

Алгоритмы выбора оптимального маршрута беспилотного летательного аппарата в условиях конвективно-неустойчивой атмосферы

И.Е. Кузнецов¹, О.В. Страшко¹, В.А. Яковлев¹

¹ВУНЦ ВВС ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Старых Большевиков 54А, Воронеж, Россия, 394064

Аннотация. Предлагаются алгоритмы выбора оптимального маршрута беспилотного летательного аппарата в условиях конвективно-неустойчивой атмосферы, основанные на модифицированном методе градиентного спуска и позволяющие повысить эффективность и безопасность полетов БЛА в сложных метеоусловиях.

1. Введение

В настоящее время для ведения разведки и выполнения оперативных задач различными министерствами и ведомствами широко используются беспилотные летательные аппараты (БЛА) с соответствующей бортовой аппаратурой. Одним из факторов, влияющих на их применение являются сложные метеорологические условия, учет которых при принятии решения на применение БЛА осуществляется не в полном объеме. В процессе полета оператор БЛА зачастую сталкивается с необходимостью прекратить полетное задание или изменить маршрут полета из-за сложных метеорологических условий. Это приводит к срыву выполнения задачи или же к потере БЛА. Для решения этой проблемы предлагается реализовать алгоритмы учета влияния метеорологических условий на выбор маршрута движения БЛА на этапе принятия решения о его вылете.

Целью работы стало повышение эффективности применения БЛА при решении оперативных задач различными организациями и ведомствами путем разработки алгоритмов выбора оптимального маршрута в сложных метеорологических условиях (СМУ).

2. Модель выбора маршрута БЛА с учетом метеофакторов

Для достижения поставленной цели в работе предлагается построить модель выбора маршрута БЛА с учетом метеофакторов, непосредственно влияющих на выполнение задачи. Вербально постановку задачи исследования определим следующим образом.

Пусть в некоторой области земной поверхности требуется обнаружить n целей, находящихся в районах A_1, A_2, \dots, A_n с координатами в прямоугольной системе координат $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$ при условии, что известны координаты точки базирования БЛА (x_0, y_0) . Требуется определить порядок облета БЛА целей на постоянной высоте, обеспечивающий минимальные затраты полетного времени и максимальную эффективность по обнаружению целей в ожидаемых метеоусловиях. В каждом районе находится по одному объекту и БЛА, обнаруживший объект в одном районе, переходит в другой, где поиск еще продолжается.

Рассматриваемую задачу определения последовательности облета целей в ожидаемых метеоусловиях можно представить в виде математической модели [1]:

$$T_{пол} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} \varepsilon_{ij} + \tau n \rightarrow \min, \sum_{i=0}^n \varepsilon_{ij} = 1, i = 0, \dots, n, \sum_{j=0}^n \varepsilon_{ij} = 1, j = 0, \dots, n \quad (1)$$

где $\varepsilon_{ij} \in [0,1]$, $\gamma_i \geq 0$, $i, j = 1, \dots, n$, $T_{пол}$ – общее полетное время, t_{ij} – время полета БЛА от цели, находящейся в районе контроля A_i к цели, находящейся в районе контроля A_j , включая зону базирования БЛА A_0 , ε_{ij} – булевские переменные, определяющие наличие или отсутствие маршрута между i и j -ым районам нахождения целей, представленных на рисунке 1.

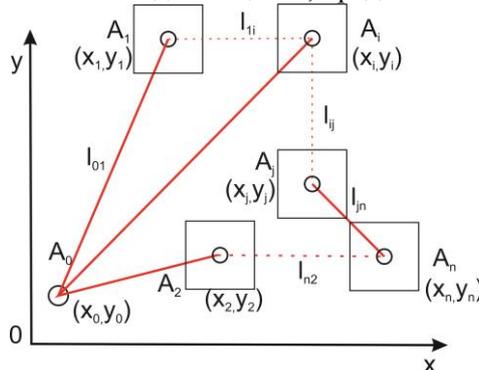


Рисунок 1. Математическая модель оптимального облета беспилотными летательными аппаратами заданных зон контроля.

Оценка времени перелетов между точками маршрута без учета метеоусловий определяется следующим образом

$$t_{ij} = \frac{l_{ij}}{V_{кр}}, \quad i, j = 0, \dots, n, \quad (2)$$

где $V_{кр}$ – крейсерская скорость БЛА, l_{ij} – расстояние между целями в районах контроля (рисунок 1), вычисляется по формуле [2]:

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (3)$$

С учетом сложных метеоусловий траектория движения БЛА будет изменяться в зависимости от размеров областей M , закрытых для применения БЛА (по эксплуатационным, тактическим или техническим ограничениям в ожидаемых метеоусловиях). Математически вышеизложенное будет описываться выражением вида:

$$M_{\{x_i, y_i\}_{i \in [0,1]}} \Rightarrow \left\{ (x(t) - x_i(t))^2 + (y_i(t))^2 \leq R_i^2(t) \right\} \Big|_{i=1, \dots, M, j=t_0, \Delta t, t_1} = M_t. \quad (4)$$

Для решения поставленной задачи предлагается использовать метод, суть которого заключается в последовательном определении каждой последующей j -ой цели маршрута облета районов с минимальным значением величины t_{ij} , по известной (полученной ранее) i -ой точке, где i, j изменяются от 0 до n . В качестве исходных данных используется матрица затрат времени:

$$T = [t_{ij}]_{(n+1) \times (n+1)} \quad (5)$$

Матрица является симметричной с нулевыми диагональными элементами. При этом промежуток времени t_i , зависит от прогностического периода на который разрабатывается прогноз и сформированы ограничения при заданном временном шаге Δt . С учетом вышеизложенного получим отображение $t \in [t_0, t_1] \Rightarrow t = t_0, \Delta t, t_1$.

3. Алгоритмы расчета

Алгоритмы расчета предполагают факторизацию задачи [3] с делением всего маршрута БЛА на отдельные участки между точками облета (x_i, y_i) и (x_j, y_j) , для нахождения каждого из

которых применяется метод нахождения траектории, основанный на модифицированном методе градиентного спуска.

Основные шаги алгоритма состоят в следующем:

1. Задается точка начала облета (x_0, y_0) , количество точек облета N , точки облета $(x_i, y_i) \Big|_{i=\overline{1, N}}$, количество ограничений M и сами ограничения M_i .
2. Формулируется набор всех возможных вариантов облета заданных точек маршрута БЛА $(x_i^L, y_i^L) \Big|_{i=\overline{1, N}}$. Количество вариантов будет равно $N!$ ($L = \overline{1, N!}$).
3. Для пары точек из набора $((x_i^L, y_i^L), (x_{i+1}^L, y_{i+1}^L))$ при $i = \overline{1, N-1}$, а также для пар $((x_0, y_0), (x_1^L, y_1^L))$ и $((x_N^L, y_N^L), (x_0, y_0))$ рассчитываются траектории облета $S_{i,i+1}^L, S_{0,1}^L, S_{N,0}^L$ при заданной скорости БЛА V по модифицированному методу градиентов.
4. Поиск оптимального маршрута S_{opt} осуществляется по критерию минимального расстояния с использованием выражения:

$$|S_{opt}| = \min_{L=1, N!} \left(|S_{0,1}^L| + \sum_{i=1}^N |S_{i,i+1}^L| + |S_{N,0}^L| \right). \quad (6)$$

Использование модифицированного метода градиентов позволяет построить маршрут между двумя точками и включает в себя следующие шаги.

Определение текущей точки $(x_{cur}, y_{cur}) = (x_{start}, y_{start})$, где (x_{start}, y_{start}) – точки, с которой начинается движение, а также включение этой точки в формируемый маршрут $S(x_{start}, y_{start}) \rightarrow S$.

Определение направления антиградиента для движения точки с использованием выражения (7):

$$(x_{grad}, y_{grad}) = ((x_{end} - x_{cur}) / l, (y_{end} - y_{cur}) / l), \quad (7)$$

где $l = \sqrt{(x_{end} - x_{cur})^2 + (y_{end} - y_{cur})^2}$, а (x_{end}, y_{end}) – точка назначения.

Определение очередной точки осуществляется по формуле (8):

$$(x_{next}, y_{next}) = (x_{cur}, y_{cur}) + \lambda(x_{grad}, y_{grad}), \quad (8)$$

где λ – величина, характеризующая шаг в направлении антиградиента.

Расчет приращения по времени определяется с использованием выражения (9):

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(x_{next} - x_{cur})^2 + (y_{next} - y_{cur})^2}}{V}. \quad (9)$$

На следующем этапе осуществляется проверка условия $(x_{next}, y_{next}) \in M_{t+\Delta t}$. В случае, если это условие верно, то определяется номер ограничения с использованием выражения (10):

$$num \rightarrow (x_{next} - x_{num}(t + \Delta t))^2 + (y_{next} - y_{num}(t + \Delta t))^2 \leq R_{num}^2(t + \Delta t). \quad (10)$$

В противном случае осуществляется переход в точку

$$(x_1, y_1)(x_{cur}, y_{cur}) = (x_1, y_1), (x_1, y_1) \rightarrow S. \quad (11)$$

Движение по дуге с целью обхода зоны с опасными метеоусловиями осуществляется посредством вычисления двух точек:

$$(x_1, y_1) = \begin{pmatrix} x_{num}(t) + (x_{cur} - x_{num}(t)) \cos \Delta \varphi - (y_{cur} - y_{num}(t)) \sin \Delta \varphi, \\ y_{num}(t) + (y_{cur} - y_{num}(t)) \cos \Delta \varphi - (x_{cur} - x_{num}(t)) \sin \Delta \varphi, \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$(x_2, y_2) = \begin{pmatrix} x_{num}(t) + (x_{cur} - x_{num}(t)) \cos \Delta \varphi - (y_{cur} - y_{num}(t)) \sin \Delta \varphi, \\ y_{num}(t) + (y_{cur} - y_{num}(t)) \cos \Delta \varphi - (x_{cur} - x_{num}(t)) \sin \Delta \varphi, \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где $\Delta \varphi$ – величина шага в направлении обхода ограничения.

Далее определяется расстояние по формуле (14):

$$l_0 = \sqrt{(x_0 - x_{end})^2 + (y_0 - y_{end})^2}, l_1 = \sqrt{(x_1 - x_{end})^2 + (y_1 - y_{end})^2} \quad (14)$$

В случае если $l_0 \geq l_1$, то дальнейшее движение осуществляется в точку (x_0, y_0) : $(x_{cur}, y_{cur}) = (x_0, y_0), (x_0, y_0) \rightarrow S$.

Если $l_0 < l_1$, то $(x_1, y_1)(x_{cur}, y_{cur}) = (x_1, y_1), (x_1, y_1) \rightarrow S$ и далее в точку $(x_{next}, y_{next})(x_{cur}, y_{cur}) = (x_{next}, y_{next}), (x_{next}, y_{next}) \rightarrow S$.

Если выполняется условие $\sqrt{(x_{cur} - x_{end})^2 + (y_{cur} - y_{end})^2} < e$, где e – заданная точность, то работа алгоритма завершается. В противном случае осуществляется переход к расчету направления антиградиента.

4. Оценка эффективности

Используя вышеописанный алгоритм была проведена оценка эффективности применения БЛА в СМУ путем проведения численного эксперимента, результаты которого представлены на рисунке 2. Для сравнительной оценки использовалось общее полетное время БЛА, затраченное на выполнение задачи в СМУ с использованием традиционных подходов (в случае оперативного реагирования оператора БЛА на изменение погодных условий), и с применением разработанных алгоритмов.

По условиям эксперимента, облет БЛА заданных районов с координатами $(x_0; y_0) = (0; 0)$ км, $(x_1; y_1) = (30; 70)$ км, $(x_2; y_2) = (45; 10)$ км, $(x_3; y_3) = (70; 30)$ км, $(x_4; y_4) = (90; 10)$ км, и $(x_5; y_5) = (70; 70)$ км осуществлялся со скоростью 150 км/ч. Затраты времени на проведение разведки в каждом районе – 0,2 часа. При этом было введено допущение, что зона со СМУ выступает в качестве «запрещенной» области, размеры которой определяются характером явлений погоды и требованиями руководящих документов, регламентирующих обход указанных зон. Матрица, элементы которой рассчитаны по формулам (6) и (7), позволила построить маршрут облета БЛА заданных районов разведки, аналитический вид которого может быть представлен в виде $M_0 = \{P_5, P_1, P_3, P_4, P_2\}$.



Рисунок 2. Варианты применения БЛА в сложных метеоусловиях: а) Традиционная модель применения БЛА в СМУ; б) Предлагаемая модель применения БЛА в СМУ.

Общее полетное время БЛА на этом маршруте, рассчитанное с учетом разработанных алгоритмов и модели составило

$$T_{пол}^0 = t_{05} + t_{51} + t_{13} + t_{34} + t_{42} + t_{20} + 5\tau = 4449сек = 1,24ч.$$

В то время как на маршруте БЛА $M_0 = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$, рассчитанном с использованием известных подходов, это время составило

$$T_{пол} = t_{01} + t_{12} + t_{23} + t_{34} + t_{45} + t_{50} + 5\tau = 6228сек = 1,73ч.$$

5. Заключение

Таким образом маршрут движения БЛА в СМУ с учетом разработанных алгоритмов и модели будет эффективнее «естественного» в 1,4 раза. Практическая реализация модели и алгоритмов

обеспечивает разработку оптимальных рекомендаций по построению плана функционирования БЛА. Указанные рекомендации основаны на анализе прогностической информации о погодных условиях и позволяют корректировать первоначально принятые решения с учетом текущей метеоинформации.

6. Литература

- [1] Кузнецов, И.Е. Технология применения беспилотных летательных аппаратов для решения метеорологических задач /И.Е. Кузнецов, О.В. Страшко, Н.М. Ситников, А.Ю. Качалкин, Д.В. Акмулин, А.Г. Горелик, И.И. Чекулаев // Авиакосмическое приборостроение. – 2018. – № 1. – С. 42-51.
- [2] Болховитинов, О.В. Боевые авиационные комплексы и их эффективность. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1989. – 672 с.
- [3] Глебов, Н.И. Методы оптимизации: Учебное пособие / Н.И. Глебов, Ю.А. Кочетов, А.В. Плясунов. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2000. – 105 с.

Algorithms of the choice of an optimum route of the unmanned aerial vehicle in the conditions of the convective and unstable atmosphere

I.E. Kuznetsov¹, O.V. Strashko¹, V.A. Yakovlev¹

¹Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy», Starykh Bolshevikov 54A, Voronezh, Russia, 394064

Abstract. The algorithms of the choice of an optimum route of the unmanned aerial vehicle in the conditions of the convective and unstable atmosphere based on a method of the modified gradient descent and allowing to increase effectiveness and safety of flights of the UAV in the difficult meteoconditions are offered.