

Планирование и моделирование траекторного движения летательного аппарата в сложных условиях¹

Аннотация. Рассматривается задача планирования (прокладки) маршрута на примере облета опорных пунктов летательным аппаратом в неспокойной атмосфере. В качестве основного инструмента для прокладки маршрута предложена процедура, использующая венгерский метод решения задачи о назначениях. Дополнительно рассмотрен подход к решению упрощенной задачи прокладки маршрута в условиях отсутствия препятствий и ветровых нагрузок, который основывается на решении задачи коммивояжера. Выполнено моделирование движения летательного аппарата по заданному маршруту в сложных условиях с учетом постоянной и динамической (случайной) составляющих ветровых потоков. Система моделирования реализована в виде программы MATLAB Simulink.

Ключевые слова: автономный летательный аппарат, планирование маршрута, задача о назначениях, венгерский метод, задача коммивояжера, искусственная нейронная сеть Кохонена, траекторное движение, система управления, ветровые возмущения, моделирование.

Введение

Возможность выбора оптимального маршрута полета с учетом препятствий, ветровых нагрузок и других воздействий на летательный аппарат (ЛА) способствует снижению эксплуатационных затрат и повышению безопасности полетов. Отметим рост количества современных работ в области планирования оптимальных маршрутов и реализации траекторного движения роботизированных систем при наличии препятствий с применением карты местности. Так, в работах [1, 2] решаются задачи планирования 3D-траекторий движения летательных аппаратов на основе применения эвристических алгоритмов поиска пути на графовых моделях. Современным подходом является динамическое планирование поведения в условиях неопределенности, которое рассматривается как функция интеллектуальных систем управления автономных летательных аппаратов [3-5].

Прокладка маршрута занимает существенную часть обеспечения автономного полета ЛА, причем оптимальный путь часто ищется методами математического программирования с учетом текущих метеоусловий [6]. Накопленная база возможных маршрутов, учитывающих метеоусловия в конкретной географической местности, может быть полезной при выборе приемлемой траектории движения без дополнительных расчетов и служить исходным материалом для проведения различных аналитических исследований.

После того как маршрут полета получен, необходимо решить задачу оптимального движения летательного аппарата с учетом его математической модели и ветровых возмущений. Траекторному движению в неспокойной среде посвящен ряд актуальных работ. Например, авторы [7-9] рассматривают задачу управления движением ЛА с заданными ограничениями в процессе выполнения различных полетных заданий, в том числе с прохождением опорных

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-71-10163 «Разработка методов и моделей интеллектуально-геометрического управления автономными летательными аппаратами в условиях возмущенной воздушной среды»).

точек в установленные моменты времени. Математические постановки оптимизационных задач управления и точные методы их решения требуют больших затрат времени. Ввиду ограниченности возможностей вычислительных устройств и программного обеспечения автономных летательных аппаратов, актуальной является задача построения простых в реализации, но эффективных алгоритмов управления. В работах [10, 11] рассматривается интеллектуальная система управления траекторным движением роботизированных систем, основанная на правилах и способная оперативно реагировать на изменения в реальной динамической среде. Анализ показывает, что дальнейшие исследования в области оптимизации траекторного движения ЛА целесообразно вести в направлении развития и интеграции методов автоматического, геометрического и интеллектуального управления.

В данной работе рассматривается задача прокладки маршрута между пунктами отправления и прибытия с обязательным облетом летательным аппаратом всех промежуточных опорных пунктов. Для решения поставленной задачи в сложных условиях предлагается алгоритм, основанный на применении венгерского метода о назначениях [12, 13] с введением ограничений на перемещение и порядок облета пунктов. Предложенный подход позволяет учитывать постоянную составляющую ветровой нагрузки, которая включается в обобщенный критерий качества в виде временных затрат на перемещение между пунктами. Построенный таким образом маршрут в общем случае является квазиоптимальным и может быть практически использован при маловысотных полетах [6].

Модифицированный подход к решению задачи планирования маршрута без учета ветровой нагрузки и непроходимых препятствий основывается на решении задачи коммивояжера. При этом осуществляется замена на последнем этапе маршрута движения конечного пункта (он же путь отправления) на заданный пункт прибытия. Такая постановка применима, например, для быстрого решения задач прокладки маршрутов на локальных участках местности. Для приближенного решения задачи коммивояжера предлагается сетевая модель [14], которая работает с координатами опорных пунктов и обеспечивает расчет маршрута с относительно малыми объемами вычислений.

Моделирование полета летательного аппарата опирается на результаты автора, описанные в работах [15-17]. Задача управления движением ЛА по заданному маршруту в неспокойной атмосфере решается на основе стратегий, имитирующих действия пилота (человека-оператора). Стратегии реализуются набором правил с учетом ветровых воздействий и ограничений на управление.

1. Постановка задачи планирования маршрута

Рассмотрим набор пунктов $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, которые необходимо посетить. Выделим исходный пункт отправления p_1 и конечный пункт прибытия p_n . Задача нахождения оптимального маршрута в общем виде формулируется следующим образом: найти такой порядок назначений с начальным пунктом p_1 и конечным p_n , включающий все остальные промежуточные пункты, который обеспечивает минимум суммарных затрат на перемещение.

Задача 1 – планирование в сложных условиях. Рассмотрим постановку задачи планирования маршрута летательного аппарата, учитывающую ветровые потоки и наличие непроходимых препятствий.

Входные параметры задачи: $D = \|d_{ij}\|$ – матрица расстояний между пунктами облета, которая учитывает наличие препятствий и нежелательных перелетов; $V = \|v_{ij}\|$ – матрица ветровых скоростей, учитывающая силу и направление воздушных потоков между каждой парой точек маршрута, которые помогают (знак «плюс») или препятствуют (знак «минус») движению между соответствующими пунктами.

Матрица V регулярно уточняется (пересчитывается) во время перемещения на дальние расстояния. Можно рассчитать обобщенную матрицу $C = \|c_{ij}\|$, оценивающую временные затраты на перемещение между каждой парой пунктов, причем суммарные временные затраты следует минимизировать.

Задача маршрутизации формализуется как задача о назначениях, которая относится к классу транспортных задач частного вида [13]. Пусть имеются n пунктов отправления и n пунктов

(мест) – кандидатов назначения. В задаче маршрутизации все пункты являются элементами одного и того же множества P , причем $|P| = n$, так что один и тот же пункт может быть пунктом отправления и пунктом назначения. Временные затраты, соответствующие перемещению из пункта i в пункт j обозначим как

$$c_{ij} = \frac{d_{ij}}{v + \operatorname{sgn}(v_{ij})v_{ij}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n),$$

где d_{ij} – расстояние между пунктами i и j ; v – средняя скорость летательного аппарата; v_{ij} – скорость движения воздушных масс между пунктами i и j ; $\operatorname{sgn}(v_{ij})$ – знак скорости. В соответствии с особенностями задачи в общем случае $c_{ij} \neq c_{ji}$. Введем переменные x_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) такие, что $x_{ij} = 1$, если пункт i назначен на пункт j , и $x_{ij} = 0$, в противном случае. В соответствии с особенностями задачи следует положить $c_{ij} = \infty$ для всех $i = j$. Кроме того, полагаем $c_{ij} = \infty$, если перемещение между пунктами i и j невозможно или нежелательно.

Типовая задача о назначениях формулируется как задача линейного программирования [13]:

$$c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

при условии: $\sum_{i=1}^n x_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1$ для всех $i, j = 1, 2, \dots, n$ (вылет из пункта i и попадание в пункт i только один раз).

Отметим, что решение задачи о назначениях (1) не является непосредственным решением задачи планирования, так как не восстанавливает оптимальный маршрут. Для построения искомого маршрута необходимо разработать соответствующий алгоритм, опирающийся на решение задачи (1).

Особенностями задачи планирования маршрута являются:

- 1) восстановленная траектория содержит все пункты и является оптимальной в смысле минимума суммарных временных затрат;
- 2) конечные пункты траектории (пункты отправления и назначения) являются заданными;

3) оптимальность траектории между двумя произвольными не конечными пунктами, в общем случае, не обеспечивается;

4) оптимальная траектория может быть не единственной.

Задача 2 – быстрое планирование. В случае, когда необходима быстрая прокладка маршрута, можно ограничиться постановкой задачи планирования без учета ветровых нагрузок и непроходимых препятствий. При этом c_{ij} – расстояние между пунктами i и j , а критерием оптимизации является минимум общей длины пути построенного маршрута.

Входные параметры задачи: для каждого пункта p_i известны координаты его местоположения (x_i, y_i, z_i) ; $D = \|d_{ij}\|$ – матрица расстояний между пунктами.

Подход к решению Задачи 2 планирования маршрута ЛА основывается на решении задачи коммивояжера, полученной путем исключения из множества P конечного пункта прибытия p_n и условием назначения на последнем шаге пункта p_1 . Также в систему (1) добавляется условие цикличности вида:

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, \quad (2)$$

$$j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, n; \quad i \neq j,$$

где u_i – номер шага, на котором посетили пункт i .

После решения задачи коммивояжера в полученном маршруте производится замена конечного пункта $p_n = p_1$ на заданный пункт прибытия.

2. Решение задачи планирования маршрута в сложных условиях

Задача прокладки маршрута между двумя пунктами с условием прохода всех заданных пунктов представляет интерес по ряду причин, из которых главным является отсутствие алгоритма ее оптимального решения. В связи с этим для практического решения задачи предложен подход, основанный на венгерском методе.

В силу особенностей Задачи 1 венгерский метод может быть выбран в качестве инструмента для ее решения. Временная сложность базового алгоритма этого метода равна $O(n^4)$,

а его лучших модификаций – $O(n^3)$. Управлять процессом построения маршрута можно, если ввести ограничения задачи. Нежелательные перелеты между пунктами i и j выделим, назначая $c_{ij} = \infty$. При этом дополнительными условиями являются невозврат в пункт p_1 и невозможность покинуть пункт p_n . Условие попадания в пункт p_n на последнем шаге записывается в следующем виде: $x_{in}^{(k)} = 0$, для всех $k < n$ и $x_{in}^{(k)} = 1$ если $k = n$, где k – номер операции включения очередного пункта в маршрут движения. Условия задачи для ее последующего решения заносятся в таблицу штрафов (Табл. 1).

Разработан алгоритм для нахождения квази-оптимального маршрута, базовое время выполнения которого – $O(n^4)$.

Алгоритм:

1) решить задачу о назначениях (1) венгерским методом для пунктов из множества P с учетом дополнительных условий и нежелательных перелетов. В результате работы метода [13] получают таблицу с отмеченными нулями, которые соответствуют назначенным пунктам;

2) добавить в маршрут очередной пункт отправления p_k (на первом шаге это пункт p_1). Начиная со строки k , соответствующей пункту отправления p_k , найти отмеченный нуль и соответствующий ему номер l столбца. Этот номер является номером пункта назначения из k -го пункта отправления и одновременно с этим номером пункта отправления на очередном шаге. Если назначен конечный пункт прибытия p_n , то перейти к п. 3); иначе перейти к п. 2);

3) если восстановлен весь маршрут (маршрут содержит все пункты из множества P), то перейти к п. 6); иначе перейти к п. 4);

4) найти пункт p_c , временные затраты на перемещение в который из текущего пункта отправления p_k , минимальны;

5) исключить из множества P все пункты, которые уже содержатся в маршруте. Пункт p_c становится исходным пунктом отправления для новой задачи (1); перейти в п. 1);

6) конец.

Табл. 1. Таблица штрафов

Пункты отправления	Места-кандидаты			
	1	2	...	N
1	∞	c_{12}	...	∞
2	∞	∞	...	c_{2n}
...	...	...	...	...
n	∞	c_{n2}	...	∞

В результате применения процедуры получают (восстанавливают) искомый маршрут, который предъявляется лицу, принимающему решение, и может быть использован для выполнения полетного задания.

3. Решение задачи коммивояжера с применением сетевой модели

Как отмечалось выше, предлагаемый подход к решению Задачи 2 (планирование без учета ветровых нагрузок и непроходимых препятствий) основывается на решении задачи коммивояжера. Поскольку задача коммивояжера является NP-полной, то предлагается решать ее приближенно с помощью сетевой модели. Задача (1)-(2) решается с применением вычислительной схемы на основе модифицированной искусственной нейронной сети (ИНС) Кохонена с набором метрик Евклида, Махаланобиса и Евклида-Махаланобиса [14]. Для решения задачи с помощью нейронной сети каждая из n опорных точек p_i проецируется на плоскость

XOY и представляется как (x_i, y_i) . Введем предположение, что проекция трехмерной траектории движения на плоскость сохраняет правильный порядок облета. Такая гипотеза вполне применима при отсутствии пересечений спроецированных траекторий и совпадений проекций точек, что может выполняться в практически важных случаях. Далее решается плоская задача оптимального обхода точек. Применительно к задаче коммивояжера ИНС использует принцип отображения двумерного распределения n опорных точек (нейронов-кластеров) на одномерный кольцевой маршрут, предварительно заполненный равномерно распределенными вспомогательными точками. После завершения процесса обучения нейронной сети, положение кластера в маршруте определится положением его образа в кольцевом выходном

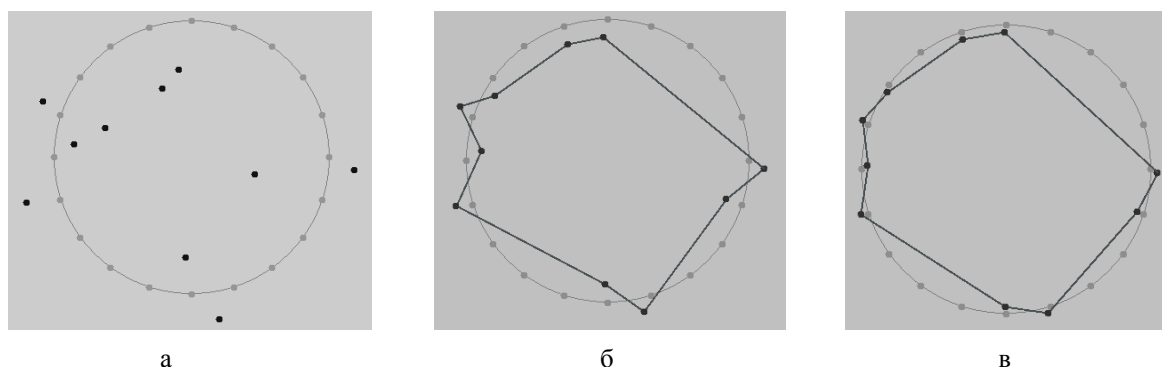


Рис. 1. Этапы решения задачи коммивояжера

а - исходная задача; б - промежуточный этап; в-конечный этап

слое. Для решения задачи используется типовой алгоритм [14] настройки сетевой модели, который приводит к «вытягиванию» точек на окружность, центр и радиус которой подбираются экспериментально. Пример решения задачи с отображением двух его этапов показан на Рис. 1.

Количество равномерно распределенных вспомогательных точек на кольцевом маршруте составляет $2n$. Цикл обучения продолжается для всех элементов входного множества до достижения системой целевого состояния, в результате чего находится приближенный маршрут для решения задачи коммивояжера. Применение ИНС Кохонена требует вычислительных затрат, оцениваемых как $O(n^2)$.

Переход к решению задачи планирования маршрута осуществляется, как отмечалось ранее, путем замены в получившемся маршруте конечного пункта движения на заданный пункт прибытия. В результате получаем маршрут облета, который принимается за основу построения траектории полета.

4. Экспериментальные исследования

Рассмотрим решение задач планирования маршрута и моделирования процесса движения летательного аппарата по заданной траектории при ветровых нагрузках.

4.1. Планирование маршрута движения

Для решения Задачи 1 планирования маршрута движения ЛА в сложных условиях выберем подход, основанный на венгерском методе. Пусть $P = \{p_1, \dots, p_{10}\}$ – множество из десяти опорных точек, через которые должен быть проложен маршрут. Задача летательного аппарата – пролететь из точки p_1 в точку p_{10} с посещением всех промежуточных случайно пронумерованных опорных точек. Матрица расстояний D показана в Табл. 2, при этом расстояния указаны в километрах.

Непроходимые препятствия и запреты на перелет обозначены символом ∞ . Видно, что из

Табл. 2. Матрица расстояний

Пункты отправления	Пункты прибытия									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	∞	26	51	18	7	44	35	30	10	∞
2	∞	∞	25	8	19	17	8	4	15	18
3	∞	25	∞	33	44	9	17	21	40	8
4	∞	8	33	∞	11	25	16	12	8	25
5	∞	19	44	11	∞	36	28	23	3	35
6	∞	17	9	25	36	∞	8	13	33	7
7	∞	8	17	16	28	8	∞	4	24	11
8	∞	4	21	12	23	13	4	∞	20	14
9	∞	15	40	8	3	33	24	20	∞	32
10	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

пункта p_1 нельзя сразу попасть в пункт p_{10} , равно как и вернуться в начальную точку p_1 . Матрица V (Табл. 3) показывает как скорость и направление ветровых потоков влияют на скорость движения ЛА между пунктами. Прием среднюю скорость ветра 6 м/с, а направление – 30° (от севера по часовой стрелке). Рассчитывается обобщенная матрица C (Табл. 4), которая оценивает временные затраты на перемещения (в минутах) между пунктами с учетом ветровых потоков из расчета средней скорости летательного аппарата – 45 м/с.

Особенностью полученной матрицы является то, что перемещение между пунктами в прямом и обратном направлениях требует разных временных затрат. Результат решения задачи о назначениях венгерским методом показан в Табл. 5. В данном случае оптимальный маршрут может быть непосредственно получен из Табл. 5, при этом пункты 4, 5 предложенного алгоритма не используются.

Построенный маршрут записывается в следующем виде: $1 \rightarrow 5 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 3 \rightarrow 10$, что соответствует временным затратам – 25.6 минут. В общем случае, в силу присутствия циклов, получить полный маршрут непосредственно из Табл. 5 удастся не всегда. Тогда, для получения квазиоптимального маршрута необходимо применить все шаги предложенного Алгоритма.

4.2. Моделирование полета по заданной траектории

Процесс движения летательного аппарата по заданному маршруту в неспокойной атмосфере моделируется в системе MATLAB Simulink. При этом задача сводится к преследованию псевдоцели, совершающей эталонное движение по заданной траектории через опорные точки. Подробности, связанные с выбором математических моделей ЛА и ветровых возмущений, а также разработкой интеллектуальной системы управления полетом, применяющей стратегии и

Табл. 3. Матрица ветровых скоростей

Пункты отправления	Пункты прибытия									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	∞	-5.5	-5.4	-5.6	-5.2	-5.4	-5.4	-5.4	-5.4	∞
2	5.5	∞	-5.4	5.3	5.6	-5.2	-4.7	-4.2	5.6	-5.2
3	5.4	5.4	∞	5.3	5.5	5.6	5.6	5.5	5.5	5.6
4	5.6	-5.3	-5.3	∞	5.8	-5.2	-5	-4.9	5.8	-5.2
5	-5.2	-5.6	-5.5	-5.8	∞	-5.4	-5.4	-5.4	-5.7	-5.4
6	5.4	5.2	-5.6	5.2	5.4	∞	5.6	5.5	5.4	5.6
7	5.4	4.7	-5.6	5	5.4	-5.6	∞	-5.2	5.3	-5.6
8	5.4	4.2	-5.5	4.9	5.4	-5.5	-5.2	∞	5.4	-5.5
9	5.4	-5.6	-5.5	-5.8	5.7	-5.4	-5.3	-5.4	∞	-5.4
10	5.4	5.2	-5.6	5.2	5.4	-5.6	5.6	5.5	5.4	∞

Табл. 4. Обобщенная матрица

Пункты отправления	Пункты прибытия									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	∞	11.3	21.6	7.9	3	18.5	14.9	13	4.5	∞
2	∞	∞	10.7	2.7	6.5	7.4	3.7	1.8	5.3	7.6
3	∞	8.4	∞	11	14.6	3	5.7	7.1	13.4	3
4	∞	3.4	13.9	∞	3.8	10.7	7.1	5.2	2.6	10.5
5	∞	8.3	18.6	4.9	∞	15.6	11.9	10	1.5	15
6	∞	5.8	3.8	8.5	12.2	∞	3	4.4	11	2.5
7	∞	3	7.4	5.7	9.3	3.8	∞	1.9	8.2	4.9
8	∞	1.5	9.1	4.2	7.8	5.6	1.9	∞	6.7	6.2
9	∞	6.8	17.1	3.4	1.2	14	10.4	8.5	∞	13.6
10	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

Табл. 5. Решение задачи о назначениях

Пункты отправления	Пункты прибытия									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	∞	5.9	11.8	2.7	0	12.3	8.7	8.7	0	∞
2	∞	∞	3.4	0	6.0	3.7	0	0	3.3	3.9
3	∞	6.2	∞	9.0	14.8	0	2.7	6.0	12.1	0
4	∞	0	6.1	∞	2.8	6.5	2.9	2.9	0	6.3
5	∞	5.9	11.8	2.7	∞	12.4	8.7	8.7	0	11.8
6	∞	6.4	0	9.3	15.2	∞	2.8	6.1	12.5	2.2
7	∞	0	0	2.9	8.7	0	∞	0	6.1	1.1
8	∞	0.3	3.6	3.3	9.1	3.7	0	∞	6.5	4.3
9	∞	3.2	9.1	0	0	9.6	6.0	6.0	∞	9.2
10	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

правила управления для оперативного реагирования на изменения во внешней среде, описаны в работах автора [15-17] и по этой причине в настоящей статье не приводятся.

На Рис. 2 показаны полученные траектории летательного аппарата (черный цвет) и псевдоцели (серый цвет). Пункты отправления и прибытия отмечены черными маркерами, а промежуточные опорные точки – серыми, при этом все пункты пронумерованы. Рис. 2 демонстрирует влияние ветровой нагрузки на траекторию движения. Видно, что стратегии поведения, реализуемые правилами управления, позволяют успешно справляться с поставленной задачей.

Основными критериями качества управления являются: интегральная оценка отклонения от заданного маршрута (от траектории псевдоцели) в процессе движения и визуальная оценка траектории полета.

Планирование траектории полета ЛА в сложных условиях при большом количестве пунктов облета может быть реализовано на удаленном сервере наземной станции управления с последующей передачей полученного решения на борт. Динамическое управление движением выполняется непосредственно бортовым вычислительным комплексом (БВК) летательного аппарата в реальном времени. При выборе математического обеспечения БВК учитывается возможность его эффективной реализации в условиях ограничений на вычислительные ресурсы. Для выработки управлений целесообразно использовать вычислительные процедуры семейства CORDIC, ориентированные на выполнение геометрических преобразований, вычисление тригонометрических, ги-

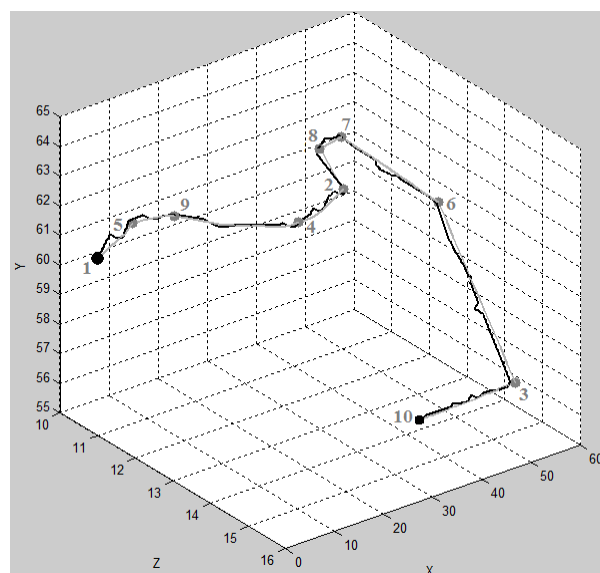


Рис. 2. Траектории летательного аппарата и псевдоцели

перболических, логарифмических, обратных и других математических функций [18] с наперед заданной точностью.

Заключение

В статье рассмотрен алгоритм планирования маршрута летательного аппарата, базирующийся на венгерском методе решения задачи о назначениях, который учитывает ветровые потоки и препятствия между опорными пунктами. Показано, что предложенная процедура в общем случае находит квазиоптимальный путь по критерию минимизации суммарных временных затрат. В случае, когда необходима быстрая прокладка маршрута, учитывающая только рас-

стояния между пунктами, целесообразно применять подход, основанный на приближенном решении задачи коммивояжера с применением сетевой модели. Предложенные алгоритмы могут быть применены для решения практически значимых задач планирования маршрута движения с установленными пунктами отправления и назначения и обязательным посещением всех промежуточных опорных точек.

Проведено моделирование полета летательного аппарата по спланированному маршруту при ветровой нагрузке. Экспериментальные исследования, выполненные в системе MATLAB Simulink с применением интеллектуальной системы управления, дают возможность визуальной оценки траектории движения летательного аппарата в неспокойной атмосфере с учетом его математической модели и подтверждают хорошее качество решения задачи. Предполагается, что внедрение эффективных алгоритмов планирования и алгоритмов управления, основанных на правилах, в бортовые комплексы малых ЛА, будет способствовать повышению их автономности и обеспечит необходимую точность решения целевых задач.

Литература

- De Filippis L., Guglieri G., Quagliotti F. Path planning strategies for UAVS in 3D environments // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2012. Vol.65. P. 247-264.
- Yakovlev K.S., Makarov D.A., Baskin E.S. Automatic path planning for an unmanned drone with constrained flight dynamics // *Scientific and Technical Information Processing*. 2015. Vol.42. No.5. P. 347-358.
- Kothari M., Postlethwaite I. A probabilistically robust path planning algorithm for UAVs using rapidly-exploring random trees // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2013. Vol.71. No.2. P. 231-253.
- Allgeuer P., Behnke S. Hierarchical and state-based architectures for robot behavior planning and control // *Proceedings of 8th Workshop on Humanoid Soccer Robots*, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Atlanta. 2013.
- Xavier J.A., Selvakumari S.R. Behavior architecture controller for an autonomous robot navigation in an unknown environment to perform a given task // *International Journal of Physical Sciences*. 2015. Vol.10. P. 182-191.
- Никифорова Л.Н. Построение оптимальной траектории маловысотного полета на средних дистанциях // *Авиакосмическое приборостроение*. 2010. №3. С. 32-38.
- Kanatnikov A.N., Shmagina E.A. Terminal control of aircraft motion // *Computational Mathematics and Modeling*. 2013. Vol.24. P. 327-341.
- Karshakov E.V. Specifics of aircraft control algorithms in the case of aerial survey // *Automation and Remote Control*. 2013. Vol.74. No.12. P. 2173-2179.
- Tkachev S.B., Liu W. Design of path following method for unmanned aerial vehicles using normal forms // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol.48. P. 10-15.
- Pandey A., Parhi D.R. Multiple mobile robots navigation and obstacle avoidance using minimum rule based ANFIS network controller in the cluttered environment // *International journal of Advanced Robotics and Automation*. 2016. No.1. P. 1-11.
- Кучеренко Е.И., Дрюк А.Д. Расширение методов интеллектуального управления сложными объектами // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т.4. №3. С. 13-18.
- Turpin M., Mohta K., Michael N., Kumar V. Goal assignment and trajectory planning for large teams of interchangeable robots // *Autonomous Robots*. 2014. Vol.37. P. 401-415.
- Kuhn H. The hungarian method for the assignment problem // *Naval research logistics quarterly*. 1955. Vol.2. P. 83-97.
- Хачумов М.В. Сетевая модель кластерного анализа // *Прикладная физика и математика*. 2013. №10. С. 80-86.
- Khachumov M.V., Abramov N.S., Makarov D.A. Controlling flight vehicle Spatial Motion Along a Given Route // *Automation and Remote Control*. 2015. Vol.76. P. 1070-1080.
- Хачумов М.В. Решение задачи следования за целью автономным летательным аппаратом // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2015. №2. С. 45-52.
- Хачумов М.В. Решение задачи группового преследования цели в условиях возмущений (пространственный случай) // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2017. №2. С. 31-41.
- Хачумов В.М. Аппаратные платформы и математическое обеспечение для бортовых систем управления малых летательных аппаратов // *Научное обозрение*. 2016. №7. С. 114-122.

Хачумов Михаил Вячеславович. Научный сотрудник ИСА ФИЦ ИУ РАН. Окончил Российский университет дружбы народов (РУДН) в 2009 году. Кандидат физико-математических наук. Количество печатных работ: более 45. Область научных интересов: искусственный интеллект, интеллектуальное управление, дифференциальные игры, кластерный анализ. E-mail: khmike@inbox.ru

Planning the route and modeling flight vehicle motion in an uncertain environment

M.V. Khachumov

The problem of planning the route is considered on the example of visiting reference points by an aerial vehicle in a perturbed environment. As the main tool for laying the route, a procedure is proposed that uses the Hungarian method of solving the assignment problem. It is assumed that the initial matrix of distances takes into account impassable obstacles between points that are modeled by the value of the

distance equal to infinity. Planning is complicated by the presence of wind flows that affect the speed of an aircraft (and, in general, affect the trajectory of motion). As a generalized criterion, it is proposed to use time costs that are required for transition between points. In addition, the approach to solving the simplified problem of laying a route in the absence of obstacles and wind loads is considered. This approach is based on the solution of the traveling salesman problem. Simulating aircraft motion along a given route in an uncertain environment is performed with allowance for the constant and dynamic (random) components of wind flows. Simulation system is implemented in MATLAB Simulink program and contains mathematical models of a flight vehicle and wind loads, as well as a special intelligent control module for rapid response to changes in the external environment.

Keywords: autonomous aerial vehicles, route planning, assignment problem, Hungarian method, traveling salesman problem, Kohonen neural network, trajectory motion, control system, wind disturbances, simulation.

References

1. De Filippis, L., G. Guglieri and F. Quagliotti. 2012. Path planning strategies for UAVS in 3D environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 65:247-264.
2. Yakovlev, K. S., D. A. Makarov and E. S. Baskin. 2015. Automatic path planning for an unmanned drone with constrained flight dynamics. *Scientific and Technical Information Processing*. 42(5):347-358.
3. Kothari, M. and I. Postlethwaite. 2013. A probabilistically robust path planning algorithm for UAVs using rapidly-exploring random trees. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 71(2):231-253.
4. Allgeuer, P. and S. Behnke. 2013. Hierarchical and state-based architectures for robot behavior planning and control. *Proceedings of 8th Workshop on Humanoid Soccer Robots, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. Atlanta.
5. Xavier, J. A. and S. R. Selvakumari. 2015. Behavior architecture controller for an autonomous robot navigation in an unknown environment to perform a given task. *International Journal of Physical Sciences*. 10:182-191.
6. Nikiforova, L. N. 2010. Postroenie optimalnoy traektorii malovysotnogo poleta na srednih distanciyah [Constructing optimal trajectory of nap-of-the-earth flight on medium distances for helicopter]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie [Aerospace Instrument-Making]*. 3:32-38.
7. Kanatnikov, A. N. and E. A. Shmagina. 2013. Terminal control of aircraft motion. *Computational Mathematics and Modeling*. 24:327-341.
8. Karshakov, E. V. 2013. Specifics of aircraft control algorithms in the case of aerial survey. *Automation and Remote Control*. 74(12):2173-2179.
9. Tkachev, S. B., and W. Liu. 2015. Design of path following method for unmanned aerial vehicles using normal forms. *IFAC-PapersOnLine*. 48:10-15.
10. Pandey, A. and D. R. Parhi. 2016. Multiple mobile robots navigation and obstacle avoidance using minimum rule based ANFIS network controller in the cluttered environment. *International journal of Advanced Robotics and Automation*. 1:1-11.
11. Kucherenko, Ye. I. and O. D. Driuk. 2014. Rasshirenie metodov intellektual'nogo upravleniya slozhnymi ob'ektami [Extension of methods of intelligent control of complex objects]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tekhnologij [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]*. 3:13-18.
12. Turpin, M., K. Mohta, N. Michael and V. Kumar. 2014. Goal assignment and trajectory planning for large teams of interchangeable robots. *Autonomous Robots*. 37:401-415.
13. Kuhn, H. 1955. The hungarian method for the assignment problem. *Naval research logistics quarterly*. 2:83-97.
14. Khachumov, M. V. 2013. Setevaya model' klasternogo analiza [Network model of cluster analysis]. *Prikladnaya fizika i matematika [Applied Physics and Mathematics]*. 10:80-86.
15. Khachumov, M. V., N. S. Abramov, and D. A. Makarov. 2015. Controlling flight vehicle spatial motion along a given route. *Automation and Remote Control*. 76:1070-1080.
16. Khachumov, M.V. 2015. Reshenie zadachi sledovaniya za cel'yu avtonomnym letatel'nyy apparatom [The solution of the problem of the target following by the autonomous aircraft]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij [Artificial intelligence and decision-making]*. 2:45-52.
17. Khachumov M.V. 2017. Zadachi gruppovogo presledovaniya celi v usloviyah vozmushchenij (prostranstvennyy sluchaj) [Problems of group pursuit of a target in a perturbed environment (Spatial case)]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij [Artificial intelligence and decision-making]*. 2:31-41.
18. Khachumov V.M. 2016. Apparatnye platformy i matematicheskoe obespechenie dlya bortovyh sistem upravleniya malyyh letatel'nyh apparatov [Hardware platforms and mathematical software for the on-board control systems of small aircraft]. *Nauchnoe obozrenie [Scientific Review]*. 7:114-122.

Khachumov Mikhail Vyacheslavovich. Researcher at ISA FRC CSC RAS. Graduated from Peoples' Friendship University of Russia in 2009. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. The author of about 45 scientific papers. Research interests: artificial intelligence, intelligent control, differential games, cluster analysis, metrics. E-mail: khmike@inbox.ru