

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ БЕСКОНФЛИКТНОГО ПОТОКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

С.В. Петренко, С.Н. Прокофьев, А.В. Яковлев

*ГОУ ВПО «Липецкий государственный педагогический университет»; Войсковая часть 62632, г. Липецк;
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

Рецензент д-р техн. наук, профессор В.Е. Дидрих

Ключевые слова и фразы: аналитическая модель формирования бесконфликтного потока воздушных судов; критерий минимизации времени маневрирования; система поддержки принятия решений.

Аннотация: Предложена аналитическая модель формирования бесконфликтного потока воздушных судов по критерию минимизации времени маневрирования в воздушном пространстве аэродрома, на основе которой создан функциональный модуль для системы поддержки принятия решений группы лиц руководства полетами. Обоснованы преимущества применения подобной модели для описания динамических процессов взаимодействия компонентов сложных человеко-машинных систем при организации воздушного движения.

Введение. Организация потоков воздушного движения (**ОрВД**) представляет собой деятельность по формированию безопасных, упорядоченных и ускоренных потоков воздушного движения для обеспечения максимально возможного использования пропускной способности органа ОрВД и соответствия объема воздушного движения пропускной способности, заявленной соответствующим органом ОрВД. Деятельность по организации потоков воздушного движения осуществляется центрами ЕС ОрВД во взаимодействии с органами ОрВД.

Воздушное движение потоков летательных аппаратов организуется, планируется и подвергается управлению путем выполнения целой совокупности упорядоченных операций. К ним относятся повторяющиеся пе-

Петренко Сергей Владимирович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой математических методов в экономике, ГОУ ВПО «Липецкий государственный педагогический университет»; Прокофьев Сергей Николаевич – войсковая часть 62632, заместитель командира части по НИР, г. Липецк; Яковлев Алексей Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и защита информации», e-mail: yava73@bk.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

риодически операции, образующие основной смысл организации, планирования и управления движением летательных аппаратов. Действительно, в большей части случаев сначала осуществляется расчет траекторий и планов полетов каждого летательного аппарата в потоке исходя из установленных норм безопасного эшелонирования с учетом требований экономичности и регулярности движения.

Программа движения, включающая траекторию и время полета определенных пунктов маршрута, известна как экипажу, так и диспетчеру управления воздушным движением (УВД). Каждый летательный аппарат выполняет полет в соответствии с заданной программой с помощью бортового навигационно-пилотажного оборудования. При этом ход выполнения программы полета контролируется с земли диспетчером УВД. В силу ограниченной точности бортовых средств самолетовождения, возможных ошибок экипажа или возникновения непредвиденных обстоятельств (изменения метеоситуации, нарушений планов полета по задержкам вылетов, технических сбоев и других причин) действительный полет летательного аппарата может существенно отклоняться от программы. Подобные отклонения могут привести к нарушению норм безопасного эшелонирования, значительным экономическим потерям и нарушениям регулярности. В таких условиях диспетчеру УВД необходимо принять решение либо о пересмотре программы движения значительной части летательных аппаратов в потоке, либо о выработке корректирующих команд, выполнение которых привело бы к восстановлению первоначальной программы движения.

Для правильного принятия решения необходимо осуществить оценку сложившейся ситуации, просчитать возможные исходы при тех или иных действиях экипажа и выбрать наиболее предпочтительные из них, выработать и подать соответствующие команды экипажам. Все эти операции необходимо провести за короткий промежуток времени так, чтобы в процессе полета успеть предотвратить опасные сближения, попадания летательных аппаратов в области опасных метеоявлений, возникновение других осложнений воздушной обстановки. Для выполнения всей совокупности перечисленных и большого числа сопутствующих и обеспечивающих операций необходима совершенная система управления воздушным движением. Качество работы такой системы определяется степенью надежности выполнения всех требований безопасности полета, эффективностью использования воздушного пространства, пропускной способностью зон УВД и другими показателями, включающими учет регулярности и экономичности при управлении воздушным движением.

Четкость и ритмичность работы системы УВД, а также основные качества ее работы в настоящее время ставятся в прямую зависимость от степени автоматизации процессов, выполняемых при УВД.

Принимая во внимание основную цель системы УВД, можно говорить о целесообразности автоматизации процессов управления для повышения пропускной способности зон УВД. Однако для более точного обоснования главного смысла автоматизации процессов управления необходимо заметить, что пропускная способность зон УВД, а вместе с ней и эффективность использования воздушного пространства будут повышены лишь тогда, когда основные мероприятия будут направлены на совершенствова-

ние организации воздушного движения и непосредственного управления, сдерживающих пропускную способность системы УВД.

Во многом необходимость автоматизации процессов управления воздушным движением в целях установления и поддержания безопасного, упорядоченного и эффективного потока воздушного движения на всех этапах полета определяет стохастический характер воздушного движения. Синхронизация движения воздушных судов осуществляется как наземным, так и бортовым компонентами ОрВД с участием как экипажей воздушных судов, так и диспетчеров и представляет собой гибкий механизм управления пропускной способностью.

Диспетчер (оператор) оценивает состояние объекта или системы, судит о характере отклонений в контролируемом воздушном пространстве, принимает решения относительно наиболее эффективного воздействия на объект, контролирует результаты своих действий, планирует операции и др. Построение и совершенствование системы отображения информации направлены на облегчение таких операций, как обнаружение, опознание и оценка информации. Уровень ответственности и сложности деятельности диспетчера, а следовательно и основные требования к организации его профессиональной деятельности определяются особенностями оперативного управления, характеристиками применяемых средств автоматизации, а также центральным местом диспетчера в иерархической системе управления воздушным движением. Одним из важнейших направлений развития средств автоматизации является улучшение показателей деятельности диспетчера (оператора) УВД, уменьшение времени решения возникающих задач, связанных со стохастическим характером структуры воздушного движения.

Необходимость управлять процессом оптимально возникает в системе УВД в силу изменения характеристик системы во времени под влиянием управлений. Состояние системы может быть в любой момент времени определено вектором \bar{X} n -мерного векторного пространства с координатами $\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, где $\bar{X} \in X$, X является пространством состояния системы, а элементы x_1, x_2, \dots, x_n – переменными состояниями системы. Так как система изменяется во времени, то ее поведение можно описать последовательностью состояний $\bar{X}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$, которую называют траекторией системы. Независимая переменная t (в случае регулярного, нестационарного процесса – время) является аргументом процесса. Изменение состояния системы, то есть процесс в ней, происходит под воздействием управляющих воздействий. Систему управления воздушным движением представим в виде системы, в которой управляющие воздействия моделируются с помощью элементов m -мерного векторного пространства U :

$$\bar{U} = (u_1, u_2, \dots, u_m), \quad \bar{U} \in U \subset R_m. \quad (1)$$

В случае осуществления полетов и обслуживания воздушного движения по плану (стационарный процесс), управляющие воздействия могут задаваться в виде функций от t , тем самым реализуется определенный способ управления системой. В этом случае предполагается задание програм-

мы управления $\bar{U}(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t))$. При этом на возможные (допустимые) состояния системы $\bar{X}(t)$ и управления $\bar{U}(t)$ могут быть наложены ограничения. Ограничения на состояние системы и управление запишем в виде:

$$\bar{X} \in X \subset R_n, \bar{U} \in U \subset R_m, \quad (2)$$

где X, R_n, U, R_m – пространства с размерностями n и m соответственно.

Вектор \bar{V} , образованный парой функций $(\bar{X}(t), \bar{U}(t))$, назовем процессом с допустимым пространством V размерности $n + m$. Между функциями $(\bar{X}(t), \bar{U}(t))$ имеется связь: как только задано управление $\bar{U}(t)$ системой, то последовательность ее состояний (траектория системы) $\bar{X}(t)$ определяется однозначно. Связь между $\bar{X}(t)$ и $\bar{U}(t)$ моделируется по-разному, в зависимости от того, является система непрерывной или дискретной. В силу дискретного характера системы управления воздушным движением модель системы управления воздушным движением имеет вид системы разностных уравнений:

$$x_i(t+1) = f_i(t, x_1(t), \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t)), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

В векторной форме эту модель представим в виде

$$\bar{X}(t+1) = \bar{f}(t, \bar{X}(t), \bar{U}(t)) \quad (4)$$

или

$$x_i(t+1) = f_i(t, \bar{X}(t), \bar{U}(t)), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

Начальное значение $\bar{X}(0)$ будем считать известным. В дискретной системе задание программы управления $\bar{U}(t)$ при $t = 0, 1, 2, \dots, T-1$ позволяет однозначно определить соответствующую ей траекторию системы. При подстановке значения $\bar{U}(t)$ в правую часть (5) получаем систему уравнений, которая позволяет при известном значении состояния $\bar{X}(t)$ в момент времени t определить состояние $\bar{X}(t+1)$ в следующий момент времени. Так как в начальный момент $t = 0$ состояние $\bar{X}(0)$ известно, то, подставив его в правую часть (5), получим

$$\bar{X}(1) = \bar{f}(0, \bar{X}(0), \bar{U}(0)). \quad (6)$$

Подставляя затем найденное значение $\bar{X}(1)$ и $t = 1$ в (5), так же найдем значение $\bar{X}(2)$. Продолжая этот процесс, через T шагов получим последнее искомое значение $\bar{X}(T)$. Таким образом, уравнения модели (5) позволяют однозначно определить траекторию системы $\bar{X}(t)$, если задано управление $\bar{U}(t)$, при этом процесс $\bar{V} = (\bar{X}(t), \bar{U}(t))$ должен удовлетворять следующим ограничениям.

1. Процессы $\bar{X}(t) \in X, \bar{U} \in U$ или $\bar{V} = (\bar{X}(t), \bar{U}(t)) \in V$ протекают при всех $0 \leq t \leq T$.

2. Пара $(\bar{X}(t), \bar{U}(t))$ удовлетворяет системе уравнений в дискретной модели при $t = 0, 1, 2, \dots, T - 1$.

3. Заданы начальные условия $\bar{X}(0)$.

Задачи, решаемые системой УВД, можно разделить на два класса: текущее планирование, то есть программирование движения ВС, и управление по траекториям текущего плана, то есть регулирование движения относительно программных траекторий.

Задачи первого класса относятся к детерминированным задачам построения оптимальных программ движения ВС [1], усложненных ограничениями на фазовые координаты, которые обусловлены требованиями обеспечения безопасности воздушного движения. В процессе регулирования движения ВС относительно программных траекторий необходимо оценивать реальные траектории и синтезировать оптимальные управляющие воздействия.

Дифференциальные уравнения, описывающие движение одиночного ВС, могут быть записаны в следующей векторной форме

$$\dot{X} = f(x, u, t), \quad (7)$$

где $X^T = |x_1, x_2, \dots, x_n|$ – вектор состояния ВС; $f^T = |f_1, f_2, \dots, f_n|$ – векторная нелинейная функция; $u^T = |u_1, u_2, \dots, u_n|$ – вектор управляющих воздействий.

Вектор управляющих воздействий $u(t)$ является свободным, и его выбор определяет решение уравнения (7). Среди допустимых управляющих воздействий $u(t)$ всегда можно выбрать $u^0(t)$, при котором частное решение $X^{0T} = |x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0|$ удовлетворяет граничным условиям и ограничениям. Такое частное решение называется программным, а если оно обеспечивает экстремум критерию оптимальности, то оптимальным программным движением ВС.

Необходимо отметить, что во многих случаях некоторые компоненты вектора X^0 известны априори, например схема трасс в районах управления и схемы стандартных траекторий захода на посадку и взлета в зонах взлета и посадки, что существенно уменьшает размерность задачи и упрощает ее решение для одиночного ВС. Но задача усложняется тем, что некоторые ограничения на координаты не являются постоянными, а обусловлены движением других ВС, находящихся в зоне управления:

$$|x_i - x_j| \geq M_{ij}; \quad ij = \overline{1, N}; \quad i \neq j, \quad (8)$$

где $M_1^T = |M_{1П}, M_{1Б}, M_{1В}|$ – вектор норм пространственного разделения (норм эшелонирования) в продольном, боковом направлениях и по высоте.

Ограничения (8) должны удовлетворяться для пересекающихся интервалов времени $[t_{0i}, t_{ki}] \cap [t_{0j}, t_{kj}] \neq 0$ всех ВС, для которых строятся программы движения. Область M определения уравнения (7) налагает ограничения на вектор управляющих воздействий $u(t)$ в соответствии с летно-техническими характеристиками ВС и на величины координат, обусловленные пространственными ограничениями в зоне:

$$|u| \leq u_g; \quad |x| \leq x_g, \quad (9)$$

где компоненты векторов u_g и x_g – заданные положительные числа или функции.

Одним из наиболее часто применяемых критериев оптимальности является минимизация времени пребывания ВС в зоне управления

$$J_T = \sum_{i=1}^n \Delta t = \min. \quad (10)$$

Вариационная задача минимизации функционала (10) называется задачей оптимального быстрогодействия. Задача оптимального быстрогодействия применительно к системе УВД в зоне подхода рассматривалась в ряде работ [2–5]. При постоянной скорости полета и отсутствии ветра оптимальная траектория для плоского движения состоит из последовательности прямолинейных участков и сопряженных с ними дуг окружностей минимально допустимого радиуса [3].

Модель функционирования системы УВД относительно поставленной цели исследования представляет собой композицию управляющих воздействий различных уровней системы и имеет вид

$$Y\{x_i\} \in \Omega, \quad (11)$$

где $\{x_i\}$ – множество управляемых параметров системы УВД всех уровней управления; Ω – область, описывающая цель.

Различают «стратегические» и «оперативные» управляющие воздействия. Первые иллюстрируют цель, на достижение которой направлена деятельность системы на некотором отрезке времени $[0; T]$, и имеет вид (11). «Оперативное» управляющее воздействие содержит упорядоченную по времени последовательность действий специалистов по УВД, результат которых обеспечивает достижение поставленной цели в периоде $[0; T]$, и имеет вид

$$x_i(t): \int_0^T Y\{x_i(t)\} dt \in \Omega. \quad (12)$$

Одной из наиболее распространенных моделей оперативного управления является задача линейного программирования, состоящая в минимизации (максимизации) некоторого критерия эффективности управления Z , являющегося линейной функцией от управляемых параметров системы, при ограниченных ресурсах управления:

$$\begin{cases} Z = \sum_{i=1}^N c_i x_i \rightarrow \min; \\ AX \leq B, \end{cases} \quad (13)$$

где X – вектор управляемых параметров системы; C – вектор временных задержек при выполнении маневрирования; B – вектор ограничений; A – матрица технологических коэффициентов, показывающая расход ресурсов на выполнение определенного управляющего воздействия.

Область применения задач линейного программирования чрезвычайно широка, чаще всего решается задача минимизации издержек при ограниченных ресурсах. Поэтому за вектор X может приниматься совокупность воздушных судов, за вектор C – временные задержки при выполнении маневрирования в воздушном пространстве района аэродрома, и накладывается дополнительное условие неотрицательности на вектор X . Ограничения, имеющиеся в задаче, обусловлены следующими факторами:

- 1) ограниченность запаса топлива на борту воздушного судна;
- 2) ограниченность маневренных характеристик воздушного судна (крен ВС);
- 3) ограниченность пропускной способности предпосадочной прямой и взлетно-посадочной полосы;
- 4) ограниченность набора стандартных траекторий для выполнения захода на посадку ВС;
- 5) необходимость выполнения посадки воздушного судна вне очереди.

При решении поставленной задачи для конкретных случаев получают управления, состоящие в определении времени задержки и маневра для вида воздушного судна, при которых минимизируется суммарное время задержек ВС.

Список литературы

1. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин. – М. : Наука, 1976. – 392 с.
2. Автоматизация процессов управления воздушным движением / Г.А. Крыжановский [и др.]. – М. : Транспорт, 1981. – 400 с.
3. Анодина, Т.Г. Основные проблемы управления воздушным движением и их решение методом полунатурного моделирования / Т.Г. Анодина, В.И. Мокшанов, В.П. Батищев // Вторая Всесоюз. науч.-практ. конф. по управлению воздушным движением : тез. докл. / Воен.-воздуш. инженер. акад. им. Н.Е. Жуковского. – М., 1983. – 112 с.
4. Мокшанов, В.И. Оптимизация процесса управления воздушным движением в районе аэродрома / В.И. Мокшанов, О.Н. Назимов // Материалы Всесоюз. науч.-техн. конф. по проблемам создания и внедрения новой международной системы посадки самолетов / Гос. науч.-исслед. ин-т гражд. авиации. – М., 1981. – С. 104–111.
5. Унгуриян, С.Г. Анализ и моделирование систем управления воздушным движением / С.Г. Унгуриян, Е.Д. Маркович, А.И. Волевач. – М. : Транспорт, 1980. – 208 с.

Analytical Model of the Formation of Conflict- Free Flow of Aircraft

S.V. Petrenko, S.N. Prokofiev, A.V. Yakovlev

*Lipetsk State Teachers' Training University; Military Unit 62632,
Lipetsk; Tambov State Technical University, Tambov*

Key words and phrases: analytic model of conflict-free flow of aircraft; criterion of minimizing the maneuvering time; decision support system.

Abstract: The paper proposes the analytical model of conflict-free flow of aircraft on the criterion of minimizing the maneuvering time in the airspace of the aerodrome; on the basis of which a functional module for decision support systems of flight management. The advantages of this model for the description of dynamic processes of interaction between components of complex human-machine systems for air traffic management are explained.

© С.В. Петренко, С.Н. Прокофьев, А.В. Яковлев, 2011