

А. В. Голубкина, аспирант, annatutta@gmail.com, Н. В. Павлова, д-р техн. наук, проф.,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Выбор направления движения ЛА для доставки грузов группе движущихся объектов. Часть 1. Выход в точку запуска БПЛА

Показана возможность синтеза алгоритмов управления многофункционального летательного аппарата (ЛА) при выведении его в заданную точку пуска беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для доставки грузов группе движущихся объектов.

Формирование оптимальной траектории для выхода в заданные условия включает два этапа: этап выбора направления движения ЛА на маршруте (выход ЛА в заданную точку пуска БПЛА); этап траекторного управления (синтезирование команд на сокращение отклонения от заданного направления на маршруте).

Разработан алгоритм первого этапа, учитывающий ограничения, накладываемые техническими возможностями многофункциональных ЛА и условиями движения группы объектов. Приведены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность разработанного алгоритма.

Ключевые слова: многофункциональный ЛА, БПЛА, алгоритм, оптимальная траектория, полетное задание, целочисленное математическое программирование

Введение

Одной из актуальных задач, возлагаемых на летательные аппараты (ЛА), является доставка грузов группе движущихся в труднодоступной местности объектов, в том числе в условиях отсутствия взлетно-посадочной полосы. В описанном случае при доставке дорогостоящего груза (например, высокотехнологичного оборудования) одним из эффективных способов является использование многофункциональных ЛА, несущих на борту группу БПЛА, каждый из которых на конечном этапе доставляет груз одному из объектов [1]. Задача осложняется, если объекты движутся.

Созданию алгоритмов управления ЛА при выборе оптимального направления полета в рассматриваемых условиях посвящен ряд работ [2, 3]. В статье предлагается алгоритм, расширяющий учитываемые в ходе выбора направления полета ограничения [4, 5].

Решение задачи доставки грузов группе движущихся объектов с использованием многофункциональных ЛА и группы БПЛА включает два этапа:

- этап выбора маршрута движения ЛА, на котором формируется оптимальная (в смысле цели управления) траектория движения;
- этап траекторного управления, на котором определяется отклонение ЛА от направления движения по оптимальной траектории и синтезируются команды на сокращение этого отклонения.

В соответствии с таким подходом система управления включает алгоритмы:

- оптимизации направления траектории движения (выход в заданную точку пуска БПЛА);
- текущей оптимизации траектории полета.

Задачи обоих этапов должны решаться с учетом целого ряда ограничений, вытекающих из возможностей самого многофункционального ЛА и текущей обстановки в ходе полета [6–8].

Совместная формализация этих задач приводит к сложным моделям, поиск решения которых затруднен. В данной статье рассмотрим алгоритм, позволяющий решить задачу первого этапа [8].

Алгоритм оптимизации выбора направления движения ЛА разработан для обеспечения максимального числа обслуженных получателей грузов. В качестве исходной информации алгоритм использует снимаемую с датчиков многофункционального ЛА информацию и гипотезу о траектории движения объектов в группе, для которых доставляется груз.

Представляемый алгоритм определяет номер оптимального маршрута, выбирая в результате оптимизации маршрут, обеспечивающий максимальное число обслуженных объектов, которым доставляется груз. Поставленная задача решается при условии, что на число объектов, которым доставляется груз, и на характер их движения накладывается ряд ограничений [9, 10]. Пусть объекты движутся равномерно и прямолинейно, а выпущенные БПЛА выполняют свой полет им навстречу. Предполагаем, что направление движения комплекса (ЛА и группа БПЛА на его борту) должно быть выбрано так, что многофункциональный ЛА не может отклоняться более чем на 90° от направления движения объектов. Рассмотрим решение задачи при условии, что генерируется не более трех отрезков (заканчивающихся соответствующим узлом) по направлению на группу объектов, а их длина и угол излома относительно текущего курса определяются маневренными возможностями многофункциональ-

ного ЛА. Требуется из сгенерированных узлов, характеризующих возможное положение многофункционального ЛА, выбрать тот, для которого значение сформированного штрафного функционала минимально.

Выбранный номер оптимального маршрута поступает в алгоритм текущей оптимизации полета в качестве исходных данных.

Постановка задачи

Требуется разработать алгоритм, позволяющий рассчитать направление траектории движения многофункционального ЛА, доставляющего с помощью БПЛА грузы для группы движущихся объектов с учетом выдерживания ограничений.

Считаем, что существует исходное множество маршрутов, отличающихся друг от друга значениями x, z, ψ , где x, z, ψ — координаты и курс ЛА. Из этого счетного множества требуется выбрать единственный оптимальный маршрут, максимизирующий число обслуживаемых на нем движущихся объектов группы получателей. Маршрут формируется итерационно и состоит из частей траектории, выбираемых в дискретных точках (узлах). Из каждого такого узла генерируется определенное число направлений движения, заканчивающихся новым узлом, который и подлежит выбору в данный момент. В статье рассматривается частый случай использования метода ветвей и границ, и выбор узлов осуществляется из трех возможных вариантов.

Введем искомую переменную n — номер выбираемого направления из трех возможных:

$$n \in N, N = \{1, 2, 3\}. \quad (1)$$

Это номер генерируемой ветви при выполнении в ходе оптимизации одной итерации. Выбор на каждом шаге осуществляется из трех ветвей.

Требуется выбрать такое значение этой целочисленной переменной n , для которого значение веса V_y узла будет минимальным:

$$V_y \rightarrow \min. \quad (2)$$

Значение V_y ищется при следующих ограничениях на движущиеся объекты группы, число которых равно l (далее i — номер объекта, $i = \overline{1, l}$):

- объекты не должны выходить за ограничения, наложенные на курсовой угол φ_i :

$$\cos \varphi_i > 0^\circ; \quad (3)$$

- направление движения ЛА и БПЛА на группу объектов должно осуществляться во встречном направлении, т. е. должно выполняться ограничение относительно ракурса q_i :

$$\cos q_i > 0; \quad (4)$$

- формирование маршрута должно выполняться с возможно малой разностью курсовых углов между крайними объектами:

$$|\varphi_{\max} - \varphi_{\min}| < 30^\circ, \quad (5)$$

где $\varphi_{\max}, \varphi_{\min}$ — курсовые углы объектов с максимальными и минимальными значениями;

- минимальная радиальная составляющая скорости каждого i -го объекта группы должна удовлетворять условию:

$$|V_{oi} \cos q_i| > 60 \text{ м/с}; \quad (6)$$

- объекты, для которых доставляется груз, проанжированы; определен объект, получающий груз первым.

Формализуем описанную задачу как задачу математического программирования. Вес каждого узла V_y в итерациях определяется по формуле

$$V_y = \sum_{m=1}^3 Q_{\text{шт}m} + Q_{\text{кач}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{кач}}$ — отражает требования к траектории ЛА и служит для формирования маршрута с возможной малой разностью курсовых углов между крайними объектами группы получателей; $Q_{\text{шт}m}$ — функция штрафа, назначаемая в том случае, если значения параметров, вычисленных в узле, выходят за ограничения (3)—(6), которая рассчитывается по формулам

$$Q_{\text{шт}1} = \sum_{i=1}^l Q_{\text{шт}1i}; \quad (8)$$

$$Q_{\text{шт}1i} = \begin{cases} 0, & \text{если ЛА совершает полет} \\ & \text{навстречу объектам;} \\ \beta_1 & \text{иначе;} \end{cases} \quad (9)$$

$$Q_{\text{шт}2} = \sum_{i=1}^l Q_{\text{шт}2i}; \quad (10)$$

$$Q_{\text{шт}2i} = \begin{cases} 0, & \text{если } \varphi_i < 90^\circ; \\ \beta_2, & \text{если } \varphi_i \geq 90^\circ; \end{cases} \quad (11)$$

$$Q_{\text{шт}3} = \begin{cases} 0, & \text{если } |\varphi_{\max} - \varphi_{\min}| < 30^\circ; \\ \beta_3, & \text{если } |\varphi_{\max} - \varphi_{\min}| \geq 30^\circ; \end{cases} \quad (12)$$

$$Q_{\text{кач}} = \beta_4 |0,52 - |\varphi_{\max} - \varphi_{\min}||, \quad (13)$$

где β_1, \dots, β_4 — коэффициенты, значения которых выбираются в зависимости от типа многофункционального ЛА.

Таким образом, сформируем критерий для задачи оптимизации направления траектории движения как наименьшее значение функционала в одном из трех сгенерированных узлов:

$$I_k = I_{k-1} + V_n \rightarrow \min, \quad (14)$$

где I_{k-1} — значение функционала в узле, из которого происходит генерация (для первой итерации $I_0 = 0$), k — номер итерации.

В результате циклической генерации отрезков получается постоянно возрастающее число вариантов маршрута, имеющих одну общую точку. Из образовавшихся трех узлов выбирается узел с наименьшим значением функционала, и генерация группы направлений повторяется.

Полученная модель относится к классу целочисленных линейных моделей математического программирования. Решать такие задачи легче при замене целочисленных переменных булевыми. Введем булеву переменную y_n :

$$y_n = \begin{cases} 1, & \text{если используется} \\ n\text{-я ветвь из трех;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (15)$$

Тогда на каждом шаге выбора направления движения решается задача

$$\sum_{n=1}^3 V_y y_n \rightarrow \min \quad (16)$$

при условии, что на каждой итерации всегда выбирается единственная ветвь:

$$\sum_{n=1}^3 y_n = 1. \quad (17)$$

При этом на каждом шаге работы алгоритма формируется показатель (16), а вес V_y сгенерированной ветви рассчитывается с использованием выражений (8)–(13).

Задача (16)–(17) представляет собой линейную модель целочисленного математического программирования с булевыми переменными.

Особенностью полученной математической модели (16)–(17) по сравнению с общей линейной моделью дискретного математического программирования с булевыми переменными является наличие ограничения, указывающего на то, что из всего множества переменных y_n выбирается лишь одна переменная, принимающая значение, равное единице.

В технической задаче ограничения такого типа возникают, так как в рассматриваемой постановке задачи необходимо выбрать лишь одну сгенерированную ветвь.

Для полученного класса целочисленных моделей разработано два общих метода генерирования специальных ограничений: метод ветвей и границ и метод отсекающих плоскостей. Опыт вычислений свидетельствует, что для моделей типа (16)–(17) метод ветвей и границ более успешно решает задачу, чем метод отсекающих плоскостей [11, 12].

Алгоритм оптимизации направления траектории движения ЛА

Алгоритм оптимизации траектории движения многофункционального ЛА создан на базе метода ветвей и границ. Этот метод позволяет,

не осуществляя полный перебор вариантов решения задачи целочисленного линейного программирования, найти оптимальное решение. Он гарантированно эффективен, когда размерность полученной модели не превышает десятка переменных и ограничений.

Суть метода ветвей и границ основывается на последовательном исключении из рассмотрения областей, не содержащих целочисленных решений, путем введения надлежащих ограничений. Данный метод изменяет пространство решений задачи линейного программирования так, что в конечном счете получается оптимальное решение задачи целочисленного программирования.

Разработанный алгоритм имеет пошаговую структуру. Его блок-схема приведена на рис. 1.

Шаг 1. Вычисление исходного состояния центра группы объектов

$$X_{гр} = \frac{\sum_{i=1}^l X_{Oi}}{l}; Z_{гр} = \frac{\sum_{i=1}^l Z_{Oi}}{l}; \Psi_{гр} = \frac{\sum_{i=1}^l \Psi_{Oi}}{l}, \quad (18)$$

где $X_{гр}$, $Z_{гр}$ — координаты группы, $\Psi_{гр}$ — курс группы; l — число объектов в группе; X_{Oi} , Z_{Oi} — координаты объектов для текущей итерации; Ψ_{Oi} — курс необслуженных объектов.

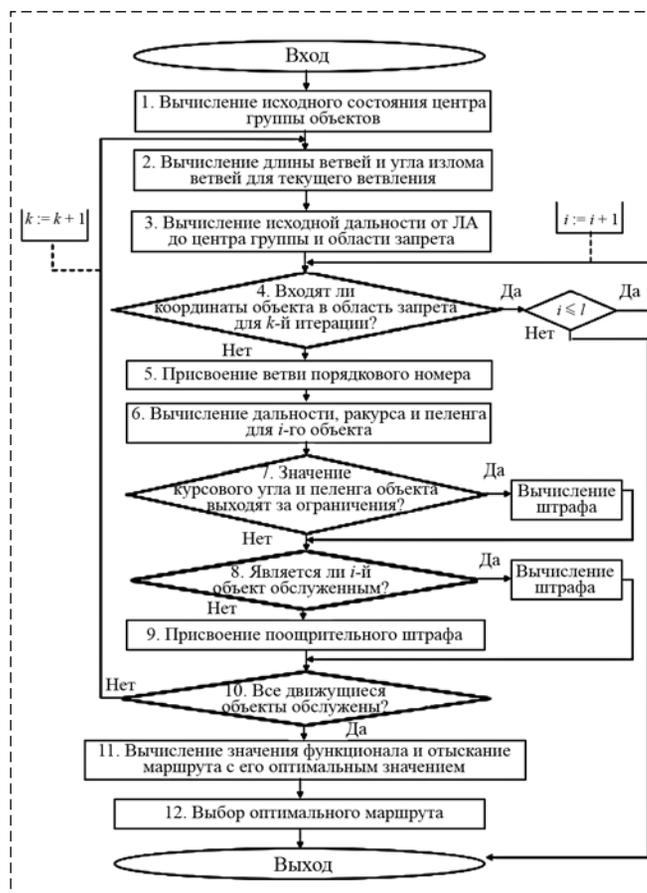


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оптимизации траектории движения МЛА

Шаг 2. Вычисление длины ветвей для текущего ветвления T_n и угла излома ветвей относительно текущего курса ЛА ρ_n :

$$T_n = \frac{(D_6 - D_B)}{K_1},$$

$$T_n = \begin{cases} 30, & \text{если } T > 30; \\ T_n, & \text{если } 30 \geq T \geq 6; \\ 6, & \text{если } T < 6, \end{cases} \quad (19)$$

где T_n — длина ветви для текущего ветвления; D_6 — расстояние от ЛА до ближайшего объекта группы; D_B — дальность выпуска БПЛА до ближайшего объекта; K_1 — коэффициент усиления;

$$\rho_n = \sum_{n=1}^3 j(-1)^n \rho;$$

$$\rho = \frac{g \text{tg} \gamma_{\max} t}{V_{\text{ЛА}}}, \quad (20)$$

где $V_{\text{ЛА}}$ — скорость ЛА; γ_{\max} — максимально допустимый крен ЛА; t — текущее время полета ЛА. Формулы (19) и (20) были получены в ходе моделирования.

Шаг 3. Вычисление исходной дальности от центра группы до многофункционального ЛА:

$$D = \sqrt{(X_{\text{ЛА}} - X_{\text{гр}})^2 + (Z_{\text{ЛА}} - Z_{\text{гр}})^2}, \quad (21)$$

где D — исходная дальность от центра группы до маневренного ЛА; $X_{\text{ЛА}}$, $Z_{\text{ЛА}}$ — координаты ЛА в момент входа в алгоритм.

На данном шаге также проводится расчет области запрета Δx , Δz , $\Delta \psi$ и координат объектов группы для текущего ветвления X'_{oi} , Z'_{oi} и координаты ЛА для конца n -й генерируемой в алгоритме ветви в каждой итерации $x_{\text{ЛА}n}$, $z_{\text{ЛА}n}$:

$$\Delta x = \Delta z = K_2 V_{\text{ЛА}} T_n,$$

$$\Delta \psi = K_3, \quad (22)$$

где $V_{\text{ЛА}}$ — скорость полета ЛА; T_n — длина ветвей для текущего ветвления; K_2 и K_3 — коэффициенты усиления;

$$X'_{oi} = X_{oi} + \left(\sum_{k=1}^n t_{\text{пр}} \right) V_{oXi};$$

$$Z'_{oi} = Z_{oi} + \left(\sum_{k=1}^n t_{\text{пр}} \right) V_{oZi}, \quad (23)$$

где V_{oXi} , V_{oZi} — проекции скоростей объектов для текущей итерации; ψ_{obi} — курс необслуженных объектов; $\sum_{k=1}^n t_{\text{пр}}$ — время прохождения ЛА одного из сгенерированных маршрутов;

$$x_{\text{ЛА}n} = x_{\text{ЛА} \min} + V_{\text{ЛА}} \cos(\psi_{\text{ЛА} \min} + \Delta \psi_n);$$

$$z_{\text{ЛА}n} = z_{\text{ЛА} \min} + V_{\text{ЛА}} \sin(\psi_{\text{ЛА} \min} + \Delta \psi_n), \quad (24)$$

где $x_{\text{ЛА} \min}$, $z_{\text{ЛА} \min}$, $\psi_{\text{ЛА} \min}$ — координаты и курс ЛА, в которых значение функционала минимально; $\Delta \psi_j$ — приращение курса относительно $\psi_{\text{ЛА} \min}$ для n -й ветви из генерируемого числа в каждой итерации.

Шаг 4. Исключение из рассмотрения объектов, выходящих за области запрета, что проверяется выполнением условий:

$$\begin{cases} |x_{\text{ЛА}n} - x_{\text{ЛА}0}| < \Delta x; \\ |z_{\text{ЛА}n} - z_{\text{ЛА}0}| < \Delta z; \\ |\psi_{\text{ЛА}n} - \psi_{\text{ЛА}0}| < \Delta \psi, \end{cases} \quad (25)$$

где $x_{\text{ЛА}0}$, $z_{\text{ЛА}0}$, $\psi_{\text{ЛА}0}$ — координаты и курс ЛА в начальный момент входа в алгоритм.

Шаг 5. Присвоение ветви порядкового номера.

Шаг 6. Вычисление дальности D_i , курсового угла ϕ_i и ракурса q_i на i -й объект по формулам

$$D_i = \sqrt{(X_{\text{ЛА}} - X'_{oi})^2 + (Z_{\text{ЛА}} - Z'_{oi})^2};$$

$$\cos q_i = \frac{(V_{oXi}(X_{\text{ЛА}} - X_{oi}) + V_{oZi}(Z_{\text{ЛА}} - Z_{oi}))}{V_{\text{ЛА}}};$$

$$\cos \phi_i = \frac{(V_{oXi}(X_{\text{ЛА}} - X_{oi}) + V_{oZi}(Z_{\text{ЛА}} - Z_{oi}))}{(V_{\text{ЛА}} \cdot D_i)}.$$

Шаг 7. Проведение проверки выхода курсового угла и ракурса объекта за наложенные ограничения, а также дополнительная проверка факта обслуживания объекта.

В случае, если объект исключается из рассмотрения, назначаются штрафы (8)—(12).

Шаг 8. Проверка, проводимая в целях определения факта доставки груза движущемуся объекту (вылета БПЛА к данному объекту).

Шаг 9. Присваивается "поощряющий" штраф со знаком минус, вычисляемый по формуле (13), в случае, если объект является обслуженным.

Шаг 10. Проверяется факт обслуживания всех движущихся объектов. В том случае, если не все объекты обслужены, проводятся новые итерации (число k ограничено 300 итерациями ввиду вычислительных возможностей и выполнения поставленной задачи).

Шаг 11. Значение функционала n -й ветви складывается из значения функционала ветви, из которой она была сгенерирована, и суммы функций качества и штрафа, вычисленных для данной ветви (14).

Шаг 12. Условием окончания работы алгоритма является факт обслуживания всех объектов группы получателей при минимуме (14). Сумма значений функционала во всех узлах маршрута составляет цену маршрута. Выбор оптимального маршрута. Оптимальным будет маршрут, обеспечивающий максимальное число обслуженных объектов (минимум цены).

**Результаты экспериментов по выбору направления движения маневренного ЛА
при доставке грузов группе движущихся объектов**

№ эксперимента	Начальные координаты многофункционального ЛА ($X_{ЛА}, Z_{ЛА}$), км	Начальные координаты движущихся объектов (X_0, Z_0), км	Длина ветви T_j , м	Угол излома ветвей, °	Значение функционала I_n	Номер оптимального маршрута
1	(0,0)	(130,10) (120,20) (100,30) (100,40)	23,3	16,8	27,8	3
2	(0,0)	(100,10) (110,20) (120,30) (90,40)	15	13,5	48,6	1
3	(0,0)	(70,10) (60,20) (50,30) (40,40)	11	18,3	32,5	2

Компьютерная апробация алгоритма

Для тестирования и отработки разработанного алгоритма выбора оптимального направления движения многофункционального ЛА использована его упрощенная имитационная модель в виде дифференциальных уравнений [13]. Программная реализация модели реализована в среде Visual Studio 2012.

На первом этапе (для разработанного алгоритма оптимизации направления движения ЛА) при моделировании учитываются следующие требования:

- в качестве доставляющего ЛА рассматривается современный многофункциональный ЛА;
- в качестве получателей груза рассматриваются движущиеся в группе объекты;
- очередность доставки БПЛА грузов определяется критерием обслуживания максимального числа объектов группы получателей;
- под приоритетом доставки грузов будем рассматривать заданную степень их значимости, определяемую путем задания первого объекта из группы (ограничение на ранжирование объектов);
- число движущихся объектов не может превышать четырех;
- объекты движутся параллельно вектору средней скорости с неизменными по времени модулями собственных скоростей;
- в качестве БПЛА рассматриваются БПЛА среднего класса;
- дальность пусков БПЛА ограничивается энергетикой БПЛА;
- при проведении моделирования принята гипотеза о прямолинейном движении объектов, для которых доставляется груз;
- объекты не эшелонированы по высоте;
- объекты не маневрируют;
- в продольном канале многофункциональный ЛА работает в режиме стабилизации высоты; скорости всех объектов составляют 50 км/ч;
- скорость многофункционального ЛА составляет 500 км/ч.

Характерные результаты моделирования для четырех экспериментов приведены в таблице.

Для движущихся объектов и при различных координатах многофункционального ЛА осу-

ществлялось моделирование доставки груза четырем получателям. В зависимости от координат многофункционального ЛА получены различные варианты выбора направления его движения.

Отличительной особенностью описанного эксперимента 1 является приоритет доставки, которым обладает движущийся объект под номером 1. Для экспериментов 2 и 3 таблицы приоритетными будут являться объекты под номерами 2.

На рис. 2 представлен результат работы алгоритма оптимизации направления траектории движения многофункционального ЛА. Многофункциональный ЛА стартует из точки 1. Навстречу ему из точек А, Б, В, Г прямолинейно движутся четыре объекта, которым доставляется груз. В точках 1—5 сгенерированы направления траекторий движения многофункционального ЛА. В этих точках алгоритм осуществляет выбор оптимального направления полета ЛА, которое заканчивается точкой 6, где выбор направления повторяется.

Условием окончания расчета направления траектории движения многофункционального ЛА является (для варианта № 1) обеспечение доставки грузов всем четырем объектам. В точке 6 осуществляется выпуск БПЛА с грузом для каждого объекта.

Для второго и третьего экспериментов получены аналогичные результаты. Успешно построены траектории многофункционального ЛА, обеспечивающие доставку грузов всем четырем объектам.

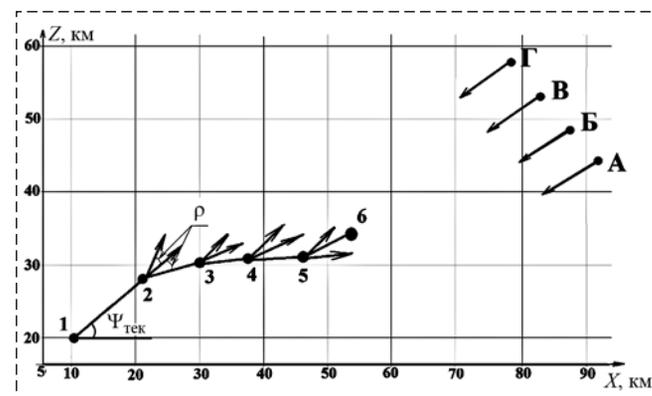


Рис. 2. Схематичное представление построения ветвей для эксперимента 1

Заключение

Разработан алгоритм выбора оптимального направления движения многофункционального ЛА. Его особенностью является учет ограничений технических возможностей ЛА и условий движения группы объектов и приоритетов обслуживания объектов в группе с точки зрения важности доставки грузов. Алгоритм осуществляет выбор направления траектории полета многофункционального ЛА, предусматривающий выход в точку маршрута, где выпущенные БПЛА доставят груз максимальному числу объектов, движущихся навстречу ЛА.

Компьютерное моделирование подтвердило работоспособность алгоритма оптимизации направления траектории движения многофункционального ЛА. Полученные данные могут быть использованы в качестве исходной информации для алгоритма текущей оптимизации траектории полета многофункционального ЛА. Описанию этого алгоритма будет посвящена отдельная статья (ввиду значительного объема соответствующих алгоритмов).

Совместная работа двух алгоритмов позволит решать задачи в полном объеме: вывести многофункциональный ЛА в точку, где грузы будут доставлены группе движущихся объектов.

Список литературы

1. **Авиация** ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы, вчера, сегодня, завтра. М.: Дрофа, 2004. 816 с.

2. **Yanbin Liu, Dibo Xiao, Yuping Lu.** Comparative study on a solving model and algorithm for a flush air data sensing system // *Sensors*. 2014. Vol. 14. P. 9210—9226.

3. **Tsung-Ying Sun, Shang-Jeng Tsai.** Intelligent maneuvering decision system for computer generated forces using predictive fuzzy inference system // *Journal of computers*. November 2008. Vol. 3, N. 11. P. 58—66.

4. **Нейрокомпьютеры** в авиации (самолеты) / Под ред. В. И. Васильева, Б. Г. Ильясова, С. Т. Кусимова. Кн. 14. М.: Радиотехника, 2003. 496 с.

5. **Лунев Е. М., Павлова Н. В.** Программно-алгоритмическое обеспечение для определения навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения // *Вестник МАИ*. 2009. Т. 16, № 6. С. 111—119.

6. **Веремеенко К. К., Пронькин А. Н., Репников А. В.** Алгоритмы структурной перестройки бортовых подсистем интегрированной системы посадки беспилотного летательного аппарата // *Электронный журнал "Труды МАИ"*. 2011. № 49.

7. **Лунев Е. М.** Повышение точности определения навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотографических измерений на этапе посадки // *Вестник МАИ*. 2011. Т. 18, № 2. С. 150—159.

8. **Раскин Л. Г.** Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления. М.: Сов. радио, 1976. 344 с.

9. **Andrzej Majka.** Trajectory Management of the Unmanned Aircraft System (UAS) in Emergency Situation // *Aerospace*. 4 May 2015. С. 222—234.

10. **Павлова Н. В., Видов К. С., Гусев Д. Н., Харченко Д. Н.** Обработка измерений и исходной информации для обеспечения безопасности движения летательных аппаратов в группе // *Вестник МАИ*. 2013. Т. 20, № 2. С. 140—148.

11. **Таха Хэмди А.** Введение в исследование операций. М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. 912 с.

12. **Агеев В. М., Павлова Н. В.** Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование: Учебник для студентов вызов по специальности "Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы". М.: Машиностроение, 1990. 432 с.

13. **Красовский А. А., Буков В. Н., Шендрик В. С.** Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. М.: Наука, 1977. 272 с.

Choice of the Direction of the Movement Aircraft for Cargo Delivery to Group of Moving Objects. Part 1. An Exit in a Point of Start of the UAV

A. V. Golubkina, annatutta@gmail.com, **N. V. Pavlova**,

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

Corresponding author: **Golubkina Anna V.**, Graduate Student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: annatutta@gmail.com

Accepted on December 01, 2017

At present, special attention is paid to the joint use of modern multifunctional aircraft (MA) and unmanned aircraft (UAV). One of the possible scenarios for interaction between aircraft and UAV is the delivery of goods to a group of moving objects. Effective implementation of the mission assigned to the complex (the aircraft and the UAV group on its board) requires the development of appropriate software and algorithmic support (AS). The article is devoted to the development of a AS, which allows to select the optimal trajectory of a multifunctional aircraft that delivers the UAV and which, in its turn, delivers the goods to a group of moving objects. One of the actual tasks assigned to the aircraft is the delivery of goods to a group of objects moving in difficult-to-reach terrain, also when there is no runway. In described case, when delivering an expensive cargo (for example, high-tech equipment), one of the effective methods is the use of MA carrying a UAV group on board, each at the final stage delivers the cargo to one of the objects. The task is complicated if objects are moving. One

of the ways to improve the efficiency of solving this problem is to form an optimal control trajectory for a multifunctional aircraft to bring it to a certain point from which the UAV is launched. The algorithm of the first stage, considering the restrictions imposed by technical capabilities of MLA and traffic conditions of group of objects is developed. The results of modeling confirming operability of the developed algorithm are presented.

Keywords: modern multifunctional aircraft, unmanned aircraft, algorithmic support, optimal control trajectory

For citation:

Golubkina A. V., Pavlova N. V. Choice of the Direction of the Movement Aircraft for Cargo Delivery to Group of Moving Objects. Part 1. An Exit in a Point of Start of the UAV, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 4, pp. 282–288.

DOI: 10.17587/mau.19.282-288

References

1. **Aviatsiya PVO Rossii I nauchno-tehnicheskij progress: boevye komplekсы I sistemy, vchera, segodnja, zavtra** (Aircraft of air defense of Russia and научно-технический progress: fighting complexes and systems, yesterday, today, tomorrow), Moscow, Drofa, 2004, 816 p. (in Russian).
2. **Yanbin Liu, Dibo Xiao, Yuping Lu.** Comparative study on a solving model and algorithm for a flush air data sensing system, *Sensors*, 2014, vol. 14, pp. 9210–9226.
3. **Tsung-Ying Sun, Shang-Jeng Tsai.** Intelligent maneuvering decision system for computer generated forces using predictive fuzzy inference system, *Journal of Computers*, November 2008, vol. 3, no. 11, pp. 58–66.
4. **Vasil'ev V. I., Il'jasov B. G., Kusimov S. T.** ed. *Nejrokomputery v aviatsii (samolety)* (Neurocomputers in aircraft (planes)), Moscow, Radiotekhnika, 2003, 496 p. (in Russian).
5. **Lunev E. M., Pavlova N. V.** *Programmno-algoritmicheskoe obespechenie dlja opredelenija navigacionnyh parametrov bespilotnogo letatel'nogo apparata nabaze fotoizobrazhenija* (Program and algorithmic providing for determination of navigation parameters of the unmanned aerial vehicle based of the facsimile), *Vestnik MAI*, 2009, vol. 16, no. 6, pp. 111–119 (in Russian).
6. **Veremeenko K. K., Pron'kin A. N., Repnikom A. V.** *Algoritmy struktunoj perestojki bortovyh porsistem integrirovannoj sistemy posadki bespilotnogo apparata* (Algorithms of restructuring of onboard sub-
- systems of the integrated system of landing of the unmanned aerial vehicle), *Jelektronnyj zhurnal "Trudy MAI"*, 2011, no. 49 (in Russian).
7. **Lunev E. M.** *Povyshenie tosnosti opredelenija navigacionnyh parametrov bespilotnogo letatel'nogo apparata na baze fotograficheskikh izmerenij na jetape posadki* (Increase in accuracy of determination of navigation parameters of the unmanned aerial vehicle on the basis of photographic measurements at a landing stage), *Vestnik MAI*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 150–159 (in Russian).
8. **Raskin L. G.** *Analiz slozhnyh sistem i jelementy teorii optimal'nogo upravlenija* (Analysis of difficult systems and elements of the theory of optimum control), Moscow, Sov. radio, 1976, 344 p. (in Russian).
9. **Majka A.** *Trajectory Management of the Unmanned Aircraft System (UAS) in Emergency Situation*, *Aerospace*, 4 May 2015, pp. 222–234.
10. **Pavlova N. V., Vidov K. S., Gusev D. N., Harchenko D. N.** *Obrabotka izmerenij I ishodnoj informacii dlja obespechenija bezopasnosti dvizhenija letatel'nyh apparatov v gruppe* (Processing of measurements and initial information for safety of the movement of aircraft in group), *Vestnik MAI*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 140–148 (in Russian).
11. **Taha Hjendi A.** *Vvedenie v issledovanie operacij* (Introduction to a research operation), Moscow, Izdatel'skij dom "Vil'jzms", 2001, 912 p. (in Russian).
12. **Ageev V. M., Pavlova N. V.** *Pribornye komplekсы letatel'nyh apparatov i ih proektirovanie uchebnik dlja studentov VUZov po special'nosti "Aviacionnye pribory I izmeritel'no-vychislitel'nye komplekсы"* (Instrument complexes of aircraft and their design: The textbook for students a call in "Aviation devices and measuring computer systems"), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 432 p. (in Russian).
13. **Krasovskij A. A., Bukov V. N., Shendrik V. S.** *Universalnye algoritmy optimal'nogo upravlenija nepreryvnymi processami* (Universal algorithms of optimum control of continuous processes), Moscow, Nauka, 1977, 272 p. (in Russian).

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5510, (499) 269-5397

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *З. В. Наумова*.

Сдано в набор 22.01.2018. Подписано в печать 14.03.2018. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН418. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.