛА, движущихся в очереди.

Можно утверждать, что задача автоматизации управления оперативным планированием прилета на аэродромы Московского узлового диспетчерского района (МУДР) в определенном



Каждый  $i$ -й ЛА характеризуется в дискретный момент времени  $t_k$  вектором состояния  $X_j$ , определяемым координатами:

- $X_{j1}$  – геодезическая широта, градусы;
- $X_{j2}$  – геодезическая долгота, градусы;
- $X_{j3}$  – курс, градусы ( $\Psi_j$ );
- $X_{j4}$  – высота (эшелон), метры (футы) ( $Y_j$ );
- $X_{j5}$  – скорость, узлы ( $V_j$ );
- $X_{j6}$  – тип ЛА;
- $X_{j7}$  – дискретный момент времени в формате Timestamp (UNIX), секунды ( $t_k$ );
- $X_{j8}$  – номер рейса (идентификатор) ЛА.

Движение  $i$ -го ЛА в выбранной системе координат XOZ описывается типовой системой дифференциальных уравнений [8, 9]:

$$\begin{cases} \dot{V}_i = g \cdot n_{Xi}; \\ \dot{\Psi}_i = -\left(\frac{g}{V_i}\right) \cdot n_i; \\ \dot{x}_i = V_i \cdot \cos \Psi_i; \\ \dot{z}_i = -V_i \cdot \sin \Psi_i, \end{cases} \quad (1)$$

где  $V_i$  – скорость ЛА;  $[x_i, y_i]^T$  – координаты центра масс ЛА, индекс  $T$  означает операцию транспонирования;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\Psi_i$  – угол курса (пути) ЛА в плоскости XOZ.

Соответственно, вектор управления  $u_i$  можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_i = [n_{Xi}, n_i]; \\ n_{X_{\min}} \leq |n_{Xi}| \leq n_{X_{\max}}; \\ |n_i| \leq n_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $n_{Xi}$  – тангенциальная перегрузка;  $n_i$  – нормальная перегрузка.

Для решения задачи примем следующие допущения:

- 1) для каждой ВПП заданы исходные углы  $\Psi_{0j}$ ,  $j = \overline{1, m}$ . Общее число полос равно  $m$ , но на практике обычно  $m = 2$ . По ним определяются курсы посадки  $\Psi_{ki}$ ;
- 2) для каждой из ВПП рассматривается задача выведения на трассу ЛА при условии их безопасного захода на посадку;
- 3) в качестве постоянных параметров на участках траектории принимается максимально допустимое нормальное ускорение  $n_{\max}$  при разворотах и тангенциальное ускорение при снижении ЛА –  $n_{X_{\max}}$ ;
- 4) окончательное решение относится к одной из альтернатив ( $a = 1, 2$ ).

При  $a = 1$  принимается решение о введении ЛА в воздушный эшелон. При  $a = 2$  принимается решение об уходе ЛА на второй круг.

В рамках сформулированных исходных положений необходимо:

- 1) разработать алгоритм для сбора статистических данных в соответствии с заданным вектором переменных состояний ЛА;

2) определить возможные (прогнозируемые) траектории движения ЛА в наблюдаемом районе;

3) распределить ЛА между трассами, т. е. сформировать очередь для всех ЛА. На основе полученной таблицы сформировать списки ЛА, заходящих на посадку для каждой ВПП;

4) определить очередность захода на посадку и приземления ЛА для каждой трассы, а также возможные списки ЛА, уходящих на второй круг.

Для реализации рассматриваемого алгоритма была собрана статистика движения ЛА в зоне ответственности аэропорта Шереметьево.

Полученные статистические результаты приведены в табл. 1, где верхняя строка показывает расчетную очередь захода на посадку по приведенным соотношениям, а нижняя – реальную последовательность приземлившихся ЛА.

Таблица 1  
Table 1

11	16	7	4	3	5	6	1	2	15	9	10	13	14	17	12	8	22	20	18	19	21
11	14	6	1	5	7	3	2	4	18	9	10	12	13	15	17	8	20	22	16	19	21

Как следует из табл. 1, реальные показатели значительно отличаются от расчетных, т. е. в условиях реальных имеющихся данных используемый алгоритм не дает адекватной оценки, соответственно, не может быть использован на практике.

Поэтому воспользуемся предложенным в [7] алгоритмом описания траектории движения ЛА с кусочно-постоянными участками при помощи логарифмической спирали.

С учетом системы уравнений (1) были получены следующие выражения для движения ЛА:

$$x_g(\Psi) = \frac{V_0^2 \cdot e^{\left(\frac{2 \cdot (\Psi - \Psi_0) \cdot n_x}{n_z}\right)} \cdot \cos(\Psi - \varphi) - \frac{V_0^2 \cdot (2 \cdot n_x \cdot \cos(\Psi_0) + n_z \cdot \sin(\Psi_0))}{g \cdot (4n_x^2 + n_z^2)}}{g \cdot \sqrt{4n_x^2 + n_z^2}}, \quad (3)$$

$$z_g(\Psi) = \frac{V_0^2 \cdot e^{\left(\frac{2 \cdot (\Psi - \Psi_0) \cdot n_x}{n_z}\right)} \cdot \sin(\Psi - \varphi) + \frac{V_0^2 \cdot (n_z \cdot \cos(\Psi_0) - 2 \cdot n_x \cdot \sin(\Psi_0))}{g \cdot (4n_x^2 + n_z^2)}}{g \cdot \sqrt{4n_x^2 + n_z^2}}. \quad (4)$$

Приведенные выражения (3) и (4) являются уравнениями логарифмической спирали, которая в общем виде записывается как

$$\begin{cases} x_g = a \cdot e^{b\theta} \cdot \cos \theta, \\ z_g = a \cdot e^{b\theta} \cdot \sin \theta. \end{cases} \quad (5)$$

Нетрудно установить соответствие между обозначениями выражений (5) и (3), (4).

Тогда алгоритм аппроксимации участка траектории движения ЛА логарифмической спиралью будет состоять из следующих шагов.

1. Получение текущего состояния ЛА:

$$x(t_k) = [V(t_k), \Psi(t_k), x_g(t_k), z_g(t_k)].$$

2. Загрузка состояния ЛА в предыдущий момент времени  $x(t_{k-1})$ :

$$x(t_{k-1}) = [V(t_{k-1}), \Psi(t_{k-1}), x_g(t_{k-1}), z_g(t_{k-1})].$$

3. Определение текущей тангенциальной перегрузки ЛА:

$$n_X(t_k) = \frac{V(t_k) - V(t_{k-1})}{g \cdot (t_k - t_{k-1})}.$$

4. Определение текущей нормальной перегрузки ЛА:

$$n_Z(t_k) = \frac{\Psi(t_k) \cdot n_X(t_k)}{\ln \left( \frac{g \cdot n_X(t_k) \cdot (t_k - t_{k-1}) + V(t_{k-1})}{V(t_{k-1})} \right)}.$$

5. Аппроксимация движения ЛА участком логарифмической спирали по последовательным тактам времени в соответствии с приведенными выше требованиями.

Самое главное, что использование данного математического анализа позволит перейти от решения системы дифференциальных уравнений для описания движения ЛА к описанию соответствующих участков движения аналитическими зависимостями, что существенно сократит время построения траекторий.

Далее производится формирование очередности захода на посадку в следующей последовательности.

1. Получение исходного вектора состояния ЛА.

2. Отбор координат множества реперных точек, определяющих начальное положение ЛА в данном регионе.

3. Формирование траектории перевода ЛА в выбранную на основании п. 2 ближайшую реперную точку. Для этого определяется траектория программного разворота с заданными значениями нормальной и тангенциальной перегрузок до направления, касательного с текущей траектории разворота и траектории разворота, проходящей через реперную точку с выходом на прямолинейный участок.

4. Выполняется оценка времени программного разворота, времени движения по прямолинейному участку и времени движения по траектории, сумма которых дает время полета ЛА к точке входа в глиссаду.

5. Если интервал времени до предыдущего ЛА не превышает заданной величины, включить данный борт в очередь. В противном случае произвести расчеты для другой возможной траектории движения. Если не удастся найти траекторию, удовлетворяющую условию минимального интервала между ЛА, данный борт отправляется в зону ожидания.

На основе описанного выше алгоритма было проведено сравнение реального распределения очереди ЛА с расчетным в аэропорту Шереметьево и построена табл. 2, аналогичная по структуре табл. 1.

Таблица 2  
Table 2

1	2	4	3	5	6	8	7	9	10	11	12	13	14	15	17	16	18	19	20	21
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

Также было проведено сравнение измеренного времени прохождения маршрута расчетного для той же выбранной группы ЛА. Средняя разница между измеренной и расчетной продолжительностью полета составила 17 с, что является 1 % относительно среднего измеренного времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа реальных полетных данных было выполнено сравнение реального времени движения ЛА по маршруту следования и расчетного при заданных начальных положениях ЛА с учетом типовых значений динамики изменения высоты и скорости при снижении ЛА, которое показало, что разница при рассмотренной выборке в 21 ЛА составила не более 1 %. При планировании движения группы ЛА можно считать сформированный алгоритм как достаточно точный для расчета оценки времени захода на посадку.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ИКАО Doc 4444 ATM/501 Организация воздушного движения. Монреаль: ИКАО, 2007.
2. Приложение 11 к Конвенции о международной гражданской авиации. Обслуживание воздушного движения. 13-е изд. Монреаль: ИКАО, 2001.
3. Федеральные авиационные правила «Организация воздушного движения в Российской Федерации» (с изменениями от 21 июля 2016 года): утв. Пр. Минтранса России от 25.11.2011 № 293; ФАП от 25.11.2011.
4. Концепция и системы CNS/ATM в гражданской авиации / В.В. Бочкарев, В.Ф. Кравцов, Г.А. Крыжановский и др.; под ред. Г.А. Крыжановского. М.: Академкнига, 2003. 414 с.
5. Малыгин В.Б., Губенко С.В., Турков А.Н. Новый метод УВД в зонах ожидания // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 209.
6. Использование системы приоритетного обслуживания при внедрении автоматизированного управления прилетом-вылетом в воздушном пространстве Московского аэроузла / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, Тип Пхон Чжо // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 180.
7. Карпунин А.А., Воронов Е.М. Аппроксимация участка траектории движения в плоскости динамической управляемой системы при помощи логарифмической спирали // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 11. 7 с. [Электронный ресурс]. URL: [http://technomag.edu.ru/file/505020.html?\\_\\_s=1](http://technomag.edu.ru/file/505020.html?__s=1) (дата обращения 23.01.2017).
8. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М.: Оборонгиз, 1962. 549 с.
9. Лебедев А.А., Карбанов В.А. Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1965. 528 с.
10. Плотников В.Н. Принятие решений в системах управления. Теория и проектирование алгоритмов принятия оперативных решений. Ч. 1. М.: МГТУ, 1993. 172 с.
11. Плотников В.Н. Принятие решений в системах управления. Ч. 2. М.: МГТУ, 1994. 142 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Чехов Игорь Анатольевич**, кандидат военных наук, доцент кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, i.chehov@mstuca.aero.

**Чехов Олег Игоревич**, специалист группы системной интеграции ЗАО «Позитив Текнолоджиз», cheolegv@rambler.ru.

## FORMATION ALGORITHM OF DYNAMIC TURN FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES ON APPROACH

**Igor A. Chekhov<sup>1</sup>, Oleg I. Chekhov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*ZAO "Positive Technologies", Moscow, Russia*

### ABSTRACTS

Great interest in using unmanned aerial vehicles has recently been shown, both from economic entities, and from national security, defense and law enforcement agencies. However, for using UAV for the civil purposes there is now a number of problems which are connected with the use of airspace and without solving them it is impossible to use the UAV fully. It should be noted that the level of flight safety, both for regular aircraft, and for the UAV, has the primary value. It is necessary to use modern methods of data processing and to have an opportunity to quickly and effectively control the current flight safety level. For this purpose the fullest information on the current movement of aircraft and unmanned aerial vehicles, and also on the structure of the used airspace has to be used. The problem of procedures and maneuvers development that resolve potential traffic conflict including the UAV, is extremely important for air traffic safety especially in the vicinity of the destination or landing aerodrome. The possibility of creation of an algorithm of dynamic turn formation and the choice of a trajectory on approach of unmanned aerial vehicles is considered in this article. The technology of automatic dependent surveillance broadcast was used when collecting statistical data. Implementation of the landing algorithm is executed based on the criteria of ensuring efficiency and flight safety. The developed software provides the use only of open data on the aircraft movement in terminal airspace. The suggested algorithm can be adapted for air traffic management of the UAV in any selected airspace.

**Key words:** the unmanned aerial vehicle, approach procedure, the software, automatic dependent surveillance broadcast.

### REFERENCES

1. ICAO Doc 4444 ATM/501 Air Traffic Management. Montreal. ICAO, 2007.
2. Annex 11. Air Traffic Services. 13th edition. Montreal. ICAO, 2001.
3. *Federalniye aviatsionnye pravila «Organizatsiya vozdušnogo dvizheniya v Rossijskoy Federatsii»* [Federal Aviation Regulations of Flight Rules "Air Traffic Management in Russian Federation"] (with the changes from 21.07.2016): Approved by the Russian Minister of Transport from 25.11.2011 № 293. (in Russian)
4. **Bochkarev V.V., Kravcov V.F., Kryzhanovskij G.A.** *Kontseptsiya i sistemy CNS/ATM v grazhdanskoj aviatsii / pod red. G.A. Kryzhanovskogo* [The concept and the CNS/ATM systems in civil aviation]. Moscow, Akademkniga, 2003, 414 p. (in Russian)
5. **Malygin V.B., Gubenko S.V., Turkov A.N.** *Noviy metod UVD v zonah ozhidaniya* [A new method of controlling air traffic in waiting areas]. The Scientific Bulletin of the MSTUCA, 2014, no. 209. (in Russian)
6. **Lebedev G.N., Malygin V.B., Nechaev E.E., Tip Phon Chzho.** *Ispolzovanie sistemy prioritnogo obsluzhivaniya pri vnedrenii avtomatizirovannogo upravleniya piletom-vyletom v vozdušnom prostranstve Moskovskogo ajerouzla* [Use of system of priority service at introduction of auto-

mated management of an arrival departure in airspace of the Moscow TMA]. The Scientific Bulletin of MSTUCA, 2012, no. 180. (in Russian)

7. **Karpunin A.A., Voronov E.M.** *Approksimacija uchastka traektorii dvizhenija v ploskosti dinamičeskoj upravljajemoj sistemy pri pomoshhi logarifmičeskoj spirali* [Approximation of the phase of trajectory of the movement in the plane of the dynamic operated system by means of a logarithmic spiral]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie* [Science and education. Electronic scientific journal], 2011, no. 11, p. 7. Available at: [http://technomag.edu.ru/file/505020.html?\\_\\_s=1](http://technomag.edu.ru/file/505020.html?__s=1) (accessed 23.01.2017). (in Russian)

8. **Lebedev A.A., Chernobrovkin L.S.** *Dinamika poleta bespilotnyh letatel'nyh apparatov* [Flight dynamics of unmanned aerial vehicles]. Moscow, Oborongiz, 1962, 549 p. (in Russian)

9. **Lebedev A.A., Karabanov V.A.** *Dinamika sistem upravlenija bespilotnymi letatel'nymi apparatami* [Dynamics of control systems of unmanned aerial vehicles]. Moscow, Mashinostroenie, 1965, 528 p. (in Russian)

10. **Plotnikov V.N.** *Prinyatie resheniy v sistemah upravleniya. Teoriya i proektirovanie algoritmov prinjatiya operativnyh resheniy.* [Decision-making in control systems. Theory and design of algorithms of adoption of operational decisions]. Part 1. Moscow, MGTU, 1993, 172 p. (in Russian)

11. **Plotnikov V.N.** *Prinjatие resheniy v sistemah upravleniya.* [Decision-making in control systems]. Part 2. Moscow, MGTU, 1994, 142 p. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Igor A. Chekhov**, Candidate of Military Sciences, Associate Professor of Air Traffic Control Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, [i.chehov@mstuca.aero](mailto:i.chehov@mstuca.aero).

**Oleg I. Chekhov**, Specialist of the System Integration Group ZAO "Positive Technologies", [cheolegv@rambler.ru](mailto:cheolegv@rambler.ru).

Поступила в редакцию  
Принята в печать

21.01.2017  
25.05.2017

Received  
Accepted for publication

21.01.2017  
25.05.2017