

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

УДК 629.7.067

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-67-77

**ПОСТАНОВКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ
И ПЛАНИРОВАНИЯ ГРАФИКОВ ПОЛЕТА ПИЛОТИРУЕМОЙ
И БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИИ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ
И ПОДХОД К ЕЕ РЕШЕНИЮ С ПОМОЩЬЮ
ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

Г.Н. ЛЕБЕДЕВ¹, В.Б. МАЛЫГИН², Д.А. МИХАЙЛИН^{1,3}, ТАН БЯО¹

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия*

²*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

³*Главный научно-исследовательский испытательный центр робототехники
Министерства обороны Российской Федерации,
г. Москва, Россия*

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ,
гранты № 17-29-03185, № 16-08-00070

В работе ставится многокритериальная задача маршрутизации и планирования графиков полета беспилотной и пилотируемой гражданской авиации с использованием метода штрафных функций. Показана актуальность решаемой задачи для управления авиакомпанией в условиях существующих изменений динамической обстановки при большом разнообразии полетных ситуаций. Сформулирована математическая постановка задачи и предложен универсальный критерий оптимальности в виде суммы аддитивной и мультипликативной форм, включающих частные показатели качества. Поиск оптимальных и рациональных вариантов решения задачи оптимальной маршрутизации полетов с учетом имеющихся у компании ресурсов самолетного парка, предложений пользователей воздушного пространства, ограничений постоянного и переменного характера, связанных, к примеру, с неблагоприятными погодными условиями, может осуществляться с помощью однокритериального и многокритериального подхода, но в итоге предлагается использовать генетический алгоритм, обладающий невысокой трудоемкостью вычислений и предлагающий в качестве решений («предков») близкий к оптимальному и рациональному результат. При таком подходе в начале работы алгоритма образуется «элита», что позволяет затем на каждом шаге итерации (эволюции) выполнить операцию скрещивания. В итоге получаем новых «потомков», а путем перестановки хотя бы одного пункта из одного блока в соседний можно получить достаточно большое число представителей, из которых затем с помощью критерия может быть отобрана новая «элита». Практика использования генетических алгоритмов показала, что наряду с достижением с его помощью глобального экстремума процесс существенного улучшения результатов планирования достигается за несколько шагов эволюции, и их число явно меньше, чем число шагов при использовании численных методов параметрической оптимизации. Предлагаемый подход позволит значительно повысить эффективность и качество планирования выполнения полетов авиакомпании с учетом разнообразия самолетного парка, коммерческой загрузки и влияния внешней среды. Особую актуальность данная задача приобретает в условиях совместного управления (CDM), где в качестве дополнительных критериев могут рассматриваться аэронавигационные данные.

Ключевые слова: штрафные функции, оптимальное управление, воздушные суда, генетический алгоритм, совместное управление (CDM).

**ОБЩИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЛЕТОВ**

При внезапных и прогнозируемых изменениях динамической обстановки, возникающей в пилотируемой и беспилотной авиации, необходимо заново как перепланировать маршруты и расписание полетов между заданными пунктами, так и выбрать для каждого рейса тип лета-

тельного аппарата с учетом ряда важных факторов [1]. К числу этих факторов прежде всего относятся планируемая длительность полетов, определяющая потребные расходы топлива, необходимость соблюдения графика обслуживаемых пунктов и их относительную значимость или важность, которая является для каждого пункта переменной по ряду рассмотренных ниже причин. Особую значимость данная задача приобретает при совместном управлении CDM [1, 9], где от принятого авиакомпанией решения зависит качество деятельности других авиационных служб, в частности аэронавигационных.

В пилотируемой авиации выбранные маршруты включают, как правило, конечное число пунктов назначения или прилета-вылета, чтобы, во-первых, общее время выполнения одного рейса не превышало одних суток, во-вторых, выбранная последовательность обслуживаемых пунктов удовлетворяла критерию минимума суммарной длительности полета при обслуживании каждого пункта один раз с целью минимизации расхода топлива. В-третьих, графики вылета-прилета обычно составляются в зависимости от коммерческого спроса. В свою очередь, пассажирские рейсы считаются наиболее важными, т. к. задержки этих рейсов ведут к дополнительным расходам по организации ожидания.

Таким образом, в обычном режиме работы расписание прилета-вылета и работы аэропортов в целом практически неизменно. От эффективности функционирования системы управления воздушным движением в значительной степени зависят безопасность полетов и экономические показатели работы авиакомпаний. Однако при изменении обстановки могут быть ситуации, когда организация воздушного движения должна быть перепланирована. К числу таких в гражданской авиации, в частности, относятся следующие ситуации:

- различные сезоны календарного года, а также в праздничные дни, когда спрос пассажирами на ряд рейсов пассажирской авиации существенно меняется и поддается прогнозированию;

- сами некоторые крупные события в стране и за рубежом прогнозируются (например, предстоящий чемпионат мира по футболу), но количественные оценки этого прогноза имеют неудовлетворительную точность, что в принципе требует режима оперативного перепланирования работы;

- наиболее частой причиной отмены штатного режима работы является нелетная погода в ряде регионов, что также требует оперативного вмешательства. В легкой транспортной, в том числе почтовой, авиации на местных авиалиниях потребности могут меняться гораздо чаще, а при обслуживании мобильных наземных объектов (геологические партии, экспедиции и т. д.) меняются как состав обслуживаемых объектов и их важности, так и сами маршруты перелетов, а также тип летательного аппарата, например, вертолет);

- спрос пассажиров на отдельные рейсы может неожиданно упасть или возрасти, и поэтому необходимо определить подходящий тип воздушного судна (вместо широкофюзеляжного тяжелого самолета использовать другой тип с подходящей дальностью или наоборот).

Для беспилотной авиации наиболее характерны следующие случаи:

- число обслуживаемых пунктов и их состав меняется обычно в каждом вылете по запросам потребителя;

- динамика изменения поведения обслуживаемых пунктов настолько высока, что их важность быстро возрастает по мере задержки в их обслуживании, и поэтому в зависимости от ситуации сильно меняется число самих вылетов;

- удобство обслуживания самих наземных пунктов (например, их обнаружения и наблюдения бортовыми техническими средствами) зависит от освещенности, известного времени их активного поведения, погодных метеоусловий, скоростей движения наблюдаемых мобильных наземных объектов и других исходных данных. Поэтому график их наиболее удобного или наиболее эффективного обслуживания становится одним из важнейших факторов планирования полетов беспилотников, «попадающих в нужном месте в нужное время» [3].

Таким образом, общим условием возрастающей сложности планирования работы пилотируемой и беспилотной авиации является существование динамической обстановки, когда в каждой конкретной ситуации нужно принять многокритериальное решение, учитывающее ряд перечисленных выше факторов и требующее новых подходов к получению оптимального результата.

Целесообразность совместного рассмотрения задач оптимального планирования полетов гражданской и беспилотной авиации обусловлена не только пользой взаимопроникновения известных в своих областях методов, но и их ближайшим совместным использованием аэродромов и окружающего воздушного пространства. Также есть реальная перспектива включения беспилотников в состав гражданской авиации для мониторинга безопасной работы аэропортов, перевозки легких (в частности, почтовых) грузов беспилотными транспортными средствами и других вспомогательных задач.

В данной работе общими и достаточно весомыми факторами, определяющими эффективность планирования полетов, являются их длительность и общая длина пройденного пути, своевременность соблюдения графика обслуживания тех пунктов, для которых он задан, и завершение – переменная в общем случае важность обслуживаемых пунктов.

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача оптимизации планирования полетов формулируется при следующих исходных данных.

1. Заданы число n и состав обслуживаемых пунктов маршрутного полета, их местоположение, либо матрица расстояний r_{ij} между ними, как показано на рис. 1, в виде матрицы попарных расстояний [10].

i/j	1	2	...	j	n
1	∞	r_{12}	...	r_{1j}	r_{1n}
2	r_{21}	∞		r_{2j}	r_{2n}
i	r_{i1}	r_{i2}	∞	r_{ij}	r_{in}
\vdots				∞	
n	r_{n1}	r_{n2}		r_{nj}	∞

Рис. 1. Матрица 1 попарных расстояний между двумя пунктами
Fig. 1. Matrix 1 of pairwise distances between two points

2. Скорость полета V любого летательного аппарата постоянна и заранее известна. Поэтому при заданном участке полета из пункта i в пункт j время полета t_{ij} и, соответственно, расход топлива также известны:

$$t_{ij} = \frac{r_{ij}}{V}. \quad (1)$$

Поэтому при выборе определенного числа (n) пунктов и последовательности пребывания в них в виде маршрута общий расход топлива определяется при заданном типе летательного аппарата однозначно в виде суммы слагаемых, вычисляемых по формуле (1). Эта общая оценка относится к категории затрат и является первой штрафной функцией Π_1 , которую нужно учесть при определении общей эффективности.

3. Для всех или части пунктов задан график моментов t_{ij} начала обслуживания или интервалов времени, когда каждый пункт лучше всего обслужить. Если иметь в виду только такие пункты (пусть их число равно $m \leq n$), то эти ограничения по удобству обслуживания можно представить в виде второй матрицы, показанной на рис. 2.

i/j	1	2	...	j	n
1	∞	t_{12}	...	t_{1j}	t_{1n}
2	t_{21}	∞		t_{2j}	t_{2n}
i	t_{i1}	t_{i2}	∞	t_{ij}	t_{in}
\vdots				∞	
n	t_{n1}	t_{n2}		t_{nj}	∞

Рис. 2. Матрица 2 моментов начала обслуживания пункта j после перелета из пункта i
Fig. 2. Matrix 2 of the moments of service beginning of point j after a flight from point i

Однако в отличие от предыдущей матрицы, элементы матрицы (рис. 2) штрафами не являются, а ими являются параметры $\Delta\tau_{ij}$ «несоблюдения графика», когда обслуживание происходит «не вовремя» (с опозданием или опережением), что является следствием неудачного выбора маршрута полета [7]. Сумма этих отклонений в течение всего полета является второй штрафной функцией Π_2 , которую, как правило, аналитически вычислить невозможно, а можно определить лишь численно, и необходимо также учесть при оценке общей эффективности в качестве «расходной части».

4. Третьим не менее существенным фактором при оценке эффективности является результативность или различная значимость обслуживания каждого пункта, что определяет «доходную часть» системы в целом. Для количественной оценки зависимости этого фактора от разных причин проведем более детальный анализ по пунктам.

4.1. У каждого пункта есть своя априорная важность $b_{\max i}$ его обслуживания (в частности, у Москвы и Петербурга она максимальна, у столиц регионов – ниже, областных центров – еще ниже и т. д.).

4.2. В пилотируемой авиации кроме априорной важна апостериорная информация о имеющемся спросе или текущей покупательной способности λ_{ij} на различные рейсы из заданного пункта i в каждый из оставшихся пунктов j . Считая потоки пассажиров отлета λ_{ij} и прилета λ_{ji} одинаковыми, эту информацию можно представить с помощью матрицы (рис. 3).

i/j	1	2	...	j	n
1	0	λ_{12}		λ_{1j}	λ_{1n}
2	λ_{21}	0		λ_{2j}	λ_{2n}
i	λ_{i1}	λ_{i2}	0	λ_{ij}	λ_{in}
\vdots				0	
n	λ_{n1}	λ_{n2}		λ_{nj}	0

Рис. 3. Матрица 3 покупательной способности пассажиропотока или спроса для рейса ij
Fig. 3. Matrix 3 purchasing power of passenger traffic or demand for flight ij

С помощью этой матрицы можно также оценить значимость λ_i каждого пункта суммой элементов в строке j или столбце i .

$$\lambda_i = \sum_{i \neq j}^n \lambda_{ij} = \sum_{j \neq i}^n \lambda_{ij} \quad (2)$$

Таким образом, апостериорная важность пункта пропорциональна скорости потока пассажиров. Недостаток этой модели состоит в том, что в случае непогоды или других задерживающих полеты причин потребность в обслуживании неограниченно растет, что не учитывает попытки пассажиров выбраться из пункта другим путем.

4.3. В беспилотной авиации задержки в обслуживании пунктов, в частности при попытке их регулярного наблюдения, приводят к обоснованному росту важности b_i каждого пункта по экспоненциальному закону

$$b_i = b_{max i} (1 - e^{-\lambda_i \tau}), \quad (3)$$

где τ – время задержки в обслуживании (например, наблюдения). Вместе с тем считается, что тут же после очередного наблюдения важность пункта обнуляется, т. к. интерес к нему временно пропадает. В целом это можно описать в дифференциальной форме:

$$b_i = \begin{cases} (b_{max i} - b_i)\lambda_i & \text{– при обслуживании} \\ -\frac{b_i}{\Delta t} & \text{– при необслуживании.} \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, модель (4) одновременно учитывает как априорную ($b_{max i}$), так и апостериорную значимость λ_i каждого пункта, и может быть взята за основу. В итоге третий фактор как общая сумма важностей всех перевозок может быть определен в виде

$$B = \sum_{i=1}^n b_i \rightarrow \max. \quad (5)$$

4.4. Общий показатель B учитывает лишь число обслуживаемых пассажиров, но не уделяет внимание выбираемому типу K воздушного судна в каждом рейсе (ij), однако от этого выбора зависит стоимость билетов, стоимость расхода топлива и другие экономические показатели, от которых зависит в свою очередь доход D_{ij} каждого рейса. Если считать выбор типа воздушного судна альтернативным ($k = 1, \dots, N$), то доход D_{ij} при цене C_k каждого билета равен

$$D_{ij} = \max_k \sum_{k=1}^N C_k \lambda_{ijk}. \quad (6)$$

Приведенные формулы (1)–(6) являются предпосылкой для формирования более общих критериев оптимальности планирования.

5. Сами критерии оптимальности, которые известны в настоящее время, при их перечислении выглядят так. Различают однокритериальные, двухкритериальные и многокритериальные задачи.

5.1. К числу однокритериальных задач физически применительно к данной работе можно указать [4]:

– критерий минимума длины пути маршрута

$$I_1 = \min \Pi_1; \quad (7)$$

– критерий минимума несвоевременного соблюдения графика полета

$$I_2 = \min \Pi_2; \quad (8)$$

– критерий максимума дохода или проще – суммарной важности

$$I_3 = \max B. \quad (9)$$

Каждый из этих критериев является показателем качества работы, но полученные оценки характеризуют это качество по отдельности.

5.2. К числу двухкритериальных задач можно отнести следующие эвристические показатели [6]:

– критерий минимума отношения расстояния до пункта r_{ij} к его важности b_j

$$I_4 = \min \frac{r_{ij}}{b_j}; \quad (10)$$

– критерий минимума отношения штрафа Δt_{ij} за несоблюдение графика к важности пункта

$$I_5 = \min \frac{\Delta t_{ij}}{b_j}; \quad (11)$$

– критерий произведения двух штрафных функций r_{ij} и Δt_{ij} , определяющих «расходную часть системы»

$$I_6 = \min r_{ij} \cdot \Delta t_{ij}. \quad (12)$$

Вместе с тем поставленная в данной работе задача является многокритериальной, и для нее необходимо найти новые подходы к оценке качества планирования в виде особой свертки трех показателей – Π_1 , Π_2 , D и т. д.

При перечисленных допущениях требуется:

- сформировать общий критерий оценки оптимальной эффективности системы, учитывающий в свертке его расходную и доходную часть;
- предложить подход к решению многокритериальной задачи в виде более совершенного алгоритма маршрутизации и планирования графика полета в новой динамической обстановке.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ

При решении различных многокритериальных задач обычным является подход [1], когда критерием общей оценки служит среднее значение отдельных частных показателей x_i или их общая сумма в баллах, т. е.

$$I = \max \sum_{i=1}^n x_i, \quad (13)$$

где x_i – такие показатели, увеличение которых явно желательно, и при нормировании они удовлетворяют ограничению $0 \leq x_i \leq 1$.

Однако в ряде случаев эта оценка не учитывает как различную важность отдельных показателей, так и их возможную несбалансированность. Например, в системах обучения [5] одну и ту же сумму баллов пяти показателей имеют два обучаемых лица – 3, 3, 3, 3, 4 и 2, 2, 3, 4, 5, в то время как первое обучаемое лицо явно предпочтительнее второго (которого обычно отчисляют из института). Между тем произведение этих же показателей у второго лица явно меньше, чем у первого. Поэтому представление максимизируемого критерия в виде взвешенной суммы аддитивной и мультипликативной форм показателей является более целесообразной сверткой

$$I_8 = \max_{x_i} \left(C_1 \sum_{i=1}^n x_i + C_2 \prod_{i=1}^n x_i \right). \quad (14)$$

Использование свертки (14) в качестве критерия оптимизации позволяет исключить «узкие места» в системе, когда один из показателей $x_i \rightarrow 0$, поскольку в этом случае второе слагаемое в формуле (14) сразу же обнуляется, что приводит к заметному ухудшению критерия I_8 .

Применительно к рассматриваемой в данной работе задаче необходимо, во-первых, все три максимизируемых показателя нормировать, т. е. превратить в безразмерные путем их деления на максимальные значения:

$$x_1 = \frac{\Pi_{1min}}{\Pi_1}; \quad x_2 = \frac{\Pi_{2min}}{\Pi_2}; \quad x_3 = \frac{B}{B_{max}}, \quad (15)$$

- где Π_{1min} – минимальная общая длина маршрута;
 Π_{2min} – минимальное общее время несоблюдения графика;
 B_{max} – максимально возможная суммарная важность пунктов, попавших в маршрут.

Во-вторых, учтем фактор неодинаковой значимости каждого нормированного показателя x_i с помощью весовых коэффициентов C_1, C_2, C_3 , назначаемых потребителем. В-третьих, представим свертку I_8 еще более компактно в виде

$$I_0 = \max(x_1 + A_1)(x_2 + A_2)(x_3 + A_3), \quad (16)$$

где

$$A_1 = \sqrt{\frac{c_2 c_3}{c_1}};$$

$$A_2 = \sqrt{\frac{c_1 c_3}{c_2}};$$

$$A_3 = \sqrt{\frac{c_1 c_2}{c_3}}.$$

Тогда свертка I_0 более подробно состоит из членов степенного ряда:

$$\begin{aligned} I_0 &= \max\{x_1 A_2 A_3 + x_2 A_1 A_3 + x_3 A_1 A_2 + x_1 x_2 A_3 + x_1 x_3 A_2 + x_2 A_3 A_1 + x_1 x_2 x_3\} = \\ &= \max(c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + x_1 x_2 \sqrt{\frac{c_1 c_3}{c_2}} + x_1 x_3 \sqrt{\frac{c_1 c_3}{c_2}} + x_2 x_3 \sqrt{\frac{c_2 c_3}{c_1}} + x_1 x_2 x_3). \end{aligned} \quad (17)$$

Достоинство предлагаемой нелинейной свертки состоит в том, что для нее достаточно задать всего три числа: C_1, C_2, C_3 .

Что касается самого алгоритма решения многокритериальной задачи маршрутизации и планирования графика полетов, то с учетом возможности получения в начале оптимального поиска рациональных вариантов решения («предков») с помощью однокритериального подхода по формулам (7)–(9) или двухкритериального подхода по формулам (10)–(12) в итоге предлагается использовать генетический алгоритм [2, 5, 8].

При этом подходе в начале работы алгоритма образуется «элита» из шести представителей, что позволяет затем на каждом шаге итерации выполнить операцию скрещивания путем разбиения каждого маршрута на три блока – в начале, середине и конце полета. В итоге можно получить 3^6 «потомков», а путем перестановки хотя бы одного пункта из одного блока в соседний можно получить достаточно большое число представителей, из которых затем с помощью критерия (16) может быть отобрана новая «элита» из 6 представителей на одном шаге эволюции.

Практика использования генетических алгоритмов показала, что наряду с достижением с его помощью глобального экстремума процесс существенного улучшения результатов планирования достигается за несколько шагов эволюции [5], и их число явно меньше, чем число шагов при использовании численных методов параметрической оптимизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- значительное число влияющих на эффективность факторов и разнообразие ситуаций в динамической обстановке требует разработки универсального критерия оптимальности планирования и алгоритма многомерной маршрутизации как для пилотируемой, так и беспилотной авиации;

- представленные в постановке задачи математические модели штрафных функций и значимости обслуживаемых пунктов позволяют получить количественные оценки расходной и доходной части оптимизируемой системы управления деятельностью авиакомпаний;

– установлено, что при решении многокритериальной задачи планирования маршрутных полетов более эффективным является генетический алгоритм, по сравнению с целочисленным программированием, обладающий высоким быстродействием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борсоев В.А.** Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Пхон Чжо Тин. М.: Радиотехника, 2018. 432 с. С. 351–414.
2. **Аллилуева Н.В., Руденко Э.М.** Математический метод расчета целевой функции на графах и решение задачи маршрутизации // Труды МАИ. 2017. № 96.
3. **Чехов И.А., Чехов О.И.** Алгоритм формирования динамической очереди БПЛА при заходе на посадку // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 25–30.
4. **Зайцев А.В., Талиманчук Л.Л.** Интеллектуальная система принятия решений для оценки научной деятельности на основе многоагентной системы // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2008. № 7. С. 85–88.
5. **Кузнецова Т.И., Царегородцева М.Г.** Комплексная оценка качества изучения иностранного языка в виде суммы аддитивной и мультипликативной сверток отдельных показателей // Труды XXV международной конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», Алушта, 2016 г. Технология. С. 208.
6. **Соболь Е.М., Статников Р.Б.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
7. Программы развития систем организации воздушного движения Европы и США SESAR и NextGen: аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников / под ред. Е.А. Федосова. М.: ГосНИИАС, 2011. 256 с.
8. **Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Михайлин Д.А.** Постановка и решение задачи оперативной коррекции прилета и вылета воздушных судов в районе аэродрома с помощью генетического алгоритма // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 8–15.
9. **Луговая А.В., Коновалов А.Е.** Совместное принятие решения о потоках прилета и вылета ВС при организации воздушного движения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 8–15.
10. **Кулаков Ю.А., Коган А.В., Морозовский Т.О.** Способ организации многопутевой маршрутизации с помощью модифицированного метода ветвей и границ [Электронный ресурс] // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. 2015. № 62. С. 27–31. Режим доступа: <http://it-visnyk.kpi.ua> (дата обращения: 28.08.2018).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института (национального исследовательского университета), kaf301@mai.ru.

Малыгин Вячеслав Борисович, начальник учебно-тренажерного центра кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, mbv898@ya.ru.

Михайлин Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), научный сотрудник Главного научно-исследовательского испытательного центра робототехники Министерства обороны Российской Федерации, tau_301@mail.ru.

Тан Бяо, магистрант Московского авиационного института (НИУ), tau_301@mail.ru.

FORMULATION OF MULTICRITERIA PROBLEM OF ROUTING AND SCHEDULING OF MANNED AND UNMANNED AIRCRAFT IN A DYNAMIC ENVIRONMENT AND APPROACH TO ITS SOLUTION USING GENETIC ALGORITHMS

Georgiy N. Lebedev¹, Vyacheslav B. Malygin², Denis A. Mikhaylin^{1,3}, Tan Byo¹

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

²Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

³Main Research and Testing Center of Robotics of the Ministry of Defence of the Russian Federation,
Moscow, Russia

The study was conducted with support of the Russian Foundation for Basic Research,
grants № 17-29-03185, № 16-08-00070

ABSTRACT

The article deals with the multi-criteria task of routing and scheduling of unmanned and manned aircraft using the method of penalty functions. The authors describe the urgency of the problem being solved for the airline management under the conditions of the existing changes in the dynamic situation with a great variety of flight situations. A mathematical statement of the problem is formulated and a universal optimality criterion is proposed in the form of a sum of additive and multiplicative forms, including partial quality indicators. The search for optimal and rational solutions to the problem of optimal flight routing, taking into account the airline fleet resources, airspace users' offers, constant and variable restrictions, associated, for example, with unfavorable weather conditions, can be implemented using a one-criteria and multi-criteria approach, but as a result, it is proposed to use a genetic algorithm that has low computational complexity and offers as solutions ("ancestors"), close to the optimal and rational result. With this approach, an "elite" is formed at the beginning of the algorithm, which allows the crossing operation to be performed at each step of the iteration (evolution). As a result, we get new "descendants", and by rearranging at least one item from one block to the next one, we can get a sufficiently large number of representatives, from which a new "elite" can be selected with the help of the criterion. The practice of using genetic algorithms has shown that along with the achievement of a global extremum with it, the process of substantial improvement of planning results is achieved in several evolution steps, and their number is clearly less than the number of steps when using numerical methods of parametric optimization. The proposed approach will significantly improve the efficiency and quality of flight planning for the airline, taking into account the diversity of aircraft fleet, payload and environmental impact. This task is especially important under the conditions of joint management (CDM), where aeronautical data can be considered as additional criteria.

Key words: penalty functions, optimal control, aircraft, genetic algorithm, collaborative decision-making (CDM).

REFERENCES

1. Borsoev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechaev, E.E., Nikulin, A.O. and Tin, Pkhon Chzho. (2018). *Prinyatie resheniya v zadachakh upravleniya vozдушным движением. Методы и алгоритмы* [Decision Making in Air Traffic Management Tasks. Methods and Algorithms]. Moscow: Radiotekhnika, 432 p., pp. 351–414. (in Russian)
2. Allilueva, N.V. and Rudenko, E.M. (2017). *Математический метод расчёта целевой функции на графах и решение задачи маршрутизации* [Athematic method of calculating the objective function on graphs and solving routing problems]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], no. 96. (in Russian)
3. Chekhov, I.A. and Chekhov, O.I. (2017). *Алгоритм формирования динамической очереди BPLA при заходе на посадку* [Algorithm for the formation of a dynamic queue of UAVs at the approach]. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 4, pp. 25–30. (in Russian)
4. Zaitsev, A.V. and Talimanchuk, L.L. (2008). *Интеллектуальная система принятия решений для отсенки научной деятельности на основе многоагентной системы* [Intellectual decision-making system for the evaluation of scientific activity on the basis of a multi-segment system]. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение* [Neurocomputers], no. 7, pp. 85–88. (in Russian)

5. **Kuznetsova, T.I. and Tsaregorodtseva, M.G.** (2016). *Kompleksnaya otsenka kachestva izucheniya inostrannogo yazika v vide summi additivnoy i multiplikativnoi svertok otdelnykh pokazateley* [Comprehensive assessment of the quality of learning a foreign language in the form of a sum of additive and multiplicative convolutions of individual indicators]. *Trudy XXV mezhdunarodnoy konferentsii «Sovremennye tekhnologii v zadachah upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii»* [Proceedings of the international conference «Modern technologies in control, automation and information processing problems], Alushta, 2016, Technology, p. 208. (in Russian)
6. **Sobol, E.M. and Statnikov, R.B.** (1981). *Vibor optimalnykh parametrov v zadachah s mnogimi kriteriyami* [The choice of optimal parameters in problems with many criteria]. M.: Nauka, 110 p.
7. Programmy razvitiya system organizatsii vozduzhnogo dvizheniya Evropy i SSHA SESAR i NextGen: analiticheskiy obzor po materialam zarubezhnykh informatsionnykh istochnikov [Programs for the development of air traffic management systems in Europe and the US SESAR and NextGen: an analytical review on the materials of foreign information sources]. (2011). Ed. E.A. Fedosov. Moscow: GosNIIAS. 256 p. (in Russian)
8. **Lebedev, G.N., Malygin, V.B. and Mikhaylin, D.A.** (2017). *Postanovka i reshenie zadachi operativnoy korrektsii prileta i vileta vozdushnykh sudov v rayone aerodroma s pomoschyu geneticheskogo algoritma* [The formulation and solution of the problem of the operational correction of the arrival and departure of aircraft in the area of the aerodrome with the help of a genetic algorithm]. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 8–15. (in Russian)
9. **Lugovaya, A.V. and Kononov, A.E.** (2017). *Sovmestnoe prinyatie resheniya o potokakh prileta i vileta VS pri organizatsii vozduzhnogo dvizheniya* [Joint decision-making on the arrival and departure flows in the organization of air traffic]. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 8–15. (in Russian)
11. **Kulakov, Yu.A., Kogan, A.V. and Morozovskiy, T.O.** (2015). *Sposob organizatsii mnogoputevoy marshrutizatsii s pomoschyu modifitsirovannogo metoda vetvey i granits* [A way to organize multi-path routing using a modified branch and bound method]. *Visnik NTUU «KPI». Informatika, upravleniya ta obchislyvalna tekhnika* [Bulletin of NTUU «KPI». Computer Science, Management and Computing], no. 62, pp. 27–31. URL: <http://it-visnyk.kpi.ua> (available at: 28.08.2018). (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Georgiy N. Lebedev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Chair of the Automatic and Intellectual Management Systems, Moscow Aviation Institute (National Research University), kaf301@mai.ru.

Vyacheslav B. Malygin, Head of the Training Center of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, mbv898@ya.ru.

Denis A. Mikhaylin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Research Officer, Main Research and Testing Center of Robotics of the Ministry of Defence of the Russian Federation, tau_301@mail.ru.

Tan Byo, Master's Degree Student, Moscow Aviation Institute (National Research University), tau_301@mail.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

16.03.2018
18.09.2018

Received
Accepted for publication

16.03.2018
18.09.2018