
УДК-629.7.017.1+519.852

Система приоритетного обслуживания самолетов гражданской авиации при их заходе на посадку по заданной линии пути

Горбачев Ю.В., Тин Пхон Чжо, Рыбников С.И.

Решена задача вычисления динамических приоритетов на вход пассажирского самолета в заданный воздушный эшелон. При этом учтена возможность повышения этого приоритета при ограниченном запасе топлива.

Ключевые слова: контроль безопасности, оптимальное управление, летательные аппараты, динамическое программирование, функция риска.

Введение

В ряде важных практических случаев оживленного воздушного движения при подлете к аэродрому возникает необходимость принятия авиадиспетчерской службой ответственных решений по введению воздушных судов в каждый из разрешенных воздушных эшелонов, имеющих заданную линию пути, или в решении о временном отказе в обслуживании и команды об уходе на повторный круг. К таким случаям относится, в частности, ситуация внезапного изменения условий посадки на различные ВПП по метеорологическим или техническим причинам.

Другим случаем является приближение судов с аварийно низким запасом топлива или возможными техническими отказами борта, что требует внеочередного обслуживания при одновременном стремлении уступить им место судами с нормальным состоянием. Это означает, что в состав координат текущего состояния судна, помимо оценки его положения в пространстве должно входить, по крайней мере, значение оставшейся части топлива, необходимого на дополнительное маневрирование. Таким образом, естественно, указать в текущий момент времени очередность или приоритет в обслуживании каждого судна и последовательно вводить их в заданный эшелон, проверяя при этом возможность соблюдения гарантированной безопасности полета.

В данной работе этот подход предложено реализовать путем вычисления динамических приоритетов в виде некоторых количественных оценок, учитывающих удаленность воздушного судна от заданной трассы, ожидаемую его близость к судам, движущимся уже в эшелоне, а также от оставшегося запаса топлива. При этом, если очередной приоритет мал, то это означает существование такого риска несоблюдения безопасности совместного движения в эшелоне, при котором происходит отказ от попытки введения судна в эшелон и дается команда ухода на повторный круг.

Постановка задачи.

Рассмотрим решение задачи назначения динамических приоритетов при следующих допущениях:

1. Рассматривается задача введения воздушных судов на заданную линию пути, при их безопасном заходе на посадку, как это показано на *рис.1*.

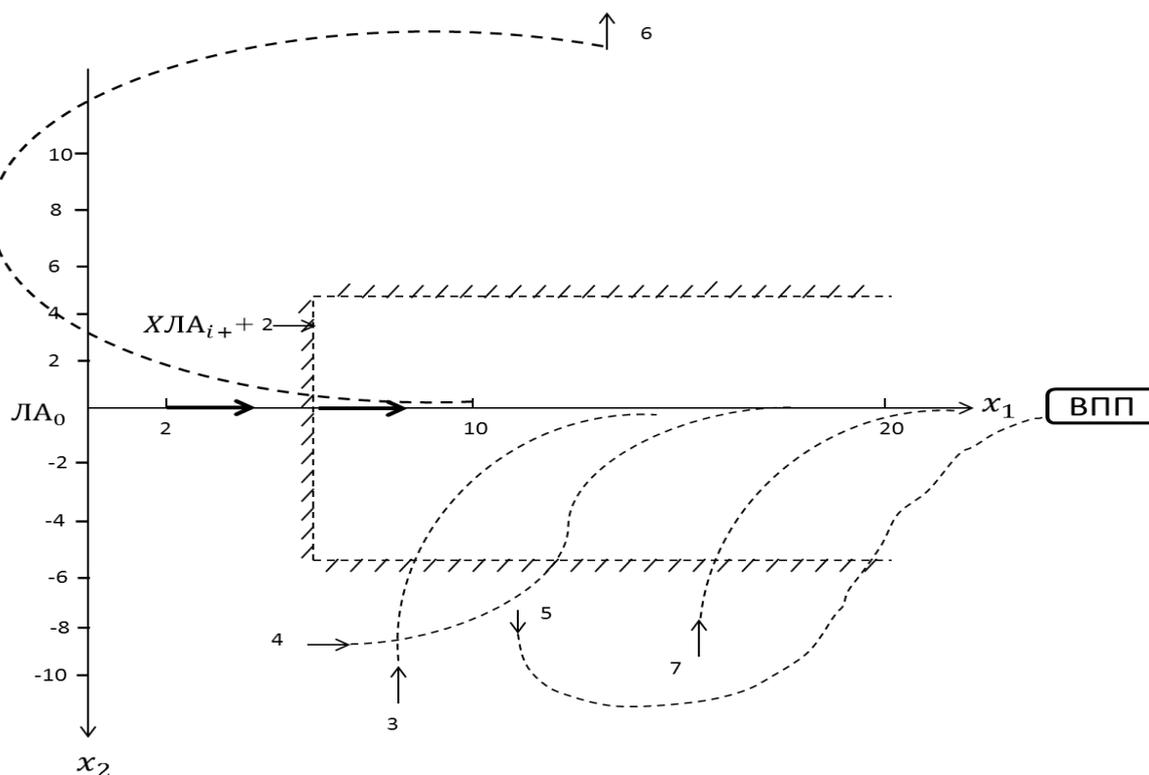


Рис. 1. Картина выведения воздушных судов на заданную линию попутного движения при заданной дистанции безопасности $\chi = 6$ км

При этом анализируется только горизонтальный полет на заданной постоянной высоте.

2. В данной работе решается задача управления полетом при одной заданной линии пути, поскольку полученные результаты легко рассматриваются на несколько линий пути при заданном множестве ВПП на различных соседних аэродромах.

3. Каждое судно (ЛА) характеризуется в текущий момент времени вектором состояния, характеризуемым 1 координатами-

- кратчайшим расстоянием x_1 от ЛА до линии пути;
- минимальным расстоянием x_2 до ближайшего в эшелоне судна, уже находящегося на заданной линии пути;
- потраченным запасом топлива x_4 , предусмотренным для выполнения дополнительных маневров, для обеспечения безопасных дистанций от соседних ЛА в эшелоне.

Каждая из трех координат x_1, x_2 – знакопеременная, координата x_4 неотрицательная.

4. В качестве постоянных параметров принимаются, как известные скорость полета V , максимальное допустимое боковое ускорение a при разворотах, минимальная дистанция r безопасного движения судов в эшелоне и запас топлива ΔU , отведенной на маневрирование и

определяющий оставшейся на последующие действия запас топлива как $(\Delta U - x_4)$. В частности, принято $V=0.1$ км/сек, $a=1$ м/сек*сек, $r=6$ км.

5. Принимаемое окончательное решение относится к одной из двух альтернатив ($j=1,2$)

- При $j=1$ принимается решение о введении ЛА в воздушный эшелон, если соответствующий ему риск невелик.

- При $j=2$ дается команда об уходе ЛА на повторный круг, если существует угроза возникновения аварийной ситуации в воздухе из-за опасного сближения судов.

6. Каждая из координат x_i текущего состояния ЛА меняется в соответствии с известными дифференциальными уравнениями движения, описывающими динамику полета. При этом для простоты каждой координате x_i соответствует одно дифференциальное уравнение. Эти дифференциальные уравнения имеют следующий вид.

Для координаты x_1 принято

$$\dot{x}_1 = \begin{cases} \frac{r - x_1}{0.5(T_1 + T_2)} & \text{при } j = 1 \\ -V & \text{при } j = 2 \end{cases} \quad (1)$$

В данной работе ориентировочно было принято $T_1=90$ сек, $T_2=180$ сек.

Формула (1) показывает, что при «втягивании» ЛА на линию пути воздушное судно аperiodически постепенно стремится обеспечить безопасную дистанцию r , при этом постоянная времени (T_1+T_2) аperiodического процесса есть время T_2 попадания ЛА на самую линию пути плюс время T_1 ускоренного движения по линии пути до точки (x_1+r) , имеющей безопасное расстояние r до соседнего ЛА₀ (см. рис.1)

Для координаты x_2 принято

$$\dot{x}_2 = \begin{cases} \frac{-x_2}{2T_2} & \text{при } j = 1 \\ \frac{-x_2}{2T_0} & \text{при } j = 2 \end{cases} \quad (2),$$

Где $T_0 > T_2$ – время движения ЛА на повторном круге.

В данной работе это время было принято равным $T_0=2\pi V \cong 600$ сек .

Расход топлива для обеспечения полета должен определяться с учетом того, что на самой линии пути изменение дистанции между летящими ЛА осуществится на форсированном режиме тяги двигателей, при этом расход увеличится в $(1+\lambda)$ раз, а «скорость догона» одного ЛА по отношению к соседнему ЛА будет лишь $V\lambda$. Поэтому в первом приближении можно записать

$$\dot{x}_1 = \begin{cases} \frac{w_0 (T_2 + (1+\lambda)T_1)}{T_0} & \text{при } j = 1 \\ w_0 & \text{при } j = 2 \end{cases} \quad (3),$$

где w_0 – заданная скорость расхода топлива в обычном режиме работы двигателя, в частности при уходе на повторный круг.

В данной работе принято $\lambda = 0.2$, что соответствует также повышению скорости полета по линии пути на 20% для увеличения безопасной дистанции.

7. Одним из наиболее важных допущений является выбор интегрального критерия оптимальности управления воздушным движением, который должен в свертке оценивать одновременно безопасность и экономичность полета. В данной работе в качестве такого критерия принят минимум интегрального функционала, который учитывает как штрафные нежелательные отклонения x_2 от линии пути и снижение дистанции x_1 между соседними ЛА на самой линии, так и опасные чрезмерные затраты топлива x_4 на маневрирование, что в целом позволяет предложить следующую модель критерия

$$I = \int_0^{t_k} f_0(\bar{x}_4, j) dt \rightarrow \min$$

$$f_0(j) = \begin{cases} \frac{k_1(r - x_1)^2}{r^2} + \frac{k_2 x_2^2}{r^2} + \frac{k_3 x_4}{\Delta V} & \text{при } j = 1 \\ l + k_3 \left(\frac{x_4}{\Delta V} + \frac{x_4^2}{\Delta V} \right) & \text{при } j = 2 \end{cases} \quad (4)$$

Поясним формулу (4). При $j=1$, т.е. при «втягивании» ЛА на линию пути, в каждый момент времени штрафуются квадрат отклонения $(r - x_1)^2$ от безопасной точки, квадрат отклонения x_2^2 от линии пути и относительный расход топлива $\frac{x_4}{\Delta V}$. Чем меньше эти слагаемые, тем лучше и тем быстрее ЛА войдет в эшелон с малыми затратами топлива.

Нужно сразу заметить, что правильность назначения самих весовых коэффициентов k_1, k_2, k_3 всегда вызывало дискуссию в теории и практике оптимального управления. В данной работе было принято пойти по пути неизменного достижения заданных гарантированных дистанций между ЛА безопасного движения, поэтому фактически штрафуются время, а значит израсходованное топливо для достижения нужной полетной ситуации, что очень важно.

При $j=2$ отклонения x_1 и x_2 от линии пути при полете по повторному кругу значения не имеют, но есть опасность пересечения полета с траекториями движения других судов.

Чем больше радиус $R=$ этого круга по сравнению с дистанцией r безопасного движения, тем хуже, поэтому функцию $f_0(j)$ введена величина L штрафов встречи с другими судами, равная

$$l \cong \frac{R}{r} = 2\pi \frac{V^2}{ar} \cong 1.5$$

Кроме того, ввиду большого времени полета по повторному кругу в формулу (4) введено дополнительное слагаемое $\frac{k_3 x_4^2}{\Delta V^2}$, имеющее существенную поправку при $x_4 \rightarrow \Delta V$

8. Отдельно заметим, что фактически штраф за пересечение траекторий полета пока не рассматривается, а учитывается лишь в среднем значении L . Затем в полученных ниже выводах

предлагается при фактической встрече двух судов нужным образом понижать динамический приоритет этой пары и проводить планирование полетов повторно.

Решение задачи назначения динамических приоритетов

при движении судов параллельным курсом с заданной линией пути

В рассматриваемом случае координата $x_3 = 0$.

Решение начнем с записи уравнения Беллмана для двух альтернатив $j=1,2$, пользуясь заданными соотношениями (1-4) и задавшись следующей аппроксимацией Беллмана S в виде степенного полинома [1].

$$S = \alpha + \beta_1 x_1 + \gamma_1 \frac{x_1^2}{2} + \beta_2 x_2 + \gamma_2 \frac{x_2^2}{2} + \beta_3 x_3 + \gamma_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \gamma_4 \frac{x_4^2}{2} + \psi_{12} x_1 x_2 \quad (5)$$

$$\psi_{13} x_1 x_3 + \psi_{14} x_1 x_4 + \psi_{23} x_2 x_3 + \psi_{24} x_2 x_4 + \psi_{34} x_3 x_4$$

Тогда нужные частные производные будут равны

$$\frac{\partial S}{\partial x_1} = \beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{14} x_4; \quad \frac{\partial S}{\partial x_2} = \beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{24} x_4;$$

$$\frac{\partial S}{\partial x_4} = \beta_4 + \gamma_4 x_4 + \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2$$

где $\beta_i, \gamma_i, \psi_{ik}$ - искомые коэффициенты, которые необходимо определить. Представляя эти производные и известные соотношения (1-4) и (5) в условие оптимальности, можно получить

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = \min_{j=1,2} \{F_j(x_1, x_2, x_4)\} \quad (6)$$

где функции риска при $j = 1$ и $j = 2$ равны:

$$F_1 = \frac{k_1(r - x_1)^2}{r^2} + \frac{k_2 x_2^2}{r^2} + \frac{k_3 x_4}{\nabla v} + \frac{r - x_1}{0.5(T_1 + T_2)} (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{14} x_4) -$$

$$- \frac{x_2}{0.5T_2} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{24} x_4) + \frac{w_o}{T_o} [T_1(1 + \lambda) + T_2] (\beta_4 + \gamma_4 x_4 + \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2)$$

$$F_2 = l + k_3 \left(\frac{x_4}{\nabla v} + \frac{x_4^2}{\nabla v^2} \right) - v (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{14} x_4) - \frac{x_2}{0.5T_o} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{24} x_4)$$

$$+ \psi_o (\beta_4 + \gamma_4 x_4 + \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2)$$

(7)

Вычислим теперь ординаты риска в различных полетных ситуациях, чтобы затем приравнять их друг другу и получить необходимые оценки коэффициентов $\beta_i, \gamma_i, \psi_{ik}$ [2]. Начнем сначала с тех ситуаций, в которых очевиден уход на повторный круг, т.е. $j = 2$. Взяв в качестве рабочей точки некоторое состояние, соответствующее условию $x_{1p} = 0.5r; x_{2p} = 1.5r; x_{4p} = 0.35\nabla v$ и задавшись необходимыми отклонениями, получим, что этими ординатами являются функции $C_1^-, C_{14}^-, C_{12}^+, C_4^-, C_{24}^{+-}$, найденные с помощью F_2 . Например, ордината C_1^- вычисляется так

$$C_1^- = \min_j \{F_j\} = F_2 \begin{pmatrix} x_1 = 0.5r \\ x_2 = x_{2p} \\ x_4 = 0.35\nabla v \end{pmatrix} = l + k_3 0.72 - v(\beta_1 + \gamma_1 \frac{r}{2} + \psi_{12} 1.4r + \psi_{14} 0.35\nabla v) - \\ - \frac{1.4r}{0.5T_o} (\beta_2 + \gamma_2 1.4r + \psi_{12} \frac{r}{2} + \psi_{24} 0.35\nabla v) + w_o (\beta_4 + \gamma_4 0.35\nabla v + \psi_{14} \frac{r}{2} + \psi_{24} 1.4r)$$

Приравнивая эти ординаты друг другу и ординате C_o , можно убедиться

$$\psi_{12} = \psi_{24} = 0; \gamma_1 = \frac{w_o}{v} \psi_{14}; \gamma_2 = -\frac{\beta_2}{3x_{2p}}; w_o \gamma_4 = v \psi_{14} - \frac{(1+m)k_3}{\nabla v} \quad (8)$$

При этом ордината C_1^- , которая далее нам понадобится, равна при

$$k_1 = k_2 = k_3 = 1$$

$$C_1^- = w_o \beta_4 - v \beta_1 - 0.17v \beta_2 + l \quad (9)$$

Теперь рассмотрим полетные ситуации, в которых очевидно решение войти в эшелон. Для этого вычислим ординаты риска C_o, C_1^+, C_4^+, C_2^- аналогичным выше способом, только пользуясь теперь функций F_1 . Например, ордината риска C_1^+ вычисляется так при $k_1 = k_2 = k_3 = 1$

$$C_1^+ = \min \{F_j\} = F_1 \begin{pmatrix} x_1 = r \\ x_2 = 1.4r \\ x_4 = 0.35\nabla v \end{pmatrix} = 0.67 - 0.6v \beta_2 + 0.3w_o \beta_4 + \frac{v^2}{a} \psi_{14} w_o \quad (10)$$

Приравнивая новые ординаты риска друг другу получим окончательные оценки при $k_1 = k_2 = k_3 = 1$

$$\beta_1 v = 1 + 0.56l; \beta_2 v = 0.7 - 0.4l; \psi_{14} \frac{v^2}{a} w_o = -0.5; w_o \beta_4 = 1.4r - 0.36l \quad (11)$$

Это позволяет в конце концов вычислить функции риска F_1 и F_2 аналитически, если ввести следующие дополнительные безразмерные переменные:

$$y_1 = \frac{x_1}{r}; y_2 = \frac{x_2}{r}; y_4 = \frac{x_4}{\nabla v}$$

Тогда получим :

$$\begin{aligned} F_1 &= 1.4 - 1.45y_1 + 1.07y_1y_4 - 0.266y_2^2 - 2.8y_4 \\ F_2 &= 0.54 - 0.35y_4 + 0.006y_2^2 \end{aligned} \quad (12)$$

Эти формулы можно интерпретировать графически, представив на рис.2 функцию переключения $\nabla F = F_1 - F_2$ в зависимости от трех координат y_1, y_2, y_4 .

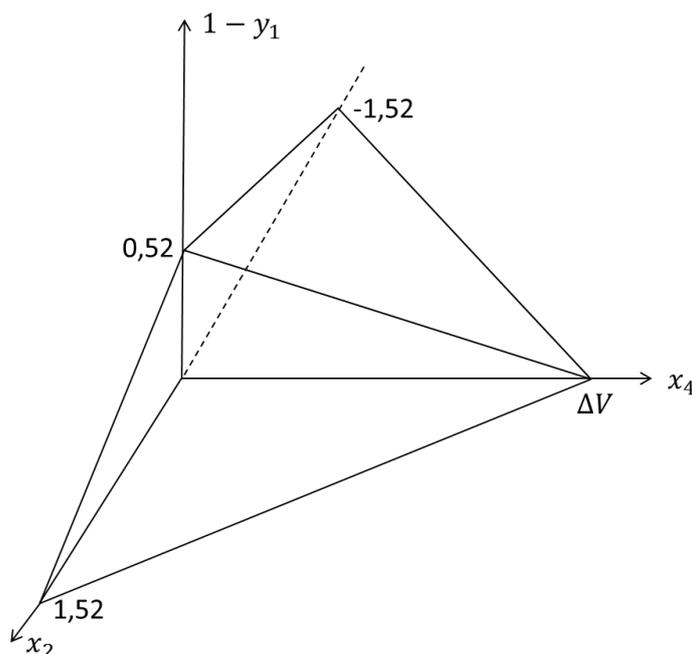


Рис. 2. Функция переключения альтернатив принятия решений в виде призмы, внутри которой оптимальной является альтернатива о вхождении в воздушный эшелон

Из рисунка видно, что область выбора альтернативы о входе ЛА в воздушный эшелон в первом приближении имеет вид призмы, т.е. при малых отклонениях и малом расходе топлива лучше придерживаться этой альтернативе.

Выводы

1. Предложен удобный для расчетов подход аналитической оценки динамических приоритетов воздушных судов при заходе на посадку, позволяющий их ранжировать и последовательно вводить в план выхода на заданную линию пути.

2. Найденные формулы позволяют учесть не только положение судна в пространстве, но и его запасы топлива и техническое состояние в процессе ранжирования.

3. Найденные численные значения коэффициентов в формулах (16) могут вызвать возможную критику и потребовать внесения определенных корректив. Они были получены с помощью формул вычисления времен T_0 , T_1 и T_2 , рассчитанных из условия максимального быстрогодействия системы управления воздушным судном

$$T_0 = \frac{2\pi R}{V} = \frac{2\pi V}{a}; \quad T_1 = \frac{r - x_1 + \frac{x_2}{4V} \cdot \sqrt{ax_2}}{\lambda V}; \quad T_2 = 2\sqrt{\frac{x_2}{a}} \quad (13)$$

Однако эти коррективы принципиально ничего не изменят в главном – с помощью уточненной, но опять-таки компактной аналитической формы (16), удобной для расчетов, будет найдена функция предпочтения между судами для каждой линии пути. Это позволит определить порядок последовательного планирования траекторий входа судов в нужный воздушный эшелон как без учета на начальном этапе возможных пересечений траекторий, так и на заключительном этапе – с учетом этого.

4. Современные компьютерные средства позволяют практически в реальном масштабе времени осуществить перепланирование воздушного движения при изменении технического состояния бортов и наземной метеорологической обстановки. Предложенный подход обеспечит автоматизированную поддержку действия авиадиспетчерской службы при заходе на посадку.

Литература

1. Беллман Р. Динамическое программирование. М., ИИЛ, 1961
2. Лебедев Г.Н., Чан Ван Туен, Китаев А.Н. Совместное управление и контроль безопасности полета воздушных судов при их сближении. М., Вестник МАИ, 2011, т. 18, №3, с. 29-35.

Сведения об авторах

Горбачев Юрий Васильевич, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.,

тел. 8(903) 793-0368.

Тин Пхон Чжо, докторант Московского авиационного института (национального исследовательского университета) к.т.н.,

тел. 8(925)046-0630; e-mail: thtweaung@gmail.com

Рыбников Сергей Игоревич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., профессор, тел.: 8 (499)-158-41 82; e-mail: kaf301@mai.ru