

УДК 656.7.052

ОПЕРАТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ ПОТОКОВ ПРИЛЕТА И ВЫЛЕТА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В РАЙОНЕ АЭРОДРОМА

Г.Н. ЛЕБЕДЕВ, В.Б. МАЛЫГИН

(Работа выполнена при материальной поддержке гранта РФФИ 16-08-00070)

Сформулирована задача оптимальной коррекции запланированного времени посадки и взлета воздушных судов, использующих одну взлетно-посадочную полосу (ВПП) в условиях повышенной интенсивности воздушного движения, при которой вероятность возникновения конфликтной ситуации между взлетом и посадкой достигает критических значений.

Предложен способ, позволяющий эффективно решать задачу обеспечения безопасности полетов с помощью метода «штрафных» функций, учитывая дополнительные потери топлива при задержках вылета и прилета.

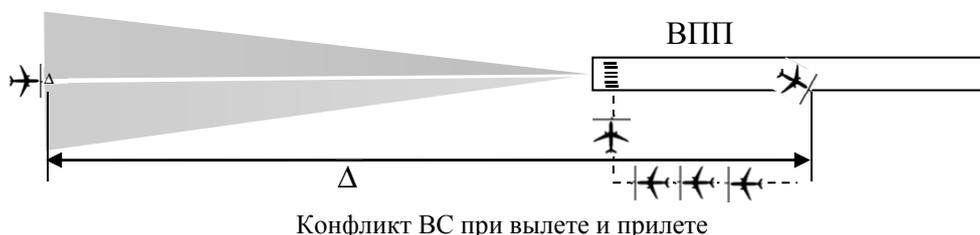
Показаны преимущества субоптимального решения по сравнению с принятым сегодня «командным» вариантом разрешения конфликта вылета и прилета в районе аэродрома.

Ключевые слова: контроль безопасности, оптимальное управление, воздушные суда, штрафная функция, конфликт вылета и прилета.

ВВЕДЕНИЕ

Существует большое количество научных работ, в которых процессы прилета и вылета воздушных судов (ВС) рассматриваются отдельно. При этом факторы, влияющие на оба процесса, известны. Между тем сами процессы прилета и вылета существенно влияют друг на друга, особенно при повышенной интенсивности прилета и вылета в случаях невозможности исключения задержек как со стороны прилета, так и вылета. Нерациональные действия авиадиспетчеров по обеспечению преимущества прилета в ряде случаев могут привести к остановке работы аэропорта на вылет, также как и аналогичное нерациональное обеспечение преимущества вылета является одной из распространенных причин посадки ВС с недопустимо малым остатком топлива.

Целью данной работы является оптимизация плана управляющих воздействий на прилетный и взлетный потоки движения ВС на площади маневрирования и в районе аэродрома. При наличии конфликта интересов со стороны авиадиспетчеров, обеспечивающих формирование этих потоков, предлагается оптимальное решение, полученное с использованием метода «штрафных» функций.



На рисунке случай обеспечения вылета большому количеству ВС, ожидающих разрешение на вылет. При разрешении посадки осуществить вылет нельзя, т. к. нарушается условие обеспечения безопасности полетов (БП) вследствие уменьшения безопасного временного интервала Δ , предусмотренного в этом случае в каждом аэропорту.

Таким образом, можно сформулировать задачу.

1. Условием наступления негативного авиационного события – нарушения уровня БП, можно считать сокращение временного интервала между моментом времени разрешения эки-

пажу ВС посадки t и моментом времени начала разбега при взлете τ для i -й пары ВС менее допустимого Δ , т. е.

$$|t_i - \tau_i| < \Delta. \quad (1)$$

2. Необходимо не допускать выполнения условие 1 путем планирования задержек прилета или вылета по актуальным парам ВС, число которых задано и равно n .

3. Разобьем n упомянутых событий прилета и вылета на две группы. В первой группе момент τ_i наступает раньше момента t_i , во второй группе – наоборот. При этом условие 1 выполняется для обеих групп. Учитывая то обстоятельство, что психологически обслуживание ВС, находящихся в воздухе, воспринимается важнее, чем обслуживание ВС, находящихся на земле, рассмотрим ситуацию, когда моменты времени t_i и τ_i равны, т. е. $t_i = \tau_i$ во второй группе событий. Обе группы событий примерно равны, поэтому

$$n_1 = n_2 = 0,5 \cdot n. \quad (2)$$

4. В целях недопущения наступления события 1 – нарушения уровня БП, рассмотрим следующие возможности применения управляющих воздействий для обеих групп, связанные с дополнительными затратами времени и топлива, которые учитываются с помощью «штрафных» функций.

Для первой группы событий ($t_i > \tau_i$) имеются следующие альтернативы решений $j = 1, 2, 3$:

а) $j = 1$ – задержать прилет на раннем этапе захода на посадку путем применения векторения, увеличив тем самым момент времени t_i на величину $[\Delta - (t_i - \tau_i)]$, что неизбежно приведет к дополнительному расходу топлива за счет увеличения времени полета. В этом случае, если выразить величину $(t_i - \tau_i)$ через δ , штрафная функция Ш_1 будет выглядеть следующим образом:

$$\text{Ш}_1 \cong c_{\text{п}} \frac{[\Delta - \delta_i + \Delta t_i]^2}{\Delta t_{\text{сп}}}, \quad (3)$$

где $\Delta t_{(\text{сп.})}$ – заданная среднеквадратическая оценка времени задержек всех прилетающих ВС, а $c_{\text{п}}$ – заданный коэффициент дополнительных затрат топлива при увеличении времени полета;

б) $j = 2$ – отправить заходящее на посадку ВС на повторный заход, т. е. задержать прилетающее ВС на значительное время T ($T > \Delta$). Безусловно, это окажет влияние на весь прилетный поток, однако пока этим обстоятельством можно пренебречь. Поэтому штраф Ш_2 можно представить как

$$\text{Ш}_2 = c_{\text{п}} \frac{[T + \Delta t_i]^2}{T}; \quad (4)$$

в) $j = 3$ – задержать вылетающее ВС на время $(\Delta + \delta_i)$, пока заходящее на посадку ВС не освободит ВПП после посадки. В этом случае дополнительные затраты топлива потребуются при ожидании разрешения на взлет. Штрафная функция будет описана следующим образом:

$$\text{Ш}_3 \cong c_B \frac{\llbracket \Delta - \delta_i + \Delta \tau_i \rrbracket^2}{\Delta \tau_{cp}}, \quad (5)$$

где $\Delta \tau_i$ – учитывает эффект роста потерь при существовании априорной задержки при вылете;
 $\Delta \tau_{(cp)}$ – среднеквадратическая оценка времени задержки вылета при соответствующей интенсивности выполнения операций,
 c_B – заданный коэффициент дополнительных затрат топлива при увеличении времени задержки вылета после запуска двигателей. При этом считаем, что

$$c_B < c_{II}. \quad (6)$$

5. Для всех пар ВС первой группы ставится задача определения минимума суммы R_1 всех штрафов.

$$R_1 = \sum_{i=1}^{n_1} \min_{j=1,2,3} \begin{cases} c_{II} \frac{\llbracket \Delta + \delta_i + \Delta t_i \rrbracket^2}{\Delta t_{cp}}; \\ c_{II} \frac{\llbracket T + \Delta t_i \rrbracket^2}{T}; \\ c_B \frac{\llbracket \Delta + \delta_i + \Delta \tau_i \rrbracket^2}{\Delta \tau_{cp}}. \end{cases} \quad (7)$$

6. Для второй группы, где $t_i < \tau_i$ имеются следующие альтернативы управляющих воздействий:

а) $j = 4$ – по аналогии с $j = 2$ – отправить ВС на повторный заход. В этом случае штрафная функция совпадает с (4) $\text{Ш}_4 = \text{Ш}_2$;

б) $j = 5$ – отложить вылет на короткое время $(\Delta + \delta_i)$, учитывая при этом, что для второй группы $\delta_i < 0$. По этой причине штрафная функция Ш_5 повторяет форму воздействия при $j = 3$, однако значение штрафа будет явно меньше:

$$\text{Ш}_5 \cong c_B \frac{\llbracket \Delta + \delta_i + \Delta \tau_i \rrbracket^2}{\Delta \tau_{cp}}. \quad (8)$$

7. Для пар ВС второй группы ставится задача минимума суммы R всех штрафов:

$$R_2 = \sum_{i=1}^{n_2} \min_{j=4,5} \begin{cases} c_{II} \frac{\llbracket T + \Delta t_i \rrbracket^2}{T}; \\ c_B \frac{\llbracket \Delta + \delta_i + \Delta \tau_i \rrbracket^2}{\Delta \tau_{cp}}. \end{cases} \quad (9)$$

8. В целом процесс прилета-вылета характеризуется следующей группой заданных параметров:

Δ – минимальное время между разрешением посадки и взлета, гарантирующее безопасность;

$\Delta \tau_{cp}$ – среднее время задержки вылета в результате конфликта интересов с прилетом;

n – число пар ВС, образующих две группы равной численности n_1 и n_2 ;

T – время ухода ВС на повторный заход.

Каждая i -я пара ВС характеризуется: t_i – время разрешения посадки; τ_i – время разрешения взлета; δ_i – модуль разности времен t_i и τ_i ; Δt_i – априорное время задержки посадки по одному ВС до оперативной коррекции потока; $\Delta \tau_i$ – априорное время задержки при вылете для аналогичных условий.

9. Штрафные функции оцениваемых и минимизируемых потерь при оперативной коррекции потока прилета – вылета содержат заданные коэффициенты:

c_B – коэффициент штрафа за задержку вылета при включенных двигателях;

$c_{П}$ – коэффициент штрафа за задержку прилета, $c_{П} > c_B$;

c_M – коэффициент штрафа за уменьшения свободных стоянок на перроне вследствие задержки их освобождения, а также за другие дестабилизирующие вылет факторы.

10. Процесс оперативной коррекции потока для каждой k -ей пары ВС считается независимым, то есть управляющие воздействия на каждом k -м шаге не влияют на воздействия других шагов. Таким образом, задача параметрического синтеза оперативной коррекции потока прилета-вылета состоит из n одношаговых независимых задач альтернативного выбора.

Требуется: при назначенном составе штрафных функций для каждой пары ВС осуществить выбор лучшего варианта задержки вылета или прилета, чтобы обеспечить минимум затрат топлива при обеспечении заданного уровня БП.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ АЛЬТЕРНАТИВ ПРИ ОПЕРАТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ПОТОКА ПРИЛЕТА-ВЫЛЕТА

Дадим аналитическую характеристику трем возможным вариантам воздействия на пару конфликтующих ВС в потоке прилет-вылет с целью обеспечения БП:

– задержать прилет в угоду вылета;

– задержать вылет в угоду прилету;

– задержать либо вылет, либо прилет в зависимости от конкретной величины требуемой задержки.

Для проведения количественных расчетов рассмотрим в качестве примера 10 пар конфликтующих ВС, каждая из которых характеризуется вектором своих параметров $[\delta_i, \Delta t_i, \Delta \tau_i]$, которые представлены в минутах в исходной табл. 1.

Таблица 1

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| δ_i | -4 | 2 | -3 | 1 | -4 | 5 | -1 | 4 | -2 | 3 |
| Δt_i | 30 | 5 | 10 | 20 | 35 | 15 | 0 | 25 | 40 | 45 |
| $\Delta \tau_i$ | 20 | 60 | 25 | 40 | 10 | 30 | 80 | 50 | 0 | 70 |

В табл. 1 в случайном порядке выбраны значения априорных задержек прилета Δt_i в диапазоне $[0, 45]$, вылета $\Delta \tau_i - [0, 45]$, времени между планируемыми посадкой и взлетом δ_i в пределах $[-4, 5]$ по 10 парам конфликтующих ВС. Общие исходные данные задачи следующие: $n = 10, \Delta = 10, c_B = 1, c_{П} = 3, c_M = 3, T = 15, \Delta \tau_{cp} = 10$.

По представленным случайным данным произведем альтернативный анализ трех упомянутых вариантов воздействия на конфликтующую пару ВС при условии обеспечения БП.

В качестве первого варианта примем задержки вылета в угоду прилету. Данный вариант может использоваться в период превышения интенсивности прилета по сравнению с очередью на

вылет. Очевидно, что в первую очередь необходимо удовлетворить запрос наиболее нуждающихся в посадке ВС, т. е. пары с наибольшими значениями Δt_i . Поэтому, расположив номера пар в порядке убывания Δt_i , произведем расчеты величины штрафа. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты анализа варианта задержки 1

| | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| <i>i</i> | 10 | 9 | 5 | 1 | 8 | 4 | 6 | 3 | 2 | 7 | $\Sigma = 3064,6$ |
| Δt_i | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 | |
| <i>J</i> | 3 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 5 | |
| R_1 | 688,9 | 6,4 | 25,6 | 67,6 | 400,6 | 260,1 | 202,5 | 102,4 | 518,4 | 792,1 | |

Задержки вылета с альтернативой $j = 3$ рассчитаны по формуле (7) для пар ВС с номерами (2, 4, 6, 8, 10), у которых, согласно табл. 1, величина $\delta_i > 0$. Для остальных пар с номерами (1, 3, 5, 7, 9) для расчета штрафа используется альтернатива $j = 5$ (9).

Во втором варианте приоритет предоставлен вылету. Здесь очевидно наличие чрезмерной очереди ВС на вылет. Аналогично первому варианту расположим в табл. 3 номера пар по мере убывания величины $\Delta \tau_i$. Альтернативой выбора управляющего воздействия в этом случае могут быть $j = 1, 2, 4$. Для пар ВС, имеющих $\delta_i < 0$ (1, 3, 5, 7, 9), единственной альтернативой является $j = 4$ (9), для остальных пар (2, 4, 6, 8, 10) приходится выбирать минимум штрафа для двух альтернатив $j = 1$ и $j = 2$ по формуле (7).

Таблица 3

Результаты анализа варианта задержки 2

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|
| <i>i</i> | 7 | 10 | 2 | 8 | 4 | 6 | 3 | 1 | 5 | 9 | $\Sigma = 3190$ |
| $\Delta t_i - \Delta \tau_i$ | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 25 | 20 | 10 | 0 | |
| <i>J</i> | 4 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| R_2 | 45 | 720 | 51 | 320 | 245 | 180 | 125 | 405 | 500 | 605 | |

В третьем варианте делается попытка отдать предпочтение одному из ВС пары в зависимости от величины задержки. Если $\Delta t_i - \Delta \tau_i > 0$, то задерживается вылет, и наоборот. Минимум штрафов будет возникать, если придерживаться логических правил:

$$j = \begin{cases} 2 \text{ при } \delta_i > 0 \\ 3 \text{ при } \delta_i > 0 \\ 4 \text{ при } \delta_i < 0 \\ 5 \text{ при } \delta_i < 0 \end{cases}$$

В табл. 4 представлены результаты анализа третьего варианта выбора воздействия.

Таблица 4

Результаты анализа варианта задержки 3

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|
| <i>i</i> | 9 | 5 | 1 | 3 | 6 | 4 | 10 | 8 | 2 | 7 | $\Sigma = 1813$ |
| $\Delta t_i - \Delta \tau_i$ | 40 | 25 | 10 | -15 | -15 | -20 | -25 | -25 | -35 | -80 | |
| <i>J</i> | 5 | 5 | 5 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 4 | |
| δ_i | < 0 | < 0 | < 0 | < 0 | > 0 | > 0 | > 0 | > 0 | > 0 | < 0 | |
| R_3 | 58 | 15 | 26 | 125 | 180 | 245 | 720 | 320 | 80 | 45 | |

Таким образом, выбор нужных решений в рассмотренных трех вариантах практически не требует сложных алгебраических вычислений «штрафов». При выборе вариантов решения используются простые логические операции. Между тем очевидно, что по мере убывания параметров Δt_i , $\Delta \tau_i$ и $(\Delta t_i - \Delta \tau_i)$ справедливость выбора по любому правилу падает, а «штраф» растет.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СУБОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА КОРРЕКТИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОТОК ПРИЛЕТА-ВЫЛЕТА С ПОМОЩЬЮ ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ

Используем соотношения (7) и (9) для вычисления штрафных функций R при одном существенном предположении – вынужденные задержки моментов взлета и освобождения ВПП после посадки в каждой паре не влияют на соседние пары с точки зрения обеспечения БП. В этом случае общий штраф – аддитивная функция слагаемых, каждое из которых минимизируется при выборе одной из альтернатив $j = 1, 2, 3, 4, 5$. Результаты расчетов параметрического синтеза представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты субоптимального параметрического синтеза

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | $\Sigma = 1760$ |
|-------|----|----|-------|-----|----|-----|----|-----|----|-------|-----------------|
| J | 5 | 1 | 5 | 2 | 5 | 2 | 4 | 2 | 5 | 3 | |
| R_4 | 26 | 80 | 102,4 | 245 | 15 | 180 | 45 | 320 | 58 | 688,9 | |

Результаты алгебраических вычислений функции «штрафа» R_4 представлены в нижней строке табл. 5. Их поочередное сравнение по каждой паре ВС со значениями рисков R_1, R_2, R_3 полученными выше, показывает, что

$$\Sigma R_4 \ll \min(\Sigma R_1, \Sigma R_2, \Sigma R_3).$$

В итоге суммарный показатель штрафа может быть на 10–15 % меньше аналогичных показателей в трех простых, но не оптимальных вариантах. При этом число задержанных прилетов и вылетов сбалансированно, а число ВС, отправленных на повторный заход, уменьшилось. Очевидно, что для наиболее полной и представительной статистической оценки преимуществ субоптимального подхода к решению конфликта интересов прилета и вылета необходимо увеличить число актуальных пар ВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Сформулирована математическая постановка задачи оперативной коррекции потока прилетающих и вылетающих воздушных судов на площади маневрирования и в районе аэродрома и предложено решение с помощью метода штрафных функций.

2. В выбранной форме штрафных функций учтены в качестве параметров разница времени взлета и освобождения ВПП после посадки каждой пары ВС, а также априорные задержки в выполнении рейсов. Возможно добавление и других параметров штрафных функций.

3. В целом результатом параметрического синтеза является гарантированное обеспечение БП при минимуме дополнительного расхода топлива и задержек.

4. Предложенный подход учитывает только безопасное влияние управляющих воздействий на соседние пары. Для более глубокой проработки данной задачи необходимо учесть последствия такого влияния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимальное управление и контроль безопасности поперечного движения воздушных и речных судов при пересечении их маршрутов // Новые технологии, мехатроника, автоматизация управления / Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк // Новые технологии, мехатроника, автоматизация управления. 2012. № 12. С. 50–53.

2. Лебедев Г.Н., Тин Пхо Джо. Автоматизированная система управления и контроля безопасности попутного и поперечного движения группы воздушных судов при заходе на посадку // Вестник Пензенского государственного университета. 2014. № 1. С. 72–80.

OPERATIVE CORRECTION OF ARRIVAL AND DEPARTURE FLOW OF AIRCRAFT AT THE AERODROME

Lebedev G.N., Malygin V.B.

The problem of optimal correction of the scheduled time of take-off and landing aircraft using a single runway (RW), in conditions of high air traffic intensity at which the probability of a conflict between the takeoff and landing reaches a critical value.

The efficient approach that allows to solve the problem of safety effectively using the method of "penalty" functions given the additional loss of fuel in case of delays of departure and arrival is proposed.

The advantages of the suboptimal solution compared to accept today as a "team" solution to the conflict of the departure and arrival aerodrome is shown.

Keywords: safety of flight control, optimal management, aircraft, parametric synthesis, penalty functions.

REFERENCES

1. Lebedev G.N., Malygin V.B., Tin Phone Chzho, Zo Min Taik. Optimal control and security control of the transverse movement of aircraft and sea vessels crossing their routes. New technologies, mechatronics, automation control. 2012. No. 12. Pp. 50–53.

2. Lebedev G.N., Tin Phone Chzho. Automated control system safety for associated motion and crossing motion while landing aircraft. Bulletin of Penza state University. 2014. No. 1. Pp. 72–80.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Георгий Николаевич, профессор кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), электронный адрес: kaf301@mai.ru.

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