

Г. Н. Лебедев¹, д-р техн. наук, проф., kaf301@mai.ru,
В. И. Гончаренко^{1,2}, д-р техн. наук, доц., goncharenkovi@mai.ru,
Н. А. Максимов¹, канд. техн. наук, доц., n-a-maximov47@yandex.ru,
Д. А. Михайлин¹, канд. техн. наук, доц., tau_301@mail.ru,
А. В. Румакина¹, ассистент, a_rumakina@mail.ru,

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

²Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва

Метод оперативного планирования групповых действий летательных аппаратов в режиме "воздушного такси"*

Обсуждается разработка алгоритмов оперативного планирования маршрутов группы летательных аппаратов (ЛА). Рассматриваются групповые действия малой и беспилотной авиации в режиме "воздушного такси", когда не существует регулярного расписания полетов между пунктами назначения, а заявки поступают "по вызову" на перелеты в пункты, состав которых заранее неизвестен и носит случайный характер. Решается многокритериальная задача планирования группового полета в режиме "воздушного такси". Предложено решение этой задачи с помощью аппарата теории массового обслуживания, согласно которой рассматриваемая система относится к классу многоканальных систем массового обслуживания с ожиданием. Предложен метод решения задачи оперативного планирования действий ЛА. Разработан алгоритм группового целераспределения новых заявок между ЛА на базе модифицированного минимаксного критерия назначения ближайшего ЛА для объекта с максимальным временем обслуживания. Разработанный алгоритм построен на основе следующих четырех основных операций: первая операция осуществляет выбор первоочередных необслуженных целей по критерию назначения динамического приоритета, вторая операция ранжирует сформированный список по другому критерию, учитывающему важность и суммарную удаленность каждого наземного объекта от группировки ЛА, третья операция выбирает объект с максимальным рангом, и для него решается задача назначения "своего" ЛА по третьему критерию максимальной близости, четвертая операция осуществляет проверку условий непересекаемости маршрутов группового полета. Разработана компьютерная модель системы обслуживания заявок в режиме воздушного такси. Разработанная модель позволяет анализировать различные алгоритмы диспетчеризации, а также определять на каждом шаге число свободных заявок и число свободных и занятых ЛА. Проведено сравнение известного в теории массового обслуживания и предложенного минимаксного подходов. Показано, что по сравнению с известными вариантами диспетчеризации в теории массового обслуживания на основе предложенного подхода достигается оптимальное число используемых ЛА.

Ключевые слова: объекты наблюдения, беспилотный летательный аппарат, поток заявок, многокритериальная оптимизация

Введение

В настоящее время существует ряд практически важных задач организации полетов летательных аппаратов (ЛА), когда планирование маршрутов по первым заявкам проводится до начала полета, а планирование по новым заявкам проводится в самом полете. При этом под обслуживанием в беспилотной авиации понимается достижение очередного назначенного пункта наблюдения при заданной высоте

и скорости полета, а в малой авиации — вылет из одного пункта в другой, назначенный для перелета.

Особую перспективу для малой и беспилотной авиации представляет режим "воздушного такси" [1], когда не существует регулярного расписания полетов между аэропортами, а заявки поступают "по вызову" на перелеты в пункты, состав которых заранее неизвестен и носит случайный характер [2–4]. Огромную потребность в организации такого режима будут иметь районы нашей страны, где крайне затруднительно движение наземного транспорта, в частности, Сибирь, Арктика и Даль-

* Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 19-08-00010 и № 20-08-00652.

ний Восток. В перспективе режим воздушного такси будет востребован и в городской среде [1]. Аналогичную значимость представляет рассматриваемый режим для беспилотной авиации, предназначенной для наблюдения неподвижных и мобильных объектов [5]. Таким образом, организация воздушного движения при обслуживании заявок по вызову в групповом полете является перспективной задачей [6–12].

В данной работе решается задача обеспечения требуемой оперативности планирования в ходе полета авиационной группировки и получения плана обслуживания заявок с максимальной скоростью, экономичностью и безопасностью маршрутов полета. Принципиальной особенностью этой задачи является возможное отсутствие заявок при наличии незанятых ЛА, либо недостаток ЛА при появлении новых заявок. Кроме того, на каждом k -м шаге планирования с вероятностью, близкой к единице, появляется либо одна новая заявка, либо от обслуживания освобождается один из ЛА, а если этих событий нет, то планирование не осуществляется.

Оптимизация решения задачи планирования маршрутов ЛА в режиме воздушного такси является целью исследований в данной работе с учетом следующих недостатков известного подхода. Так, если придерживаться известного в теории массового обслуживания подхода, то появившаяся заявка назначается на первый свободный ЛА [2, 3]. В этом случае исключается возможность более рационального обслуживания с помощью других занятых ЛА, находящихся поблизости. Одновременное появление S новых заявок и d свободных ЛА, больших единицы, возможно только тогда, когда в задаче распределения ЛА между заявками кроме свободных будут учтены занятые ЛА (что в ряде случаев целесообразно). Иначе при планировании возможны лишь варианты, когда одно из чисел S , d равно нулю или единице, а это не так [13].

Постановка задачи

1. Считается, что источником полетных заданий является случайный поток заявок, моменты t_i появления которых распределены по закону Пуассона с известной плотностью вероятности [2]:

$$f_1(t_i) = \lambda e^{-\lambda t_i}, \quad (1)$$

где λ — величина, обратная среднему времени между заявками. Также допускается, что расстояния r_{ij} между пунктами i и j перелета тоже подчинены экспоненциальному закону распределения

$$f_2(r_{ij}) = q e^{-q r_{ij}}, \quad (2)$$

где q — величина, обратная среднему расстоянию между пунктами перелета.

На рис. 1 показан пример расположения двух свободных ЛА ($i = 1, 2$) и одного занятого ($i = 3$), а также двух пунктов ($j = 1, 2$). Кроме этого, иллюстрируется возникновение новых заявок и пункта $j = 1$, обслуживание которого завершается, на заданной территории диаметром D . На рис. 1 пунктиром показан перелет ЛА ($i = 1$) в пункт $j = 1$, который не попадает в план маршрутизации.

2. Каждая заявка содержит известные координаты X_i , Z_i начального пункта вылета и X_j , Z_j конечного пункта прилета. Считается, что в отсутствие новых заявок для малой авиации ЛА пребывает на стоянке, а полет беспилотного ЛА продолжается в направлении к заданному конечному пункту.

3. Общей особенностью является одно из требований считать приоритетным обслуживание тех заявок, которые появились раньше, т. е. у которых время τ_i динамического ожидания в очереди максимально. Другим необходимым условием успешности решения задачи является превышение средней скорости обслуживания заявок группой ЛА над средней скоростью λ их поступления, что, прежде всего, зависит от числа N используемых ЛА.

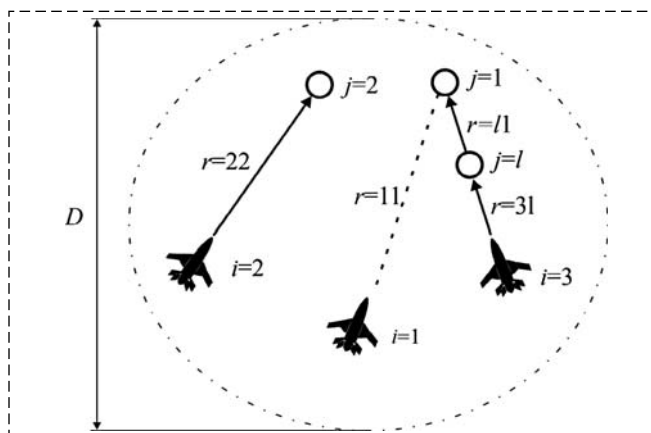


Рис. 1. Схема расположения трех ЛА и трех пунктов на одном шаге планирования

Fig. 1. Layout of three aircraft and three locations in one planning step

4. Задана группа однотипных ЛА, число которых либо известно, либо требуется найти его оптимальное значение. Скорость V и высота полета считаются постоянными и заданными. Текущие координаты X_k, Z_k местоположения свободных и занятых ЛА также считаются известными.

5. С учетом случайности момента и места возникновения заявок возможны три полетных ситуации в зависимости от числа S вновь появившихся заявок, общего числа N ЛА и числа d из них, не занятых обслуживанием [2]:

- *режим "простоя"* в обслуживании, когда $S < d$, что приводит к неоправданным эксплуатационным затратам;
- *штатный режим*, когда все ЛА заняты обслуживанием при $S \approx d$;
- *"пиковый" режим перегрузки* в работе, когда $S > d$, что приводит к задержкам в обслуживании и нежелательному увеличению времени τ_j пребывания заявок в очереди.

В результате совместных действий ЛА процесс обслуживания характеризуется средней скоростью λ пуассоновского входного потока заявок, числом N летательных аппаратов и средней скоростью μ обслуживания одной заявки одним ЛА, включающего перелеты, а также средним временем τ_{cp} пребывания заявок в очереди в периоды задержки обслуживания [2].

6. Решается многокритериальная задача планирования группового полета ЛА в режиме воздушного такси с учетом влияния следующих факторов: снижение экономичности полета при завышенном числе ЛА и попадании части из них в режим "простоя"; потеря комфорта пассажиров малой авиации из-за ожидания вылета, а в беспилотной авиации — увеличения времени ожидания выполнения задания; снижение безопасности группового полета при $S > 1$ и $d > 1$ при пересечении маршрутов запланированных ЛА на одном шаге перелетов; неучет при известном подходе возможности назначения для новой заявки занятого ЛА, находящегося к ней поблизости.

Требуется:

- сформировать единый критерий эффективности планирования групповых действий для выбора оптимального числа ЛА;
- предложить новый подход к решению задачи с учетом перечисленных факторов и ограничений и оценить его эффективность путем сравнения с известными алгоритмами диспетчеризации групповых действий.

Оценка эффективности оптимизации групповых действий ЛА на основе аппарата теории массового обслуживания

При оптимизации наряду с выбором наиболее эффективного алгоритма диспетчеризации групповых действий важное место занимает выбор требуемого числа ЛА [13–15]. Решение этой задачи возможно с помощью аппарата теории массового обслуживания [2–4], согласно которой рассматриваемая система относится к классу многоканальных систем массового обслуживания с ожиданием, когда N — число каналов, в каждом из которых один ЛА обслуживает заявки со средней скоростью μ , равной

$$\mu = \frac{V}{r_{cp}} = qV.$$

В свою очередь, коэффициент загрузки ρ одного канала равен

$$\rho = \frac{\lambda}{qV}; \quad \rho < N. \quad (3)$$

Неравенство $\rho < N$ является необходимым ограничением, при котором средняя скорость обслуживания заявок должна быть выше скорости их поступления. Необходимые для расчета вероятности состояния P_k системы вычисляются по формуле Эрланга [2–4]:

$$P_k = \frac{\frac{\rho^k}{k!}}{\sum_{l=0}^N \frac{\rho^l}{l!} + \sum_{S=N+1}^{\infty} P_S(N)}, \quad k = 0, \dots, N, \quad (4)$$

где P_k — вероятность того, что число N занятых ЛА равно k ; P_S — вероятность того, что в очереди, ожидающей назначения, имеется S заявок ($S = N, \dots, \infty$); l — число свободных каналов; P_0 — вероятность того, что на вход системы в режиме ее простоя заявок не поступило. Это позволяет сначала определить итоговое значение средней длины очереди S_{cp} по формуле

$$S_{cp} = \sum_{S=N+1}^{\infty} S P_S(N), \quad (5)$$

а затем рассчитать среднее время τ_{cp} пребывания заявок в очереди:

$$\tau_{cp} = \frac{S_{cp}(N)}{\lambda}. \quad (6)$$

Значение τ_{cp} определяет *первую штрафную функцию* несовершенства системы, которая, как показывают расчеты, снижается при уве-

личении числа N , т. е. $d\tau_{\text{ср}}/dN < 0$. Вместе с тем, увеличение числа используемых ЛА приведет к росту эксплуатационных затрат, связанных с увеличением числа свободных каналов системы с ростом среднего времени T "простоя" ЛА:

$$T = \frac{S_{\text{ср}}(N)}{VN}. \quad (7)$$

В итоге эксплуатационные затраты $\mathcal{E}$ образуют *вторую штрафную функцию* в виде суммы затрат за среднее время перелета и за время "простоя", которая равна

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{1}{qV} + \frac{S_{\text{ср}}(N)}{VN} \delta, \quad (8)$$

где δ — коэффициент отношения затрат во время "простоя" к затратам во время полета.

В отличие от первой штрафной функции величина $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ при увеличении числа N растет, т. е. $d\mathcal{E}/dN > 0$. Поэтому существует некий оптимум при выборе числа N , значение которого зависит от сформированного единого критерия, учитывающего обе штрафные функции одновременно. В данной работе для этого предлагается использовать хорошо зарекомендовавшую себя мультипликативную форму I_0 содержащую как аддитивные слагаемые, так и их произведения [15—17]:

$$I_0 = \min[(\tau_{\text{ср}} + m_1)(\mathcal{E}_{\text{ср}} + m_2)] = \min(\Pi_1, \Pi_2), \quad (9)$$

где m_1, m_2 — весовые коэффициенты значимости $\tau_{\text{ср}}$ и $\mathcal{E}_{\text{ср}}$, отличающиеся тем, что если $m_1 < m_2$, то второй сомножитель имеет пониженную важность и, наоборот, при $m_1 > m_2$ значимость первого сомножителя минимальна. Применение критерия (9) обеспечивает сбалансированность системы и позволяет избежать "узких мест", связанных с тем, что если один из сомножителей Π_1 или Π_2 слишком велик, то резко возрастает значение I_0 . Если же исходить из общепринятой концепции баланса спроса (числа новых заявок) и предложения (числа свободных ЛА), то можно принять равным значения $m_1 = m_2$, назначаемые до полета экспертным путем.

Теперь с помощью выбранного критерия I_0 можно провести анализ эффективности вариантов диспетчеризации, принятых в теории массового обслуживания. В качестве *варианта 1* однокритериального выбора наиболее приоритетной заявки из нескольких при $S > 1$ при одном свободном ЛА при $d = 1$ используется условие предпочтения по времени τ_i ожидания заявок

в очереди по принципу "запрос пришел первым — первым и обслужен" согласно критерию

$$I_1 = \min_{j=1, \dots, S} \tau_j. \quad (10)$$

Если же заявка одна ($S = 1$), а свободных ЛА несколько ($d > 1$), то для этой заявки назначается ближайший ЛА по критерию

$$I_2 = \min_{i=1, \dots, d} r_{ij}. \quad (11)$$

Преимущество этого варианта состоит в том, что минимизируется время обслуживания наиболее важных заявок. Однако имеется существенный недостаток — в числе избранных могут оказаться пункты со значительной удаленностью от группы ЛА, что в целом снижает экономичность группового полета.

В качестве *варианта 2* выбора можно использовать другой двухпараметрический критерий [16], учитывающий при одном i -м свободном ЛА одновременно как важность τ_j выбираемого пункта, так и его удаленность r_{ij} от свободного ЛА:

$$I_3 = \max_{j=1, \dots, S} \frac{\tau_j}{r_{ij}}. \quad (12)$$

Согласно этому критерию ожидаемое время перелета к j -му пункту должно сократиться, а значит, возрастет скорость обслуживания заявок. При этом считается, что в обоих вариантах в обслуживании используются только свободные ЛА, а занятые ЛА в процессе назначения не участвуют. Однако и этот критерий имеет свой недостаток — при значительной близости выбранного пункта к группе свободных ЛА более удаленные пункты будут обслуживаться в последнюю очередь, а при его удаленности от свободных ЛА более близкие занятые ЛА не будут использоваться.

Сравнение рассматриваемых *вариантов 1* и *2* проводилось путем расчетов и компьютерного моделирования при следующих исходных данных: среднее время между заявками равно 60 с, т. е. $\lambda = 0,016$ 1/с, скорость полета ЛА равна $V = 50$ м/с, среднее расстояние между пунктами равно $r_{ij} = 10000$ м, т. е. $\mu = 0,005$. Этим данным соответствует коэффициент загрузки системы $\rho = 3,2$, и согласно теории массового обслуживания общее число используемых ЛА должно быть не меньше, чем $N = 4 > \rho$. Всего было инициировано обслуживание 100 заявок на территории диаметром $D = 10\,000$ м. Для первого варианта были получены результаты, приведенные в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Таблица результатов оптимизации для варианта 1
Table of optimization results for option 1

N	3	4	5	6	7	8	9	10
x_1	316	311	252	201	164	175	139	134
x_2	12	24	132	237	315	373	447	499
x_3	807	217	31	2	0	0	0	0
Π_1	907	317	131	102	100	100	100	100
$\Pi_2(1)$	428	435	484	538	579	649	686	733
$I_0(1)$	387844	137827	63299	54962	57944	64856	68602	73274
$\Pi_2(0,5)$	422	423	418	419	422	462	463	483
$I_0(2)$	382547	134041	54654	42849	42171	46195	46274	48347

В табл. 1 представлены следующие параметры для разного числа N от 3 до 10: x_1 — среднее время перелета ЛА из одного пункта в другой, которое снижается из-за постепенного уменьшения расстояния между ними при увеличении N (приблизительно обратно пропорциональны $N^{1/2}$); x_2 — среднее время T "простоя" одного свободного ЛА перед вылетом, которое растет из-за снижения спроса (числа новых заявок) по сравнению с растущим предложением — числом N ; x_3 — среднее время $\tau_{\text{ср}}$ ожидания одной заявки в очереди.

В соответствии с критерием (9) интегральная штрафная функция I_0 имеет вид [17]

$$I_0 = \Pi_1 \Pi_2(\delta) = (x_3 + m)(x_1 + \delta x_2 + m), \quad (13)$$

где δ — коэффициент относительных затрат во время "простоя", взятый равным для малой авиации $\delta = 0,5$, для беспилотной авиации $\delta = 1$. Кроме того, было принято значение $m = 100$ с.

Соответственно, полученные значения Π_1 и $\Pi_2(\delta)$ позволили рассчитать минимизируемые штрафные функции $I_0(1)$ и $I_0(2)$, представленные в других строках табл. 1. В результате оказалось, что оптимальное число N в варианте 1 с лучшим качеством обслуживания равно $N = 8$ для беспилотной авиации и $N = 10$ для малой авиации, что как минимум вдвое больше допустимого значения $N = 4$. Кроме того, установлено, что оптимальное число $N = 10$ для малой авиации больше, чем для беспилотной, что оправдано сниженными затратами "простоя" на земле.

При анализе варианта 2 получены результаты, приведенные в табл. 2.

Результаты сравнения вариантов 1 и 2 обслуживания показали, что в варианте 2 все показатели улучшились — время ожидания зая-

Таблица 2
Table 2

Таблица результатов оптимизации для варианта 2
Table of optimization results for option 2

N	3	4	5	6	7
x_1	292	349	258	204	164
x_2	12	18	131	234	315
x_3	656	352	26	2	0
Π_1	756	452	126	102	100
$\Pi_2(1)$	404	467	490	538	579
$I_0(1)$	305114	211278	61580	54962	57944
$\Pi_2(0,5)$	398	458	424	421	422
$I_0(2)$	300701	207126	53315	43000	42171

вок, время "простоя" и интегральная штрафная функция уменьшились и, главное, оптимальное число N сократилось на 25 %. Однако и этот вариант не учитывает того факта, что близость к очередному пункту назначения свободного ЛА менее вероятна, чем одного из нескольких занятых ЛА, завершающих свое обслуживание. В частности, на рис. 1 видно, что если $r_{3l} + r_{1l} < r_{1l}$, то свободный ЛА₁ не будет участвовать в обслуживании. Поэтому ниже предлагается новый подход к решению поставленной задачи, учитывающий степень завершенности обслуживания заявок занятыми ЛА и использующий оригинальный алгоритм целераспределения на основе минимаксного критерия.

Предлагаемый метод решения задачи оперативного планирования групповых действий ЛА

Исходной концепцией предлагаемого подхода является обязательный учет при $d > 0$, $S > 0$ не только свободных, но и занятых ЛА, при этом на каждом шаге планирования участвуют все N из рассматриваемых ЛА. Это приведет к тому, что из-за отказа от обязательного назначения для новой заявки свободного ЛА на будущих шагах возникнет ситуация, когда при $d > 1$ и $S > 1$ одновременно образуются очереди в заявках и свободных ЛА, причем, как правило, значения d и S не будут равны друг другу.

Вследствие этого сначала возникнет подзадача назначения приоритетного множества заявок и выбранных ЛА, как свободных, так и занятых, при равенстве их числа друг другу. После этого в качестве второго действия должна решаться задача целераспределения выбранных

заявок между назначенными ЛА. Предлагается следующий единый подход к оперативному планированию, основанный на выполнении двух действий: назначения при $S > d$ на каждом шаге приоритетного множества заявок при их избытке в целях их ранжирования и выбора их части с числом, равным d , либо назначения при $S < d$ приоритетного множества ЛА как из свободных, так и занятых, и выбор их части с числом, равным S . После этого выполняется второе действие — целераспределение выбранных заявок между назначенными ЛА с помощью специального алгоритма, описанного ниже. Рассмотрим перечисленные действия подробнее с обязательным учетом возможности использования занятых ЛА.

При выполнении первого действия в случае избытка новых заявок, когда $S > d$, предлагается вычисление для каждой из них динамического приоритета $\Pi_1(j)$:

$$\begin{aligned}\Pi_2(i) &= \min_{i=1, \dots, d} \sum_{j=1}^S \frac{r_{ij}}{\tau_j}, \\ \Pi_2(v) &= \min_{v=d+1, \dots, N} \sum_{j=1}^S \frac{R_{vj}}{\tau_j},\end{aligned}\quad (14)$$

где $R_{vj} = r_{vi} + r_{ij}$ — сумма расстояний между v -м занятым ЛА и обслуживаемым пунктом i и от него — до анализируемого пункта j . В результате из N полученных оценок выбирается d первоочередных новых заявок, имеющих максимальный приоритет, — столько же, сколько имеется свободных ЛА. Однако части этих заявок может предписываться использование занятых ЛА, и они в план не попадут.

В случае избытка свободных ЛА, когда $d > S$, вычисляется другой динамический приоритет $\Pi_2(i)$ для всех ЛА, как занятых, так и свободных, по формуле

$$\Pi_1(j) = \max \left\{ \frac{\tau_j}{\min_{i=1, \dots, d} r_{ij}}, \frac{\tau_j}{\min_{v=d+1, \dots, N} R_{vj}} \right\}. \quad (15)$$

Казалось бы, свободных ЛА и так больше, чем заявок, и поэтому занятые ЛА можно не учитывать. Однако и в этой ситуации один занятый ЛА может оказаться гораздо ближе, чем множество свободных, но удаленных ЛА. Поэтому также после ранжирования всех ЛА в списке первоочередных могут оказаться как те, так и другие, после чего остаются S претендентов на участие в задаче целераспределения.

При выполнении второго действия при целераспределении заявок между ЛА возможны три случая:

- в список первоочередных ЛА не попал ни один свободный ЛА. Обозначим p — число попавших. Тогда при $p = 0$ любое целераспределение отсутствует, и значения S и d остаются неизменными, т. е. $d_{k+1} = d_k$; $S_{k+1} = S_k$;
- в список попал один свободный ЛА, для которого в первом действии уже выбрана нужная заявка ($p = 1$). Это и есть нужный ответ на k -м шаге целераспределения, после чего новое состояние на следующем шаге равно $d_{k+1} = d_k - 1$; $S_{k+1} = S_k - 1$;
- в список попали два и более свободных ЛА ($p > 1$), которые нуждаются в *групповом целераспределении*, после чего состояние системы станет равным $d_{k+1} = d_k - p$; $S_{k+1} = S_k - p$. При этом значение p в общем случае группового распределения лежит в пределах $p = 2, \dots, \min(S, d)$.

Разработанная общая блок-схема алгоритма оперативного планирования представлена на рис. 2.

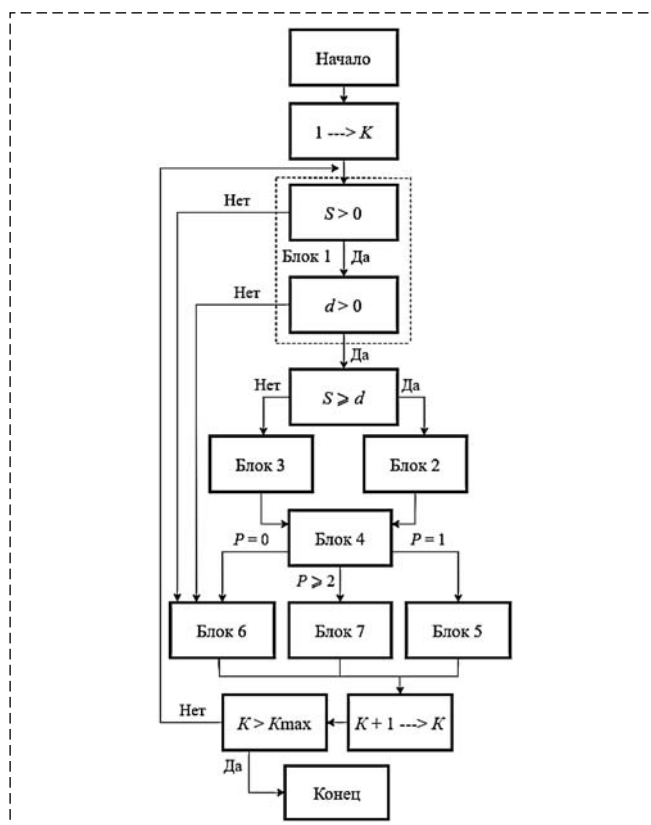


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оперативного планирования маршрутов ЛА при обслуживании наземных объектов в режиме воздушного такси

Fig. 2. Flowchart of the algorithm for operational planning of aircraft routes when servicing ground objects in the air taxi mode

Алгоритм содержит 7 следующих основных блоков. *Блок 1* выявляет необходимые ситуации, когда в принципе есть как заявки, так и свободные ЛА при $S > 0$, $d > 0$. *Блок 2* обеспечивает вычисление приоритета $P_1(i)$ для S заявок, их ранжирование и оставление в списке d первостепенных заявок. *Блок 3* проводит вычисление приоритета $P_2(i)$ для свободных и занятых ЛА, их ранжирование и оставление в списке S используемых ЛА, в том числе как свободных, так и занятых. *Блоки 2 и 3* вычисления динамических приоритетов заявок и используемых ЛА отличаются тем, что учитывают возможности всех ЛА, а затем после ранжирования в списке остаются претенденты, число которых равно $\min(S, d)$.

В *блоке 4* оценивается число p назначенных для обслуживания новых заявок на k -м шаге диспетчеризации. Действие *блока 4* указывает, что необходимо отличать ситуации при $p = 1$ (когда происходит фактическое целераспределение) от случаев $d = 1$ или $S = 1$ (когда обнаруживается лишь факт существования единственного претендента из пары "заявка—ЛА").

В *блоке 5* фиксируется уже намеченное назначение свободного ЛА для одной заявки в то время, как в *блоке 6* устанавливается факт исключения действий на очередном шаге планирования.

Наибольший интерес представляет *блок 7* группового целераспределения на основе минимаксного критерия при одинаковом числе участников. Особенность предложенного в *блоке 7* подхода к групповому целераспределению заключается в том, что он включает в себя следующие основные действия:

- при $N = 1$ первое действие осуществляется только с помощью блока 2, и при $p = 1$ процедура группового целераспределения отсутствует, что соответствует известной задаче о коммивояжере при одномерной маршрутизации;
- при $N = d = S$, когда нет занятых ЛА, решается только одна задача целераспределения, а первое действие отсутствует, что соответствует классической задаче распределения ресурсов, а в решаемой задаче в первую очередь соответствует предложенному планированию.

В заключение рассмотрения предложенного подхода необходимо сделать следующее замечание. Предварительные результаты моделирования при прямом использовании формул (14)

и (15) для оценки возможности занятых ЛА показали, что наряду с выгодой их использования возникает негативный эффект — время "простоя" оставшихся свободных ЛА увеличивается. Поэтому для компенсации этого эффекта в оценку ожидаемых расстояний R_{vj} для занятых ЛА вводится дополнительный порог $\Delta(\delta)$, чтобы оценить их предпочтение перед свободными ЛА исходя из следующего условия:

если

$$R_{vj} + \Delta(\delta) = r_{ve} + r_{ej} + \Delta_0 \delta < r_{ij}, \quad (16)$$

то выбирается лучшим занятый ЛА, где конкретно было взято значение $\Delta_0 = 0,3r_{cp}$, гарантирующее очевидное преимущество для беспилотной авиации при $\delta = 1$, уменьшенное при $\delta < 1$ для малой авиации.

Разработка алгоритмов целераспределения заявок между группой ЛА

Вначале рассмотрим известный подход к многомерной маршрутизации группового полета, основанный на использовании "жадного алгоритма" [18], суть которого состоит в следующем. В качестве первого выбирается любой анализируемый ЛА, и ему для обслуживания назначается ближайший пункт. Затем с сохранением права первоначального выбора выбирается другой ЛА, и для него из того же множества заявок назначается "свой" ближайший пункт. Если пункты при первом и втором выборе не совпадают, процесс целераспределения продолжается. В противном случае возникает конфликтная ситуация, и выбранный пункт принадлежит тому ЛА, который ближе. Таким образом, для каждого ЛА будут назначены "свои" пункты, однако маршруты их перелетов могут пересекаться, что при полете на одной высоте снизит безопасность и приведет к увеличению длины суммарного пути.

В приведенном выше *варианте 3* для количественной оценки эффективности планирования с помощью "жадного алгоритма" использовалось компьютерное моделирование. Окончательные результаты моделирования *варианта 3* представлены в табл. 3.

Из полученных результатов $I_0(1)$ и $I_0(2)$ видно, что минимум интегральной штрафной функции обеспечивается при $N = 5$, что, по сравнению с предыдущим *вариантом 2*, также соответствует снижению эксплуатационных

Таблица 3
Table 3

Таблица результатов оптимизации для варианта 3
Table of optimization results for option 3

N	3	4	5	6	7
x_1	267	236	195	157	130
x_2	12	59	173	273	334
x_3	490	40	9	0	0
Π_1	590	140	109	100	100
$\Pi_2(1)$	379	396	468	530	564
$I_0(1)$	223392	55465	51029	53024	56378
$\Pi_2(0,5)$	373	366	382	394	397
$I_0(2)$	219949	51295	41603	39385	39695

затрат на 20...25 % за счет учета ЛА, занятых обслуживанием. Динамику снижения оптимального числа N используемых ЛА в зависимости от вариантов диспетчеризации можно представить в виде, показанном на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что при совершенствовании операций назначения и целераспределения эффективность оперативного планирования растет, а оптимальное значение N приближается к коэффициенту загрузки системы $\rho = 3,2$. С учетом указанного выше недостатка *варианта 3* разработан новый алгоритм целераспределения, основанный на модифицированном минимаксном критерии назначения ближайшего

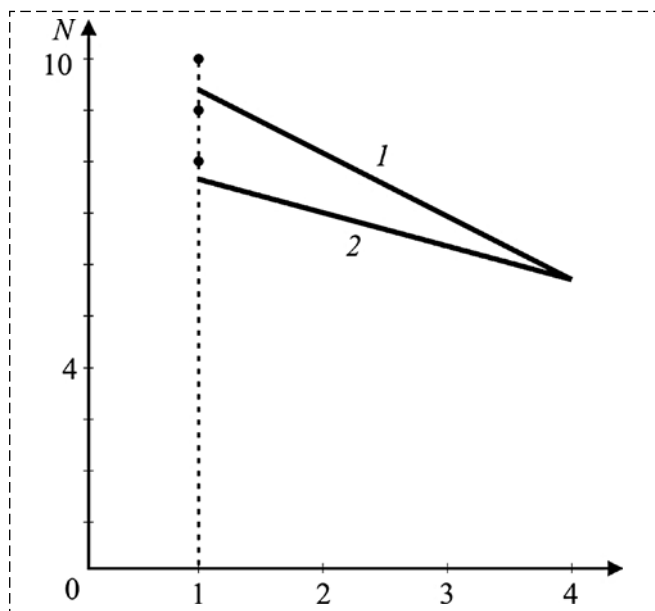


Рис. 3. Графики зависимости оптимального числа используемых ЛА от варианта диспетчеризации:
1 — для малой авиации; 2 — для беспилотной авиации

Fig. 3. Charts of the dependence of the optimal number of aircraft used on the dispatching option:
1 — for small aircraft; 2 — for unmanned aircraft

БЛА для цели с максимальным временем обслуживания и минимизирующим время выполнения части полетного задания на одном шаге оперативного планирования. Этот критерий попутно минимизирует суммарную длину пути группы БЛА и исключает пересечение их маршрутов [19—21].

Указанные преимущества минимаксного критерия открывают возможность дополнительного повышения качества оперативного планирования группового полета и, как показало моделирование, позволяют уменьшить время ожидания заявок и "простоя" свободных ЛА. На рис. 3 эта позиция соответствует окончательному варианту 4 (для него оптимальное число $N = 4$ достигает минимума). В целом это подтверждает эффективность предложенного подхода.

Заключение

1. Предложен новый метод оперативного планирования групповых действий ЛА при обслуживании наземных объектов, основанный на выполнении на каждом шаге планирования двух главных действий. Первым действием назначается приоритетное множество объектов при их избытке, либо приоритетное множество ЛА, как свободных, так и занятых, при их избытке в целях сокращения этих множеств. Во втором действии выполняется целераспределение выбранных ЛА между объектами при их одинаковом числе.

2. При выполнении первого действия назначения динамических приоритетов снижается трудоемкость последующих расчетов и обеспечивается требуемая оперативность планирования.

3. Для выполнения второго действия при групповом целераспределении сформирован минимаксный алгоритм диспетчеризации при соблюдении необходимого условия не пересечения маршрутов перелета группы ЛА, что соответствует минимизации суммарной длины пройденного пути, а значит, и сокращению эксплуатационных затрат.

4. Для оценки эффективности вариантов планирования используется мультипликативная форма интегральной штрафной функции, учитывающая в свертке время ожидания заявок в очереди и эксплуатационные затраты, зависящие от времени "простоя" свободных ЛА. Это позволяет избежать "узких мест" в системе, когда один из сомножителей неоправданно велик.

5. Показано, что по сравнению с известными методами диспетчеризации в теории массового обслуживания оптимальное число используемых ЛА на основе предложенного метода сокращается в 2...3 раза при том же качестве обслуживания.

Список литературы

1. **Шибитов А. Б.** Городская аэромобильность // Пленарные доклады 1-й Международной конференции "Беспилотные летательные аппараты" в рамках 19-й Международной конференции "Авиация и космонавтика" (24 ноября 2020 г., Москва). URL: <http://aik.mai.ru> (дата обращения: 03.02.2021).
2. **Саати Т. Л.** Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / Пер. с английского Е. Г. Коваленко. Под ред. И. Н. Коваленко и Р. Д. Когана. М.: Советское радио, 1965. 510 с.
3. **Вентцель Е. С.** Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972. 552 с.
4. **Алиев Т. И.** Основы моделирования дискретных систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
5. **Ким Н. В., Крылов И. Г.** Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <http://mai.ru/upload/iblock/bbb/grupповое-primenenie-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-v-zadachakh-nablyudeniya.pdf> (дата обращения: 03.02.2021).
6. **Ребров В. А., Рудельсон Л. Е., Черникова М. А.** Модель сбора и обработки заявок на полеты в задаче планирования авиарейсов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2007. № 3. С. 97—111.
7. **Нечаев Е. Е., Сурипт П. С.** Анализ организации воздушного движения на аэродромах с низкой интенсивностью полетов в зарубежных странах // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2017. Т. 20, № 4. С. 59—68.
8. **Evdokimenkov V. N., Krasilshchikov M. N., Kozorez D. A.** Development of pre-flight planning algorithms for the functional-program prototype of a distributed intellectual control system of unmanned flying vehicle groups // INCAS Bulletin. 2019. Vol. 11, N. 1. P. 75—88. DOI: 10.13111 / 2066-8201.2019.11.S.8.
9. **Ozlem Sahin Meric.** Optimum Arrival Routes for Flight Efficiency // Journal of Power and Energy Engineering. 2015. N. 3. P. 449—452.
10. **Kon'kova E. Yu., Rudel'son L. E., Chernikov P. E.** Operative flow regulation in an automated system of air traffic management // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2006. Vol. 45, N. 4. P. 646—657.
11. **Schouwenaars T., Moor B. D., Feron E., How J.** Mixed integer programming for multi-vehicle path planning // Proc. of the European Control Conf. 2001. P. 2603—2608.
12. **Rong Zhu, Dong Sun, Zhaoying Zhou.** Cooperation Strategy of Unmanned Air Vehicles for Multitarget Interception // J. Guidance. 2005. Vol. 28, N. 5. P. 1068—1076. DOI: 10.2514/1.14412.
13. **Меркулов В. И., Миляков Д. А., Самодов И. О.** Оптимизация алгоритма группового управления БЛА в составе локальной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3. С. 157—166.
14. **Моисеев В. С.** Групповое применение беспилотных летательных аппаратов: монография. Казань: РИЦ "Школа", 2017. 572 с.
15. **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. С. 3—12. DOI: 10.14489/vkit.2019.02.pp.003-012.
16. **Соболь И. М., Статников Р. Б.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 112 с.
17. **Гончаренко В. И., Лебедев Г. Н., Мартынкевич Д. С., Румакина А. В.** Постановка задачи планирования маршрутов летательных аппаратов при обслуживании случайного потока поступающих в полете заявок // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2021. Т. 18, № 1. С. 17—27. DOI: 10.14489/vkit.2021.01.pp.017-027.
18. **Левитин А. В.** Жадные методы: Алгоритм Дейкстры // Алгоритмы. Введение в разработку и анализ = Introduction to The Design and Analysis of Algorithms. М.: Вильямс, 2006. С. 189—195.
19. **Гончаренко В. И., Желтов С. Ю., Князь В. А., Лебедев Г. Н., Михайлин Д. А., Царева О. Ю.** Интеллектуальная система планирования групповых действий беспилотных летательных аппаратов при наблюдении наземных мобильных объектов на заданной территории // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2021. № 3. С. 64—81. DOI: 10.31857/S0002338821030057.
20. **Лебедев Г. Н., Михайлин Д. А., Царева О. Ю., Чернякова М. Е.** Многокритериальная оценка эффективности группового полета летательных аппаратов с помощью мультипликативной формы // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2020. № 2. С. 25—36.
21. **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, Iss. 1. P. 147—158. <https://doi.org/10.1134/S1064230719010076>.

The Method of Operational Planning of Group Actions of Aircraft in the "Air Taxi" Mode

G. N. Lebedev¹, kaf301@mai.ru, **V. I. Goncharenko**^{1,2}, goncharenkovi@mai.ru,
N. A. Maximov¹, n-a-maximov47@yandex.ru, **D. A. Mikhailin**¹, tau_301@mail.ru,
A. V. Rumakina¹, a_rumakina@mail.ru,

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation;

²V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
 Moscow, 117997, Russian Federation,

Corresponding author: **Goncharenko Vladimir I.**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: goncharenkovi@mai.ru

Accepted on May 22, 2021

Abstract

The article is devoted to the development of algorithms for operational planning of routes for a group of aircraft (AC). We consider group actions of small and unmanned aircraft in the "air taxi" mode, when there is no regular flight schedule between the points of destination, and requests are received "on call" for flights to points whose composition is unknown in advance and is of a random nature. The multicriteria task of planning a group flight in the "air taxi" mode is being solved. The solution to this problem is proposed using the apparatus of the queuing theory, according to which the system under consideration belongs to the class of multichannel queuing systems with waiting. A method for solving the problem of operational planning of aircraft actions is proposed. An algorithm for group target distribution of new claims between aircraft is developed on the basis of a modified minimax criterion for assigning the nearest aircraft for an object with a maximum service time. The developed algorithm is based on the following four main operations: in the first operation, priority unserved targets are selected according to the criterion of assigning a dynamic priority; in the second operation, the formed list is ranked according to another criterion, taking into account the importance and total distance of each ground object from the aircraft group, in three this operation selects the object with the maximum rank, and for it the task of assigning "own" aircraft is solved according to the third criterion of maximum proximity, in the fourth operation the conditions of non-intersection of the group flight routes are checked. A computer model of the system for servicing requests in the air taxi mode has been developed. The developed model makes it possible to analyze various scheduling algorithms, as well as to determine at each step the number of free claims and the number of free and busy aircraft. A comparison is made between the well-known in the theory of queuing and the proposed minimax approaches. It is shown that, in comparison with the known variants of scheduling in the queuing theory, on the basis of the proposed approach, the optimal number of used aircraft is achieved.

Keywords: objects of observation, unmanned aerial vehicle, application flow, multi-criteria optimization

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 19-08-00010 and 20-08-00652 a. For citation:

Lebedev G. N., Goncharenko V. I., Maximov N. A., Mikhailin D. A., Rumakina A. V. The Method of Operational Planning of Group Actions of Aircraft in the "Air Taxi" Mode, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 9, pp. 484–493.

DOI: 10.17587/mau.22.484-493

References

1. Shibitov A. B. Urban airmobility, *Plenary reports of the 1st International Conference "Unmanned Aerial Vehicles" in the framework of the 19th International Conference "Aviation and Cosmonautics"*, Moscow, available at: <http://aik.mai.ru> (date of access: 03.02.2021) (in Russian).
2. Saaty T. L. Elements of Queueing Theory: With Applications, McGraw-Hill, New York, 1961, 423 p.
3. Wentzel E. S. Operations research. Moscow, Soviet radio, 1972, 552 p. (in Russian).
4. Aliev T. I. Basics of modeling discrete systems. SPb: SPbGU ITMO, 2009, 363 p. (in Russian).
5. Kim N. V., Krylov I. G. Group use of an unmanned aerial vehicle in observation tasks, *Proceedings of the MAI*, 2012, no. 62, available at: <http://mai.ru/upload/iblock/bbb/gruppovoe-primenenie-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-v-zadachakh-nablyudeniya.pdf> (date of access: 03.02.2021) (in Russian).
6. Rebrov V. A., Rudel'son L. E., Chernikova M. A. A model of flight request collection and processing in the flight scheduling problem, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2007, vol. 46, no. 3, pp. 429–443.
7. Nechaev E. E., Surint P. S. Analysis of the organization of air traffic at airfields with low flight intensity in foreign countries, *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 59–68 (in Russian).
8. Evdokimenkov V. N., Krasilshchikov M. N., Kozorez D. A. Development of pre-flight planning algorithms for the functional-program prototype of a distributed intellectual control system of unmanned flying vehicle groups, *INCAS Bulletin*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 75–88, DOI: 10.13111 / 2066-8201.2019.11.S.8.
9. Ozlem Sahin Meric. Optimum Arrival Routes for Flight Efficiency, *Journal of Power and Energy Engineering*, 2015, no. 3, pp. 449–452.
10. Kon'kova E. Yu., Rudel'son L. E., Chernikov P. E. Operative flow regulation in an automated system of air traffic management, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2006, vol. 45, no. 4, pp. 646–657.
11. Schouwenaars T., Moor B. D., Feron E., How J. Mixed integer programming for multi-vehicle path planning, *Proc. of the European Control Conf.*, 2001, pp. 2603–2608.
12. Rong Zhu, Dong Sun, Zhaoying Zhou. Cooperation Strategy of Unmanned Air Vehicles for Multitarget Interception, *J Guidance*, 2005, vol. 28, no. 5, pp. 1068–1076, DOI: 10.2514/1.14412.
13. Merkulov V. I., Milyakov D. A., Samodov I. O. Optimization of the group control algorithm for UAVs as part of a local network, *Izvestiya SFedU. Technical science*, 2013, no. 3, pp. 157–166 (in Russian).
14. Moiseev V. S. Group application of unmanned aerial vehicles: monograph. — Kazan: Shkola Editorial and Publishing Center, 2017, 572 p. (in Russian).
15. Lebedev G. N., Goncharenko V. I., Tsareva O. Yu., Mikhailin D. A. Selection of a set of priority ground objects of observation with the help of unmanned aerial vehicles and routing of their flight, *Bulletin of computer and information technologies*, 2019, no. 2, pp. 3–12. DOI: 10.14489 / vkit.2019.02.pp.003-012 (in Russian).
16. Sobol I. M., Statnikov R. B. The choice of optimal parameters in problems with many criteria, Moscow, Nauka, 1981, 112 p.
17. Goncharenko V. I., Lebedev G. N., Martynkevich D. S., Rumakina A. V. Formulation of the problem of planning the routes of aircraft when servicing a random flow of incoming requests in flight, *Bulletin of computer and information technologies*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 17–27. DOI: 10.14489 / vkit.2021.01.pp.017-027 (in Russian).
18. Levitin A. V. Greedy methods: Dijkstra's algorithm, *Algorithms. Introduction to The Design and Analysis of Algorithms*, Moscow, Williams, 2006, pp. 189–195 (in Russian).
19. Goncharenko V. I., Zheltov S. Yu., Prince V. A., Lebedev G. N., Mi-khaylin D. A., Tsareva O. Yu. Intelligent system for planning group actions of unmanned aerial vehicles when observing ground mobile objects in a given territory, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2021, vol. 60, no. 3, pp. 379–395. DOI: 10.1134/S1064230721030047.
20. Lebedev G. N., Mikhailin D. A., Tsareva O. Yu., Chernyakova M. E. Multi-criteria evaluation of efficiency of group flight of aircraft using multiplicative form. *vestnik vguit* [Proceedings of VSUET], 2020, vol. 82, no. 2, pp. 25–6, doi:10.20914/2310-1202-2020-1-1-6 (in Russian).
21. Goncharenko V. I., Lebedev G. N., Mikhailin D. A. On-line Two-Dimensional Route Planning for a Group of Unmanned Aerial Vehicles, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2019, vol. 58, iss.1, pp. 147–158. <https://doi.org/10.1134/S1064230719010076>.