

УДК 517.977

DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.672-681

Планирование съемки множества спортивных мероприятий на обширной территории группой беспилотных летательных аппаратов

В. И. Гончаренко^{1,2*}, Г. Н. Лебедев¹, Д. А. Михайлин¹, В. В. Нечаев³¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

² Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия

117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

*vladimirgonch@mail.ru

³ МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

119454, Россия, г. Москва, пр. Вернадского, д. 78

Аннотация

Решаемая в настоящей работе задача относится к классу задач наблюдения быстроразвивающихся событий на отдельных участках территории, которые необходимо контролировать в нужное время (в том числе и одновременно) с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Существенной особенностью данной задачи является, прежде всего, то, что практически все обслуживаемые наземные объекты должны наблюдаться при соблюдении определенного графика в соответствии с известным расписанием соревнований. Исключения представляют объекты «неспортивного профиля» - трассы доставки пассажиров, стоянки транспорта, места отдыха и т.д., которые нужно периодически контролировать для обеспечения безопасности участников и зрителей. Кроме этого, особенностью решаемой задачи является то, что в ходе наблюдения возможно существенное изменение важности наблюдаемых спортивных эпизодов в динамической обстановке. Это требует адаптивной коррекции длительности обслуживания в зависимости от мнения оператора управления группой БЛА с учетом интересов зрителей. Для решения поставленной задачи разработаны алгоритм предполетного планирования маршрутов обслуживания соревнований группой беспилотных летательных аппаратов и быстродействующий алгоритм оперативного планирования наблюдения соревнований с обязательным учетом соблюдения графика обслуживания. Для повышения эффективности предполетной маршрутизации группового полета предложено использовать генетический алгоритм. Как показали исследования, полученные в качестве первоначальной «элиты» варианты маршрутов подвергаются скрещиванию и мутации, и через малое число шагов эволюции сформированная группа маршрутов оказывается эффективнее первоначальной элиты примерно на 15-20%. При выборе состава обслуживаемых спортивных мероприятий с помощью БЛА предложено использовать мультипликативный критерий назначения их динамических приоритетов с учетом важности спортивных эпизодов и своевременности их обслуживания.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Ключевые слова: группа беспилотных летательных аппаратов, график обслуживания, назначение динамических приоритетов.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта проекта № 16-29-04326 офи_м «Методы интеграции и взаимосвязанные биоинспирированные модели смешанных робототехнических группировок и управления взаимодействием пертинентных информационных потоков для формирования виртуальной семантической среды».

Для цитирования: Гончаренко В. И., Лебедев Г. Н., Михайлин Д. А., Нечаев В. В. Планирование съемки множества спортивных мероприятий на обширной территории группой беспилотных летательных аппаратов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 3. С. 672-681. DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.672-681

© Гончаренко В. И., Лебедев Г. Н., Михайлин Д. А., Нечаев В. В., 2019



Mapping Out a Plan for Filming Numerous Sports Events Taking Place over a Vast Territory Using a Group of Unmanned Aerial Vehicles

V. I. Goncharenko^{1,2*}, G. N. Lebedev¹, D. A. Mikhaylin¹, V. V. Nechaev³

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

⁴ Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia

² V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

65 Profsoyuznaya Str., Moscow 117997, Russia

*vladimirgonch@mail.ru

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

78 Vernadsky Prospekt, Moscow 119454, Russia

Abstract

This article solves a problem related to the monitoring fast-evolving events in certain locations of the territory, which must be controlled at the right time (sometimes it is necessary to control several locations simultaneously) using unmanned aerial vehicles (UAVs). First of all, an essential feature of this task is that almost all client land-based facilities should be observed within the schedule set in accordance with the competition schedule. The exception is “non-sports profile” objects: passenger delivery routes, parking lots, recreational facilities, etc., they need to be periodically monitored to ensure the safety of participants and spectators. Another feature of our task is the fact that in the course of monitoring sports episodes can change their importance significantly. This requires an adaptive correction of the service duration depending on the opinion of the UAV group control operator, taking into account the audience’s interests. To solve this problem, we propose an algorithm for pre-flight route planning for servicing competitions by a group of unmanned aerial vehicles and a high-speed algorithm for operational planning of monitoring competitions, with the mandatory observance of the service schedule. To increase the efficiency of preflight routing of a group flight, it is proposed to use a genetic algorithm. Research has shown that route options obtained as the initial “elite” are crossed and mutated, and after a few evolutionary steps, the formed route group is approximately 15–20% more efficient than the initial elite. When choosing the composition of serviced sporting events using UAVs, it is proposed to use the multiplicative criterion for assigning their dynamic priorities, taking into account the importance of sports episodes and the timeliness of services.

Keywords: group of unmanned aerial vehicles; service schedule; dynamic priority assignment.

Funding: This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research as a part of the scientific project № 16-29-04326 офи_м “Integration Methods and Interconnected Bio-Inspired Models of Mixed Robotic Groupings and Control of the Interaction of Pertinent Information Flows to Form a Virtual Semantic Environment”.

For citation: Goncharenko V.I., Lebedev G.N., Mikhaylin D.A., Nechaev V.V. Mapping out a plan for filming numerous sports events taking place over a vast territory using a group of unmanned aerial. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2019; 15(3):672-681. DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.672-681



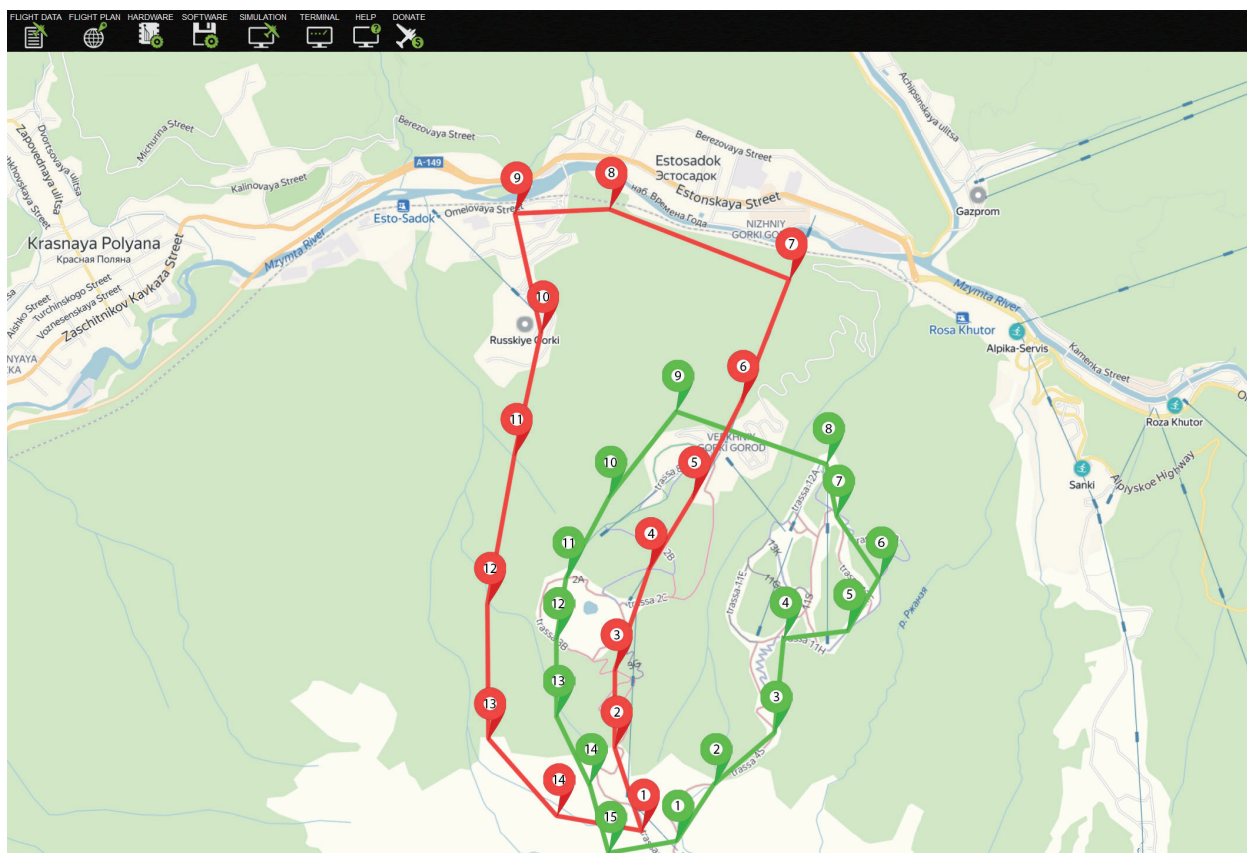
Введение

В последнее время в мире и в России беспилотные летательные аппараты (БЛА) применяются в различных областях. Поэтому особую актуальность приобретают теоретические и прикладные работы в области интеллектуальных систем, включая методы, алгоритмы, языки, модели и инструменты, лежащие в основе построения экспертных систем, систем принятия решений, управления поведением робототехнических систем и комплексов [1]. Существует множество задач наблюдения быстроразвивающихся событий на отдельных участках территории, которые необходимо контролировать в нужное время (в том числе и одновременно) с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [2-5]. К их числу относится задача видеосъемки многочисленных соревнований, проводимых одновременно на одной территории (например, зимняя или летняя олимпиада, студенческая Универсиада и т.д.). В каче-

стве примера рассмотрена схема спортивных объектов в Красной Поляне, где могут проводиться одновременно несколько видов соревнований. На рис. 1 представлена схема движения двух БЛА при съемке заданных спортивных объектов.

Существенной особенностью данной задачи является, прежде всего, то, что практически все обслуживаемые наземные объекты должны наблюдаться при соблюдении определенного графика в соответствии с известным расписанием соревнований. Исключения представляют объекты «неспортивного профиля» - трассы доставки пассажиров, стоянки транспорта, места отдыха и т.д., которые нужно периодически контролировать для обеспечения безопасности участников и зрителей.

Предполагается, что из общего числа спортивных эпизодов выделены те, которые будут сниматься стационарными телевизионными камерами.



Р и с. 1. Схема движения двух БЛА при съемке спортивных объектов в Красной Поляне
F i g. 1. The movement pattern of two UAVs when shooting sports facilities in Krasnaya Polyana

Кроме того, необходимо отметить, что в ходе наблюдения возможно существенное изменение важности наблюдаемых спортивных эпизодов в динамической обстановке, что требует адаптивной коррекции длительности обслуживания в зависимости от мнения оператора управления группой БЛА с учетом интересов зрителей. Под *динамической обстановкой* понимается возможность прогнозирования движения каждого мобильного объекта в точку встречи с обслуживающим его БЛА, что позволяет осуществить экстраполяцию движения каждого МО

для определения координат точки встречи при сближении.

В этих условиях необходимо, во-первых, заранее определить достаточное число БЛА для одновременного наблюдения большого числа соревнований, затем решить задачу очередного распределения группы БЛА между наземными объектами в разное время дня и, наконец, сформировать алгоритм определения допустимой длительности обслуживания каждого спортивного эпизода с учетом их меняющихся важностей при следующей постановке задачи.



Постановка задачи

Дано:

- общее число n обслуживаемых объектов, состоящее из трех классов: 1) неподвижные пункты (НП) с заданными важностями спортивных мероприятий b и координатами местоположения; 2) объекты наблюдения (ОН) спортивных эпизодов с заданным графиком их своевременного обслуживания; 3) мобильные объекты (МО) проведения соревнований на обширной территории, число M которых невелико, но их важность максимальна, а график обслуживания не задан и требуется его определить путем прогнозирования движения МО при известных скоростях и курсах;
- для каждого БЛА в наземном пункте управления (НПУ) известны текущие координаты полета. Также считается, что возможна ротация или замена БЛА, вышедших из строя с учетом отказов техники;
- критерием эффективности планирования действий группы БЛА является максимум отношения суммарной полученной важности обслуживаемых объектов к минимизируемым затратам:

$$J_0 = \max \sum b_j / C_1 + C_2 \quad (1)$$

где $C_1 = K_1 * n * P$ – стоимость вышедших из строя БЛА, P – вероятность потери одного БЛА, C_2 – эксплуатационные затраты группового полета.

Требуется:

1. Разработать алгоритм предполетного планирования маршрутов обслуживания соревнований группой БЛА;
2. Разработать быстродействующий алгоритм оперативного планирования наблюдения соревнований с обязательным учетом соблюдения графика обслуживания, а если его нет – с прогнозом точки встречи МО и БЛА, а также с учетом потерь живучести БЛА;
3. Представить на экране результаты планирования в динамическом режиме в требуемом масштабе времени для повышения наглядности для лица, принимающего решение.

Алгоритм предполетного планирования

Алгоритм предполетного планирования разработан для выполнения следующих операций:

- предварительного определения нужного числа БЛА;
- формирования маршрутов перелета каждого БЛА к различным местам проведения соревнований;
- назначения графика перелетов БЛА в течение суток.

Реализация алгоритма включает выполнение трех основных этапов. **На первом этапе** при выборе нужного числа N БЛА необходимо использовать исходное расписание динамических событий и ожидаемых спортивных эпизодов, представленное в виде табл. 1, 2

Таблица 1. График мобильных действий наших спортсменов на трассе
Table 1. Timetable for mobile actions of our athletes on the track

i	11	13	20
t_i	1,5	2,2	4,0
x_i	30	45	60
z_i	0	30	60
ψ	60	60	60
V_i	70	22	22

Таблица 2. График мобильных действий соперников на трассе
Table 2. Timetable for mobile actions of rivals on the track

i	4	16
t_i	0,3	0,4
x_i	20	60
z_i	55	40
ψ	-80	-80
V_i	20	20

Таблица 3. График награждения победителей в указанном месте
Table 3. Timetable for awarding the winners in the specified place

i	4	5	6	10	13
t_i	0,3	0,4	0,75	1,6	2,2

С помощью этих графиков формируется общий график обслуживания всех мероприятий, который затем анализируется на достижимость его соблюдения с помощью нужного числа БЛА – сначала пробуются использовать один БЛА, если не удастся – два БЛА и т.д. [6].

При этом нужно учесть, что зачастую ряд спортивных мероприятий в течение суток происходит фактически одновременно (это самый тяжелый режим). В других случаях – последовательно, но на таких расстояниях друг от друга, что своевременный перелет БЛА с одного места на другое неосуществим.

В итоге разработанный специальный алгоритм определяет режим работы каждого БЛА в отдельности, как показано ниже табл.4 и 5. В качестве примера рассмотрены действия двух БЛА (БЛА 1 и БЛА 2) при съемке спортивных соревнований.

Таблица 4. График действий БЛА 1

Table 4. Timetable for UAV 1 actions

i	1	4	5	6	11	16
t_i	0	0,3	0,4	0,55	1,3	3,0
x_i	20	20	30	60	60	60
z_i	25	55	55	55	0	60
ψ	90	0	0	0	45	45
V_i	100	100	180	200	60	60

Таблица 5. График действий БЛА 2

Table 5. Timetable for UAV 2 actions

i	10	13	15	17	19	20
t_i	1,6	2,2	2,7	3,1	3,6	4,0
x_i	90	20	80	85	85	50
z_i	15	40	0	40	55	70
ψ	160	-35	85	90	160	160
V_i	170	200	125	80	50	50

На втором этапе решается задача маршрутизации полета каждого БЛА, которая облегчается тем, что фактически подавляющее большинство наземных объектов требует соблюдения заданного графика. Вместе с тем, для выбора очередного наземного объекта предлагается вместо «жадного» алгоритма использовать мультипликативный критерий [7]:

$$J_3 = \max_i \left[\left(\frac{1}{\Delta t_i} + m_1 \right) (b_i + m_2) \left(\frac{1}{\min_j r_{ij}} + m_3 \right) \right] \quad (2)$$

где b_j – переменная важность каждого объекта, растущая при длительном его наблюдении и быстро уменьшающаяся при самом наблюдении из-за снижения к нему интереса; r_{ij} – расстояние от i -го объекта до j -го БЛА;
 $\Delta t_j = |t_j - t| + \delta$ – модуль разности между требуемым моментом t_j начала обслуживания согласно заданному графику и текущим временем t ;

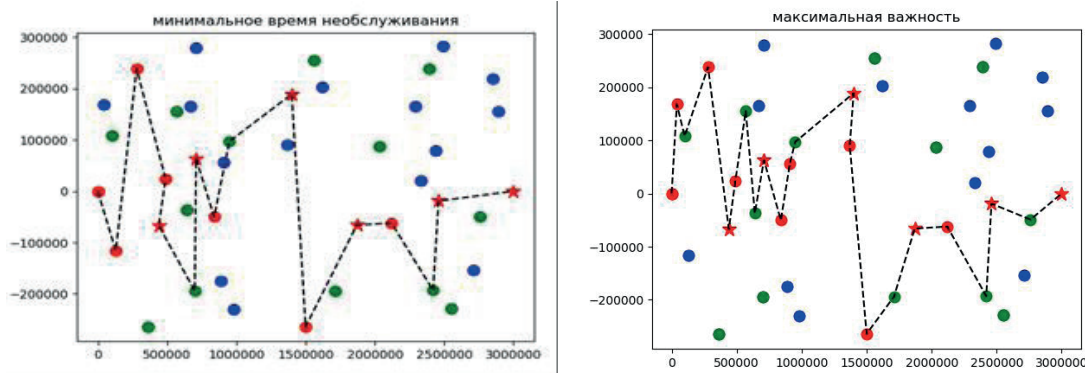


m_1, m_2, m_3 - масштабные коэффициенты, устанавливающие неодинаковую важность сомножителей критерия J_i (если m_k мало, то остальные сомножители имеют пониженную значимость. Например, при $m_1 = m_2 = 0.2$ первые два сомножителя наиболее важные, $m_3 = 0.8$ - третий сомножитель имеет наименьшую значимость) и соответствует использованию только «жадного» алгоритма [8, С. 189-195].

В итоге для вычисления динамического приоритета нуж-

но назначить для каждого объекта координаты его местоположения (как и текущие координаты всех БЛА), его важность и время наблюдения и обслуживания по заданному графику

В результате использования разработанного алгоритма формируются маршруты с помощью либо общего критерия (2), либо частных двухпараметрических критериев, для которых либо важна своевременность, либо - важность и т.д. Примеры полученных маршрутов представлены на рис. 2.



Р и с. 2. Пример формирования маршрутов полета одного БЛА с помощью двух частных двухпараметрических критериев

Fig. 2. An example of constructing flight routes for one UAV using two two-parameter subtests

Для повышения эффективности предполетной маршрутизации группового полета целесообразно использовать генетический алгоритм [9-25]. Как показали исследования, полученные в качестве первоначальной «элиты» варианты маршрутов подвергаются скрещиванию и мутации, и через малое число шагов эволюции сформированная группа маршрутов оказывается эффективнее первоначальной элиты примерно на 15-20%.

На третьем этапе формируется последняя характеристика - это расписание полета каждого БЛА в течение суток. Трудность этого этапа состоит в том, что значимость каждого спортивного эпизода заранее непредсказуема и может быть уточнена в ходе самого полета с помощью оператора БЛА, учитывающего возрастание или падение интереса зрителей к происходящим событиям. Поэтому для уточнения всех необходимых планируемых параметров сформированный план наблюдения и график полетов всех БЛА целесообразно отобразить на экране компьютера до полета, чтобы внести нужные коррективы и убедиться в ожидаемой полноте охвата всех спортивных мероприятий. Для наглядного отображения разработан специальный программный комплекс планирования действий группы БЛА.

Алгоритм оперативного планирования

Данный алгоритм наряду с предполетным планированием необходим в случаях, когда требуется вне плана увеличить продолжительность наблюдения наиболее интересных спортивных эпизодов, а также при отмене некоторых спортивных мероприятий, например, из-за неблагоприятных погодных условий. Кроме того, возможны потери работоспособности некоторых БЛА из-за технических отказов и при их ротации, необходимой дозаправки БЛА.

Алгоритм оперативного планирования имеет три особенности:

- на каждом шаге планирования от обслуживания освобождается один БЛА, а остальные заняты и в планировании не нуждаются;
- исходные данные о местоположении и графиках обслуживания объектов имеют существенную неопределенность, в том числе с учетом непредвиденных потерь работоспособности БЛА;
- длительность самого обслуживания очередного объекта может быть различна и должна корректироваться в полете с учетом отставания и опережения графика и других факторов.

В ходе исследований разработан алгоритм оперативного планирования, который содержит три основные операции. **В первой операции** осуществляется выбор первоочередных необслуженных объектов по мультипликативному критерию (1), который лучше известных за счет исключения «узких мест» планируемых действий и содержит три сомножителя: важность, удаленность объекта съемки от БЛА и своевременность обслуживания. Соответственно алгоритм планирования по-разному анализирует приоритет объектов по трем вариантам - 1) для неподвижных пунктов, не имеющих графика обслуживания, 2) для спортивных мероприятий согласно заданному графику, но с известным местом проведения, 3) для соревнований, когда спортсмены перемещаются по заданным трассам, но место их пребывания необходимо спрогнозировать.

При этом в каждом блоке выполняемых операций предпринимаются следующие более конкретные меры повышения эффективности алгоритма:

1. Близость НП к освободившемуся БЛА определяется расстоянием между ними, а к занятым БЛА - сумме расстояний от него до обслуживаемого объекта, и от него - до планируемого нового объекта.
2. Для объектов с заданным графиком обслуживания ис-



пользуется увеличенная высота наблюдения с учетом неопределенности как места, так и времени наблюдения.

3. Для МО точка встречи объекта с БЛА прогнозируется методом пропорциональной навигации с направлением сближения, совпадающим с заданной трассой МО.

Во второй операции сформированный список ранжируется по другому критерию, учитывающему важность и удаленность группы БЛА. Для этого рассмотрен пример случай оперативного планирования съемки спортивных объектов при одинаковой важности таких объектов. Если начать выбор с БЛА с наиболее удаленного по критерию (3) объекта, то общий путь почти в 2 раза меньше. При этом критерием ранжирования является условие:

$$P_2 = \max_j \left[b_j \sum_{i=1}^N r_{ij} \right] \quad (3)$$

В третьей операции распределения БЛА между объектами выбирается объект с максимальным рангом, и для неё решается задача назначения «своего» БЛА по третьему критерию максимальной близости:

$$P_3 = \min_i [r_{ij}]. \quad (4)$$

Рассмотренный пример и другие условия решаемых задач позволяют сделать следующие выводы:

- установлено, что выполнение оперативного планирования в виде нескольких простых операций обеспечивает максимальное быстродействие расчетов практически в реальном времени;
- разработанная процедура автоматического прогноза точки встречи БЛА с МО с незадаанным графиком позволяет планировать их обслуживание наряду с другими объектами.

Заключение

1. При выборе состава обслуживаемых спортивных мероприятий с помощью БЛА предложено использовать мультипликативный критерий назначения их динамических приоритетов с учетом важности спортивных эпизодов и своевременности их обслуживания.

2. Установлено, что минимальное время оперативного планирования удается обеспечить при последовательном выполнении трех простых операций – выбора состава объектов, их дополнительного ранжирования и поочередного их наблюдения согласно заданному графику распределения между БЛА согласно их рангу.

3. При оперативном планировании маршрутов группового полета БЛА в случае выхода из строя части из них предложено использовать заранее сформированные запасные планы, которые должны быть в бортовой памяти всех БЛА.

Список использованных источников

- [1] *Веремей Е. И.* Когнитивная реализация оптимизационного подхода к синтезу законов управления подвижными объектами // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2016. Т. 12, № 1. С. 98-107. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27539223> (дата обращения: 04.07.2019).
- [2] *Иноземцев Д. П.* Беспилотные летательные аппараты: Теория и практика // *Автоматизированные технологии изысканий и проектирования*. 2013. № 2(49).
- [3] «Нам сверху видно все». Отчет PwC о коммерческом применении беспилотных летательных аппаратов в мире. ООО «ПрайсвотерхаусКуперс Консультирование», 2016. 38 с. URL: http://rb.ru/media/reports/drone-technology-survey-2016_rus.pdf (дата обращения: 04.07.2019).
- [4] *Ananev A. V., Goncharenko V. I.* Scenario planning of activities of the group of aeronautical robotic engineering complexes in cooperative environments // 2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). Moscow, 2017. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109591
- [5] *Гончаренко В. И., Рожнов А. В., Теплов Г. И.* Планирование и координация маршрутов полёта беспилотных авиационных систем в интересах организации и оценки качества систем подвижной связи // *Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2018): материалы XXI Международной научной конференции / Под ред. В. М. Вишневого, К. Е. Самуйлова. М.: РУДН, 2018. С. 220-229. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36626363> (дата обращения: 04.07.2019).*
- [6] *Гончаренко В. И., Лебедев Г. Н., Михайлин Д. А.* Автоматизированная система оперативного планирования групповых действий беспилотников при заданном графике обслуживания мобильных наземных объектов // *Труды 1-й Всероссийской научно-практической конференции «Беспилотная авиация: состояние и перспективы развития» (Воронеж, 2019). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. С. 39-45.*
- [7] *Лебедев Г. Н., Гончаренко В. И., Царева О. Ю., Михайлин Д. А.* Выбор множества приоритетных наземных объектов наблюдения с помощью беспилотных летательных аппаратов и маршрутизация их полета // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2019. № 2(176). С. 3-12. DOI: 10.14489/vkit.2019.02.pp.003-012
- [8] *Левитин А. В.* Алгоритмы: введение в разработку и анализ. Жадные методы: Алгоритм Дейкстры. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 576 с.
- [9] *Лебедев Г. Н., Малыгин В. Б., Михайлин Д. А.* Постановка и решение задачи оперативной коррекции потоков прилета и вылета воздушных судов в районе аэродрома с помощью генетического алгоритма // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2017. Т. 20, № 4. С. 8-17. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-8-17
- [10] *Аллилуева Н. В., Руденко Э. М.* Математический метод расчета целевой функции на графах и решение задачи маршрутизации // *Труды МАИ*. 2017. № 96. С. 9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30744421> (дата обращения: 04.07.2019).
- [11] *Mahmoudzadeh S., Powers D., Sammut K., Lammas A., Yazdani A. M.* Optimal route planning with prioritized task scheduling for AUV missions // 2015 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS). Langkawi, 2015. Pp. 7-14. DOI: 10.1109/IRIS.2015.7451578



- [12] *Darrach M. A., Niland W. M., Stolarik B. M.* Increasing UAV Task Assignment Performance through Parallelized Genetic Algorithms // AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit, 07 May 2007 - 10 May 2007. Rohnert Park, California, 2007. Pp. 1-10. DOI: 10.2514/6.2007-2815
- [13] *Wang F., Man Y., Man L.* Intelligent optimization approach for the k shortest paths problem based on genetic algorithm // 2014 10th International Conference on Natural Computation (ICNC). Xiamen, 2014. Pp. 219-224. DOI: 10.1109/ICNC.2014.6975838
- [14] *Wagner M., Neumann F.* Single- and multi-objective genetic programming: New runtime results for sorting // 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Beijing, 2014. Pp. 125-132. DOI: 10.1109/CEC.2014.6900310
- [15] *Kim J. W., Kim S. K.* Fitness Switching Genetic Algorithm for Solving Combinatorial Optimization Problems with Rare Feasible Solutions // The Journal of Supercomputing. 2016. Vol. 72, Issue 9. Pp. 3549-3571.
- [16] *Кульчак А. М., Лебедев Г. Н., Сельвесюк Н. И.* Бортовая экспертная система контроля безопасности захода на посадку воздушных судов с учетом отказов бортового оборудования // Моделирование авиационных систем: Сборник тезисов докладов. М.: ГосНИИАС, 2018. С. 296-297. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36819795> (дата обращения: 04.07.2019).
- [17] *Limmer M., Lensch H. P. A.* Infrared Colorization Using Deep Convolutional Neural Networks // 2016 15th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). Anaheim, CA, 2016. Pp. 61-68. DOI: 10.1109/ICMLA.2016.0019
- [18] *Abrosimov V., Ryvkin S., Goncharenko V., Rozhnov A., Lobanov I.* Identikit of modifiable vehicles at Virtual Semantic Environment // 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP). Brasov, 2017. Pp. 905-910. DOI: 10.1109/OPTIM.2017.7975085
- [19] *Abrosimov V., Goncharenko V.* Photofit of Perspective Vehicles: Shape's Synthesis and Flight Parameters Evaluation // Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE'17). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2017. Pp. 259-263. DOI: 10.1145/3057039.3057093
- [20] *Нечаев В. В., Гончаренко В. И.* Оперативное решение краевых и оптимизационных задач баллистического проектирования летательных аппаратов на основе когнитивной графики // CEUR Workshop Proceedings. Сборник избранных трудов II Международной научной конференции «Конвергентные когнитивно-информационные технологии» (Convergent'2017), Москва, Россия, 24-26 ноября 2017 / Под ред. В.А. Сухомлина, Е.В. Зубаревой, М.А. Шнепс-Шнеппе. Москва, МГУ, 2017. Т. 2064. С. 341-349. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2064/paper40.pdf> (дата обращения: 04.07.2019).
- [21] *Lebedev G., Goncharenko V., Mikhaylin D., Rumakina A.* Aircraft Group Coordinated Flight Route Optimization Using Branch-and-Bound Procedure in Resolving the Problem of Environmental Monitoring // ITM Web of Conferences. 2017. Vol. 10. Pp. 01003. DOI: 10.1051/itmconf/20171001003
- [22] *Волков А. Г., Нечаев В. В., Гончаренко В. И., Лобанов И. А.* Модели и алгоритмы прогнозирования технического состояния космического аппарата на основе информационных технологий // CEUR Workshop Proceedings. Сборник избранных трудов II Международной научной конференции «Конвергентные когнитивно-информационные технологии» (Convergent'2017), Москва, Россия, 24-26 ноября 2017 / Под ред. В.А. Сухомлина, Е.В. Зубаревой, М.А. Шнепс-Шнеппе. Москва, МГУ, 2017. Т. 2064. С. 245-254. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2064/paper29.pdf> (дата обращения: 04.07.2019).
- [23] *Goncharenko V. I., Lebedev, G. N., Mikhailin D. A., Khakhulin G. F.* Continuous Flight Safety Management Information System for a Group of Converging Aircraft // Russian Aeronautics. 2018. Vol. 61, Issue 2. Pp. 271-278. DOI: 10.3103/S1068799818020174
- [24] *Goncharenko V. I., Lebedev G. N., Mikhailin D. A.* Online Two-Dimensional Route Planning for a Group of Unmanned Aerial Vehicles // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019. Vol. 58, Issue 1. Pp. 147-158. DOI: 10.1134/S1064230719010076
- [25] *Knyaz V., Zheltov S., Lebedev G., Mikhailin D., Goncharenko V.* Intelligent mobile object monitoring by unmanned aerial vehicles // IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies. Novi Sad, Serbia, 2019. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/EUROCON.2019.8861575

Поступила 04.07.2019; принята к публикации 24.08.2019;
опубликована онлайн 30.09.2019.

Об авторах:

Гончаренко Владимир Иванович, директор Военного института, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4); ведущий научный сотрудник лаборатории Системной интеграции средств управления, Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН (117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65), доктор технических наук, доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1667-1197>, vladimirgonch@mail.ru

Лебедев Георгий Николаевич, профессор кафедры 301 «Системы автоматического и интеллектуального управления», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1385-0181>, kaf301@mail.ru

Михайлин Денис Александрович, доцент кафедры 301 «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8822-9138>, tau_301@mail.ru

Нечаев Валентин Викторович, профессор кафедры интеллектуальных технологий и систем, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр. Вернадского, д. 78), доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7171-3874>, nechaev@mirea.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



References

- [1] Veremey E.I. Cognitive Implementation of Optimization Approach to the Control System Design for Moving Objects. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2016; 12(1):98-107. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27539223> (accessed 04.07.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [2] Inozemtsev D.P. Unmanned aerial vehicles: Theory and practice. *Automated technology for research and design*. 2013; 2(49). (In Russ.)
- [3] "We can see everything from above". PwC Report on the Commercial Use of Unmanned Aerial Vehicles in the World. PricewaterhouseCoopers, 2016. Available at: http://rb.ru/media/reports/drone-technology-survey-2016_rus.pdf (accessed 04.07.2019). (In Russ.)
- [4] Ananov A.V., Goncharenko V.I. Scenario planning of activities of the group of aeronautical robotic engineering complexes in cooperative environments. In: *2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*, Moscow, 2017, pp. 1-5. (In Eng.) DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109591
- [5] Goncharenko V.I., Rozhnov A.V., Teplov G.I. Planning and coordination of flight routes of unmanned aerial systems in the interests of organizing and evaluating the quality of mobile communication systems. In: Vishnevsky V.M., Samouylov K.E. (ed.) *Distributed computer and communication networks: control, computation, communications (DCCN-2018)*, RUDN, Moscow, 2018, pp. 220-229. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36626363> (accessed 04.07.2019). (In Russ.)
- [6] Goncharenko V.I., Lebedev G.N., Mikhaylin D.A. Automated system for operational planning of group actions of drones with a given schedule for servicing mobile ground objects. In: *Proceedings of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference "Unmanned Aviation: Status and Development Prospects"*, VUNC VVS, Voronezh, 2019, pp. 39-45. (In Russ.)
- [7] Lebedev G.N., Goncharenko V.I., Tsareva O.Yu., Mikhaylin D.A. Choosing a Variety of Priority Surface Observation Objects with the Help of Unmanned Aerial Vehicles and Routing their Flight. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of computer and information technologies*. 2019; 2(176):3-12. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.14489/vkit.2019.02.pp.003-012
- [8] Levitin A. Introduction to the Design and Analysis of Algorithm. 3rd ed. Pearson Education, 2012. (In Eng.)
- [9] Lebedev G.N., Malygin V.B., Mikhaylin D.A. Problem Setting and Solution of the Response Correction of Arrival and Departure Air Traffic Flow in the Vicinity of the Field by Means of the Genetic Algorithm. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA = Aviation High Technologies*. 2017; 20(4):8-17. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-8-17
- [10] Alliluyeva N., Rudenko E. Mathematical method of objective function calculation and routing problems solving. *Trudy MAI*. 2017; 96:9. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30744421> (accessed 04.07.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [11] Mahmoudzadeh S., Powers D., Sammut K., Lammas A., Yazdani A.M. Optimal route planning with prioritized task scheduling for AUV missions. In: *2015 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)*, Langkawi, 2015, pp. 7-14. (In Eng.) DOI: 10.1109/IRIS.2015.7451578
- [12] Darrah M.A., Niland W.M., Stolarik B.M. Increasing UAV Task Assignment Performance through Parallelized Genetic Algorithms. In: *AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit*, 07 May 2007 - 10 May 2007, Rohnert Park, California, 2007, pp. 1-10. (In Eng.) DOI: 10.2514/6.2007-2815
- [13] Wang F., Man Y., Man L. Intelligent optimization approach for the k shortest paths problem based on genetic algorithm. In: *2014 10th International Conference on Natural Computation (ICNC)*, Xiamen, 2014, pp. 219-224. (In Eng.) DOI: 10.1109/ICNC.2014.6975838
- [14] Wagner M., Neumann F. Single- and multi-objective genetic programming: New runtime results for sorting. In: *2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Beijing, 2014, pp. 125-132. (In Eng.) DOI: 10.1109/CEC.2014.6900310
- [15] Kim J.W., Kim S.K. Fitness Switching Genetic Algorithm for Solving Combinatorial Optimization Problems with Rare Feasible Solutions. *The Journal of Supercomputing*. 2016; 72(9):3549-3571. (In Eng.)
- [16] Kulchak A.M., Lebedev G.N., Selvesyuk N.I. On-board expert system for monitoring the safety of aircraft approach taking into account failures of on-board equipment. In: *Modeling of aircraft systems: Proceedings*. GosNIIAS, Moscow, 2018, pp. 296-297. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36819795> (accessed 04.07.2019). (In Russ.)
- [17] Limmer M., Lensch H.P.A. Infrared Colorization Using Deep Convolutional Neural Networks. In: *2016 15th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, Anaheim, CA, 2016, pp. 61-68. (In Eng.) DOI: 10.1109/ICMLA.2016.0019
- [18] Abrosimov V., Ryvkin S., Goncharenko V., Rozhnov A., Lobanov I. Identikit of modifiable vehicles at Virtual Semantic Environment. In: *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, Brasov, 2017, pp. 905-910. (In Eng.) DOI: 10.1109/OPTIM.2017.7975085
- [19] Abrosimov V., Goncharenko V. Photofit of Perspective Vehicles: Shape's Synthesis and Flight Parameters Evaluation. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE'17)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2017, pp. 259-263. (In Eng.) DOI: 10.1145/3057039.3057093
- [20] Nechaev V.V., Goncharenko V.I. Operational solution of boundary and optimization problems of the ballistic desing of flying apparatus based on the cognitive graphics. In: *Proceedings of the II International scientific conference "Convergent cognitive information technologies" (Convergent'2017)*, Moscow, Russia, November 24-26, 2017. *CEUR Workshop Proceedings*. 2017; 2064:341-349. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2064/paper40.pdf> (accessed 04.07.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [21] Lebedev G., Goncharenko V., Mikhaylin D., Rumakina A. Aircraft Group Coordinated Flight Route Optimization Using



- Branch-and-Bound Procedure in Resolving the Problem of Environmental Monitoring. *ITM Web of Conferences*. 2017; 10:01003. (In Eng.) DOI: 10.1051/itmconf/20171001003
- [22] Volkov A.G., Nechaev V.V., Goncharenko V.I., Lobanov I.A. Models and algorithms for a spacecrafts technical state prediction based on information technologies. In: *Proceedings of the II International scientific conference "Convergent cognitive information technologies" (Convergent'2017), Moscow, Russia, November 24-26, 2017. CEUR Workshop Proceedings*. 2017; 2064:245-254. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2064/paper29.pdf> (accessed 04.07.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [23] Goncharenko V.I., Lebedev G.N., Mikhailin D.A., Khakhulin G. F. Continuous Flight Safety Management Information System for a Group of Converging Aircraft. *Russian Aeronautics*. 2018; 61(2):271-278. (In Eng.) DOI: 10.3103/S1068799818020174
- [24] Goncharenko V.I., Lebedev G.N., Mikhailin D.A. Online Two-Dimensional Route Planning for a Group of Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2019; 58(1):147-158. (In Eng.) DOI: 10.1134/S1064230719010076
- [25] Knyaz V., Zheltov S., Lebedev G., Mikhailin D., Goncharenko V. Intelligent mobile object monitoring by unmanned aerial vehicles. In: *IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies*, Novi Sad, Serbia, 2019, pp. 1-6. (In Eng.) DOI: 10.1109/EUROCON.2019.8861575

Submitted 04.07.2019; revised 24.08.2019; published online 30.09.2019.

About the authors:

Vladimir I. Goncharenko, Director of the Military Institute, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia); Leading Researcher of the Laboratory of System Integration of the Control Means, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (65 Profsoyuznaya Str., Moscow 117997, Russia), Dr.Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1667-1197>, vladimirgonch@mail.ru

Georgy N. Lebedev, Professor of the Department "Automatic and Intelligent Control Systems" (No. 301), Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia), Dr.Sci. (Engineering), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1385-0181>, kaf301@mai.ru

Denis A. Mikhaylin, Associate Professor of the Department "Automatic and Intelligent Control Systems" (No. 301), Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8822-9138>, tau_301@mail.ru

Valentin V. Nechaev, Professor of the Department of Intelligent Technologies and Systems, MIREA – Russian Technological University (78 Vernadsky Prospekt, Moscow 119454, Russia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7171-3874>, nechaev@mirea.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

