

# ПРЕДСКАЗАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

**В. Ю. Киселев<sup>а</sup>**, аспирант

**А. А. Монаков<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** одним из способов, повышающих эффективность и безопасность воздушного транспорта, является предсказание траекторий воздушных судов, позволяющее эффективно решать такие задачи автоматизированных систем управления воздушным движением, как обновление и коррекция плановой информации по результатам радионавигационного наблюдения, среднесрочное обнаружение потенциально опасных ситуаций, оптимизация очередей взлета и посадки воздушных судов, назначение воздушным судам кодов вторичной радиолокации. **Цель исследования:** разработка и оценка точности средств предсказания для моделирования четырехмерных траекторий воздушных судов. **Методы:** имитация работы бортовой системы автопилотирования воздушного судна. При моделировании траектории полета полагается, что воздушное судно выполняет полет строго по заданному маршруту, соблюдая при этом оптимальные для воздушного судна режимы полета во время взлета, движения по трассе и посадки. Предложенный подход основывается на рекомендациях, сформулированных в технических требованиях Европейской организации по безопасности воздушной навигации. **Результаты:** описаны основные положения синтеза средств предсказания траекторий воздушных судов для задач управления воздушным движением. Построен высотно-скоростной профиль полета, который позволяет оценить параметры движения воздушного судна в любой точке маршрута. Работоспособность алгоритмов продемонстрирована на примере моделирования реального полета с последующей оценкой отклонения рассчитанного высотно-скоростного профиля полета от реального, а также сравнения расчетного и фактического времени прибытия в аэропорт назначения. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при разработке программного обеспечения современных автоматизированных систем управления воздушным движением для прогнозирования четырехмерных траекторий воздушных судов.

**Ключевые слова** — управление воздушным движением, воздушное судно, предсказание траектории, моделирование полета.

## Введение

Совершенствование автоматизированных систем управления воздушным движением (АС УВД) определяет необходимость разработки и применения программных средств предсказания траекторий воздушных судов (ВС) [1, 2]. Под предсказанием траектории (ПТ) понимается расчет времени прохождения ВС последовательных точек маршрута, соответствующих высот и скоростей от начала и до окончания полета на основании данных плана полета. Средства ПТ наземного базирования используются при решении следующих задач управления воздушным движением (УВД) [1, 2]:

- 1) распределение информации о ходе полетов по рабочим местам диспетчеров секторов УВД;
- 2) определение загрузок секторов воздушного пространства для подсистемы планирования полетов;
- 3) корреляция текущих планов полетов с соответствующими системными траекториями ВС, которые генерируются в подсистеме траекторных наблюдений АС УВД;
- 4) определение времени прохождения ВС точек маршрута прибытия и времени посадки ВС на заданные взлетно-посадочные полосы;

5) определение времени прохождения ВС точек маршрута взлета с учетом существующих очередей на взлет и посадку;

6) среднесрочное обнаружение потенциально опасных и конфликтных ситуаций в контролируемом АС УВД воздушном пространстве.

Применение ПТ способствует повышению безопасности воздушного движения и эффективности использования воздушного пространства, сокращению частоты авиационных происшествий, увеличению пропускной способности аэропортов и сокращению задержек отправления и прибытия ВС.

Настоящая статья посвящена вопросам синтеза, использования и оценки точности программных средств (ПС) ПТ в соответствии с рекомендациями Европейской организации по безопасности воздушной навигации EUROCONTROL (*European Organization for the Safety of Air Navigation*). Впервые применение ПСПТ (*Trajectory Prediction Advance Tool*) было предложено EUROCONTROL в конце 90-х гг. при разработке облика перспективной системы АС УВД в рамках проекта PHARE (*Programme for Harmonised ATM Research in EUROCONTROL*) [1]. В этом проекте ПСПТ были названы в числе основных сервисов, необходи-

мых для эффективной работы других составных частей АС УВД нового поколения. В окончательном виде требования к ПСПТ были сформулированы в технической спецификации [2].

### Программные средства предсказания траектории ВС

При проведении расчетов четырехмерной траектории ВС принято рассматривать в последовательном прохождении следующих этапов полета [1, 3].

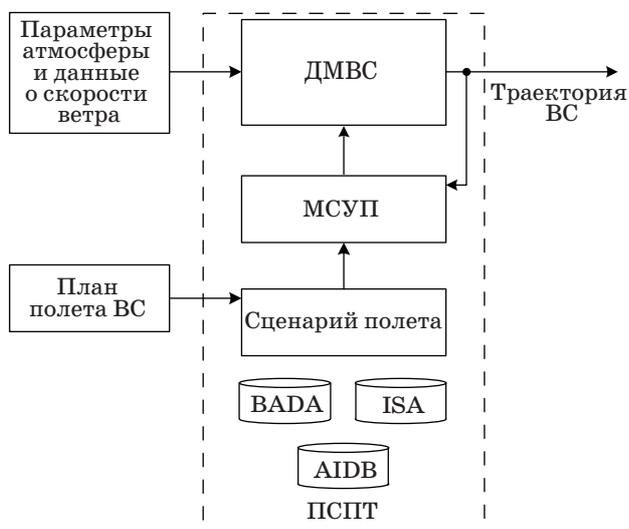
1. Взлет и набор высоты — этап полета, на котором происходит отрыв ВС от взлетно-посадочной полосы, существенное увеличение высоты и выход на заданную высоту (эшелон).

2. Крейсерский этап — движение на эшелоне, назначенном в плане полета.

3. Снижение и посадка — этап полета, на котором происходит существенное уменьшение высоты полета и приземление ВС на взлетно-посадочную полосу.

Программные средства предсказания траектории (рис. 1) [4] включают в себя динамическую модель ВС ДМВС и модель системы управления полетом МСУП. ПСПТ сопрягаются со следующими источниками информации и базами данных:

- 1) плановой подсистемой (*Flight Data Processing System*);
- 2) системой наблюдения за воздушным пространством (*Surveillance Data Processing System*);
- 3) метеорологическим сервером;
- 4) базой летно-технических характеристик ВС (*Base of Aircraft Data — BADA*);
- 5) аэронавигационной базой данных (*Aeronautical Information Data Base — AIDB*);



■ Рис. 1. Структурная схема ПСПТ с источниками входных данных

6) моделью международной стандартной атмосферы (*International Standard Atmosphere — ISA*).

Дадим краткую характеристику перечисленных источников информации и баз данных. По мере изложения материала эти сведения будут уточняться.

Плановая подсистема ответственна за обработку и обновление текущей плановой информации. Плановая подсистема обеспечивает доступ диспетчеров АС УВД к плановой информации, а также координацию соседних центров УВД.

Система наблюдения за воздушным пространством использует данные о местоположении ВС в зоне ответственности АС УВД, получаемые от первичных и вторичных радиолокаторов, а также от системы автоматического зависимого наблюдения (*Automatic Dependent Surveillance — ADS*) и многопозиционной радионавигационной системы (*Wide Area Multilateration — WAM*). На основании этих данных в системе формируются треки ВС, которые являются оценками их истинных траекторий.

Метеорологический сервер собирает и предоставляет АС УВД необходимую информацию о состоянии погоды в зоне ответственности. Эта информация получается от метеорологических средств наблюдения за состоянием атмосферы.

База летно-технических характеристик ВС содержит данные по более чем четырёмстам типам ВС, состоящим в летной эксплуатации в настоящее время [3]. База была разработана компанией Boeing по заданию EUROCONTROL специально для задач моделирования и предсказания траекторий ВС в контексте работы АС УВД.

Аэронавигационная база данных содержит информацию о трассах полета, стандартных маршрутах вылета (*Standard Instrument Departure — SID*) и прилета (*Standard Terminal Arrival Route — STAR*). Информация представлена в международном стандартном формате ARINC-424 [5].

Модель международной стандартной атмосферы является политропной моделью атмосферы [6, 7]. Модель позволяет рассчитать статические параметры атмосферы (температуру, давление, плотность воздуха и скорость звука), индикаторную воздушную скорость (*Calibrated Air Speed — CAS*), истинную воздушную скорость (*True Air Speed — TAS*) и число Маха ВС на любой высоте исходя из результатов измерения температуры и давления на поверхности земли.

Рассматриваемые ПСПТ имитируют полет ВС по заданному маршруту в условиях реальной атмосферы.

На вход МСУП поступает план полета. В результате обработки плана полета формируется сценарий полета. Сценарий полета включает в себя высотно-скоростной профиль полета (ВСПП) и географические координаты контрольных точек маршрута со временем их прохождения.

Сценарий полета поступает на вход МСУП. На другой вход МСУП поступает вектор состояния ВС, элементами которого являются координаты, составляющие вектора скорости, углы ориентации и масса ВС с выхода ДМВС. В МСУП вычисляется рассогласование сценарных и истинных параметров полета. На основании выявленного рассогласования формируется вектор управления ВС, который поступает на ДМВС. Таким образом осуществляется такое управление ВС, которое стремится минимизировать разницу между сценарным и истинным состояниями ВС.

Информация о начальном состоянии ВС, параметрах атмосферы (температуре и давлении воздуха на поверхности, а также скорости и направлении ветра) на всем маршруте полета поступает на вход ДМВС, которая использует BADA и модель атмосферы ISA для расчета вектора состояния ВС по дифференциальным уравнениям движения ВС в атмосфере с заданными параметрами [4, 8, 9].

Рассмотрим подробнее вышеназванные средства ПТ.

#### Динамическая модель воздушного судна

При синтезе ДМ предполагалось, что ВС является динамической системой с внешним управлением. Модель использует дифференциальные уравнения классической механики Ньютона [10] и имитирует поведение ВС, выполняющего управляемый полет в условиях реальной атмосферы. ВС рассматривается как материальная точка, состояние которой характеризуется следующим вектором:

$$\mathbf{X}(t) = [X(t) \ Y(t) \ H(t) \ V_{TAS}(t) \ \psi(t) \ m(t)], \quad (1)$$

где  $X, Y$  — координаты ВС в горизонтальной плоскости, м;  $H$  — геопотенциальная высота ВС, м;  $V_{TAS}$  — истинная воздушная скорость ВС, м/с;  $\psi$  — курс ВС, рад;  $m$  — масса ВС, кг.

Динамика вектора состояния (1) описывается следующей системой:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} \equiv \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{H} \\ \dot{V}_{TAS} \\ \dot{\psi} \\ \dot{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{TAS} \cos \psi \cos \gamma + w_x \\ V_{TAS} \sin \psi \cos \gamma + w_y \\ V_{TAS} \sin \gamma + w_h \\ (T - D) / m - g_0 \sin \gamma \\ L \sin \phi / (m V_{TAS}) \\ -\eta T \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — угол наклона траектории ВС, рад;  $g_0$  — ускорение свободного падения на высоте среднего уровня моря, м/с<sup>2</sup>;  $\phi$  — угол крена, рад;  $\eta$  — удельный расход топлива по тяге, кг/(Н·с) (соответствующая методика расчета приведена в работе [3]);  $T$  — сила тяги двигателя, Н;  $D$  — сила лобового сопротивления, Н;  $L$  — аэродинамическая

подъемная сила, Н;  $\mathbf{W} = [w_x \ w_y \ w_h]$  — вектор скорости ветра. В предлагаемой модели предполагается независимость истинной воздушной скорости  $V_{TAS}$  от скорости ветра  $\mathbf{W}$ .

Силы  $L$  и  $D$  определяются как функции истинной воздушной скорости:

$$\begin{aligned} L &= \frac{C_L S \rho}{2} V_{TAS}^2; \\ D &= \frac{C_D S \rho}{2} V_{TAS}^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $C_L$  — коэффициент подъемной силы;  $C_D$  — коэффициент лобового сопротивления;  $S$  — расчетная площадь крыла ВС, м<sup>2</sup>;  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>. Методика и формулы расчета  $C_L$  и  $C_D$  приведены в работе [3]. Предельные значения параметров динамической модели  $H, V_{TAS}, m, T, \gamma, \phi$  задаются с учетом ограничений на параметры ВС.

Управляющими воздействиями являются сила тяги двигателя  $T$ , угол наклона траектории  $\gamma$ , угол крена  $\phi$ . Третье и четвертое уравнения системы (2) позволяют ввести вместо угла наклона траектории  $\gamma$  новую управляющую переменную [3], которая называется фактором энергетического баланса (*Energy Share Factor* — ESF). Рассмотрим это управляющее воздействие подробнее. Исключая из названных уравнений  $\sin(\gamma)$ , придем к уравнению, которое получило название *Total Energy Model* [3]:

$$(T - D) V_{TAS} = m g_0 \frac{dH}{dt} + m V_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt}. \quad (4)$$

Физический смысл уравнения (4) очевиден: оно соответствует равенству между скоростью изменения работы сил, действующих на ВС, и скоростью изменения полной (потенциальной и кинетической) энергии ВС. Для вертикальной скорости ВС при этом будет справедливо следующее уравнение:

$$V_V \equiv \frac{dH}{dt} = \frac{(T - D) V_{TAS}}{m g_0} \left[ 1 + \frac{V_{TAS}}{g_0} \frac{dV_{TAS}}{dH} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Фактор энергетического баланса, который в работе [3] обозначен как  $f(M)$ , равен второму множителю в уравнении (5):

$$f(M) \equiv \left[ 1 + \frac{V_{TAS}}{g_0} \frac{dV_{TAS}}{dH} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Данный фактор зависит [3, 4] от высоты полета, температуры атмосферы и числа Маха  $M$ . ESF определяет соотношение между мощностями, которые расходуются на изменение высоты полета (на изменение потенциальной энергии ВС) и ускорение ВС (на изменение кинетической энергии). Методика расчета ESF приведена в работе [3].

С учетом нового управляющего воздействия система (2) примет вид

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} \equiv \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{H} \\ \dot{V}_{TAS} \\ \dot{\psi} \\ \dot{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{TAS} \cos \psi \cos \gamma + w_x \\ V_{TAS} \sin \psi \cos \gamma + w_y \\ (T - D)V_{TAS}f(M)/(mg_0) + w_h \\ (T - D)[1 - f(M)]/m \\ L \sin \varphi / (mV_{TAS}) \\ -\eta T \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Полет ВС моделируется в дискретном времени с шагом  $\Delta t$  от начального момента взлета  $t_0$  до момента касания взлетно-посадочной полосы путем решения системы (7). Моменту  $t_0$  соответствует вектор начальных параметров  $\mathbf{X}_0$ , который формируется с учетом актуальных данных от системы наблюдения за воздушным пространством. Система уравнений (7) решается методом Рунге — Кутты четвертого порядка [11]. При наличии метеорологической информации параметры атмосферы и ветра также поступают в ДМВС. Таким образом, на выходе модели получается траектория ВС, рассчитанная согласно сценарию полета и текущему состоянию атмосферы. Очевидно, что рассмотренная модель является существенным упрощением динамики движения ВС. Однако, как показала практика, точность прогнозирования при ее использовании удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ПТ.

### Сценарий полета

Сценарий полета формируется в результате обработки плана полета и содержит следующие данные.

1. Тип ВС — четырехзначный код Международной организации гражданской авиации (*International Civil Aviation Organization* — ICAO). Код уникален для каждой модели ВС.

2. Аэропорт отправления и аэропорт назначения — четырехзначный код ICAO, уникальный для каждого аэропорта.

3. Маршрут полета — множество контрольных точек, включая точки стандартных маршрутов взлета (SID) и посадки (STAR). Каждая опорная точка имеет уникальное имя в пределах своего района полетной информации, пространственные координаты (географические широту и долготу) и дополнительную информацию (например, способ пролета точки). Информация о точках маршрута берется из AIDB, где она представлена в международном стандартном формате ARINC-424 [5]. Дополнительно каждой точке присваивается курс на следующую точку маршрута. Следует отметить, что реальный маршрут полета не всегда соответствует плановому. В этом случае отклонения обнаруживаются, а план полета корректируется [12].

4. Высотно-скоростной профиль полета — зависимость индикаторной воздушной скорости  $V_{CAS}$  от геопотенциальной высоты  $H$  для трех этапов полета: взлета и набора высоты, крейсерского полета, снижения и посадки [3]. На этапе крейсерского полета высота и скорость ВС задаются в плане полета. ВС рассматривается как конечный автомат, каждое дискретное состояние которого в множестве  $\{H, V_{CAS}\}$  определяется типом, этапом полета и конфигурацией ВС. Процедура синтеза такого конечного автомата описана в работе [3].

5. Время отправления — фактическое или планируемое время взлета ВС.

6. Начальная взлетная масса — расчетная масса ВС при взлете.

### Модель системы управления полетом

Модель системы управления полетом является грубым приближением реальной бортовой системы автопилотирования, которая имеет намного более сложное устройство и алгоритм работы. МСУП реализует управление полетом по маршруту в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В горизонтальной плоскости ВС управляется путем установки такого угла крена  $\varphi$ , который позволяет ВС двигаться от одной контрольной точки маршрута к другой, осуществляя при этом заданный способ пролета точек. Для следования по заданному маршруту используется глобальная система координат *World Geodetic System 1984 (WGS-84)* [13].

Для управления в вертикальной плоскости в МСУП предусмотрены три дискретные переменные  $q_j, j = 1, 2, 3$ , состояние которых зависит от режима полета самолета [3, 4, 9]:

$$q_1 = \begin{cases} CAS, & \text{если } H \leq H_{trans} \\ MACH, & \text{если } H > H_{trans} \end{cases};$$

$$q_2 = \begin{cases} LOW, & \text{если } H \leq H_{trop} \\ HIGH, & \text{если } H > H_{trop} \end{cases};$$

$$q_3 = \begin{cases} ACC, & \text{если } V_{CAS} \leq V_{CAS}^* - \Delta V \\ DEC, & \text{если } V_{CAS} \geq V_{CAS}^* + \Delta V, \\ CST, & \text{если } |V_{CAS} - V_{CAS}^*| < \Delta V \end{cases}, \quad (8)$$

где значения дискретных переменных имеют следующий смысл: *CAS, MACH* — полет с постоянной индикаторной скоростью ниже высоты перехода  $H_{trans}$  или с постоянным числом Маха выше высоты перехода  $H_{trans}$ ; *LOW, HIGH* — полет ниже или выше высоты тропопаузы  $H_{trop}$ ; *ACC, DEC, CST* — полет с увеличением (ускорение), уменьшением (замедление) или постоянной скоростью;  $V_{CAS}^*$  — индикаторная скорость из ВСПП;  $\Delta V$  — допустимое отклонение  $V_{CAS}$  от  $V_{CAS}^*$ . В соответствии со значениями перемен-

ных  $q_j$ ,  $j = 1, 2, 3$  по методике [3] рассчитываются сила тяги  $T$  и фактор энергетического баланса  $f(M)$ , которые являются сигналами управления, поступающими в ДМВС.

### Модель атмосферы

Модель позволяет рассчитать изменение параметров атмосферы в зависимости от геопотенциальной высоты, определяет порядок преобразований между индикаторной воздушной скоростью  $V_{CAS}$ , истинной воздушной скоростью  $V_{TAS}$  и числом Маха  $M$  [3]. Состояние атмосферы задается следующим набором параметров:  $T$  — температура воздуха, К;  $p$  — атмосферное давление, Па;  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $a$  — скорость звука, м/с. Базовыми параметрами модели атмосферы являются стандартная температура  $T_{0 ISA} = 288,15$  К, давление  $p_{0 ISA} = 1013,25$  гПа, плотность воздуха  $\rho_{0 ISA} = 1,225$  кг/м<sup>3</sup> и скорость звука  $a_{0 ISA} = 340,294$  м/с на высоте среднего уровня моря. Текущее состояние атмосферы на высоте среднего уровня моря задается через отклонения:

$$T_0 = T_{0ISA} + \Delta T_0; p_0 = p_{0ISA} + \Delta p_0, \quad (9)$$

где  $\Delta T_0$ ,  $\Delta p_0$  — разность температур и давлений стандартной и реальной атмосферы на высоте среднего уровня моря. Основные расчетные соотношения по ISA приведены в работах [3–5].

### Моделирование траектории полета

В соответствии с рассмотренной структурной схемой средств ПТ (см. рис. 1) на языке программирования С++ разработаны ПС, которые позволяют моделировать четырехмерную траекторию ВС согласно плану полета. В данном разделе анализируются результаты работы ПС.

На вход ПС поступают следующие данные: план полета, параметры атмосферы в районе аэропорта прибытия, исходное положение ВС. На выходе получается рассчитанная согласно

маршруту следования траектория ВС. Оценка точности ПТ произведена путем сравнения реального ВСПП ВС с расчетным.

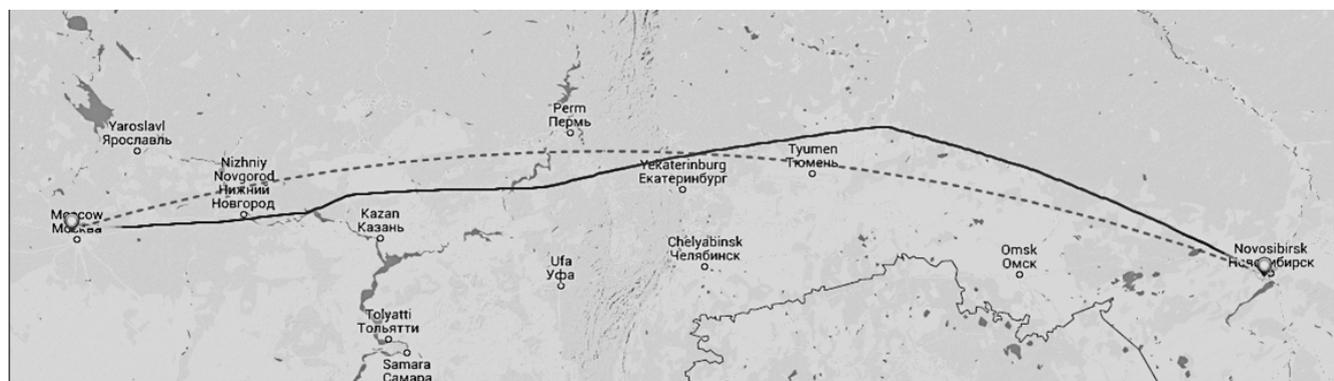
Доступ к архиву ВСПП выполненных рейсов может быть получен через открытый интерфейс прикладного программирования интернет-ресурса [www.flightradar24.com](http://www.flightradar24.com). Данный ресурс позволяет наблюдать за ходом выполнения рейсов в реальном времени, а также имеет архив с записями завершенных полетов. Наблюдение за ВС основано на ADS-B [14]. Для моделирования и анализа точности ПТ разработанных ПС был выбран рейс № AFL1549 компании «Аэрофлот», выполненный в ночь с 25 на 26 февраля 2015 года. Маршрут рейса приведен на рис. 2. План полета был составлен по данным интернет-ресурса [www.vatstats.net](http://www.vatstats.net). Данный ресурс предоставляет доступ к плановой информации по всем выполненным рейсам.

План полета рейса № AFL1549 содержит следующую информацию:

- 1) позывной ВС: AFL1549;
- 2) модель ВС: Airbus A321;
- 3) аэропорт отправления: UNNT — Толмачево (г. Новосибирск);
- 4) аэропорт назначения: UUEE — Шереметьево (г. Москва);
- 5) маршрут полета:  
OG16T OGAMA GEBSA A308 ML A300 TINRI A303 BANAM A723  
SOPUS A300 INTEP A300 MF ITINA RW RUGEL BESTA BST21G;
- 6) крейсерская высота: 34 000 футов;
- 7) крейсерская скорость: 400 узлов;
- 8) отправление: 25.02.2015 в 23:59.

Взлетная масса ВС не указывается в плане полета, поэтому в данном случае из BADA берется масса, соответствующая полной загрузке ВС типа A321.

Данные о состоянии атмосферы в районе аэропорта назначения за 26.02.2015 предоставлены интернет-ресурсом [www.wunderground.com](http://www.wunderground.com).



■ Рис. 2. Маршрут полета рейса № AFL1549

Кроме того, ресурс предоставляет информацию о скорости ветра, однако без информации о направлении ветра невозможно получить ориентированный в пространстве вектор воздействия и использовать его в системе уравнений (2).

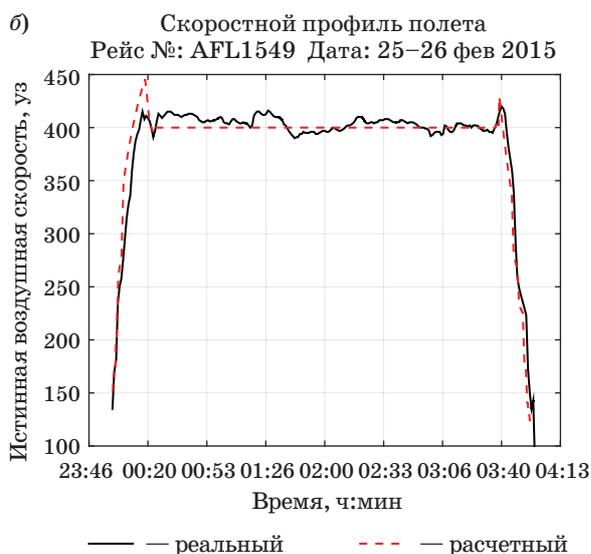
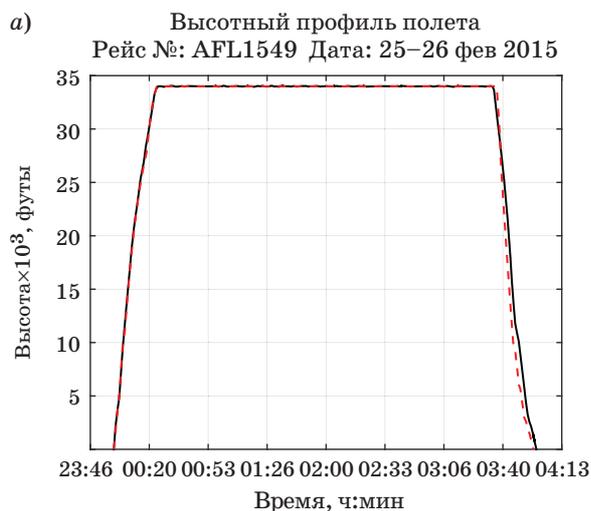
В качестве исходного положения ВС установлена первая точка маршрута полета, т. е. точка на взлетно-посадочной полосе аэропорта отправления.

Полет ВС моделировался с момента взлета до момента посадки без обновления информации о параметрах движения ВС, маршруте полета и метеорологических условиях. Полученные по данным ADS-B и рассчитанные с помощью ПС высотный и скоростной профили полета ВС представлены на рис. 3, а и б соответственно.

Результаты вычисления расхождения расчетных и реальных параметров траектории для трех этапов полета сведены в таблицу.

■ Расхождение расчетных и реальных параметров траектории

Этап полета	Параметр	Среднее отклонение	Максимальное отклонение
Набор высоты	Высота, м	91,8	701,3
	Скорость, м/с	7,0	31,3
Крейсерский полет	Высота, м	3,4	15,2
	Скорость, м/с	2,6	8,2
Снижение	Высота, м	435,4	1440,2
	Скорость, м/с	4,9	25,8
Все этапы	Высота, м	74,0	1440,2
	Скорость, м/с	4,2	31,3



■ Рис. 3. Реальный и расчетный высотный (а) и скоростной (б) профили полета

Результатом анализа реального и расчетного ВСПП являются следующие наблюдения и выводы.

1. На всех этапах полета расчетный ВСПП качественно повторяет реальный, что говорит об адекватности используемой методики ПТ.

2. На этапе крейсерского полета расхождения расчетного и реального ВСПП незначительны и по существу обусловлены намерениями ВС выдерживать значения высоты и скорости, назначенные в плане полета.

3. На этапе набора высоты и снижения наблюдаются относительно высокие расхождения расчетного и реального ВСПП, которые можно объяснить сложностью моделирования полета в отсутствии информации о высотно-скоростных профилях полета, которые применяются в пунктах отправления и прибытия на стандартных маршрутах SID и STAR, а также скорости ветра на маршруте.

Как отмечалось выше, во многих случаях основной задачей ПТ является прогнозирование точного времени прохождения ВС опорных и других важных точек маршрута. В данном случае достоверно известно фактическое время прибытия в конечную точку маршрута — аэропорт Шереметьево и полученное в результате ПТ расчетное время прибытия:

- фактическое время прибытия  
26 февраля 2015 года 3 часа 58 минут;
- расчетное время прибытия  
26 февраля 2015 года 4 часа 00 минут.

Таким образом, разница между фактическим и расчетным временем прибытия составляет менее двух минут. Очевидно, что такая точность является достаточно высокой, учитывая, что полет моделировался с момента взлета до момента посадки без коррекции по реальным данным в промежуточных точках.

## Заключение

В работе изложены основные принципы синтеза алгоритмов и ПС, предназначенных для предсказания траектории полета ВС. Синтез алгоритмов работы ПС осуществлялся в соответствии с рекомендациями EUROCONTROL. Предсказание траектории происходит путем моделирования полета ВС по заданному маршруту с учетом доступной плановой и метеорологической информации, а также с использованием данных о летно-технических характеристиках самого ВС.

Разработанные ПС позволяют моделировать четырехмерные траектории ВС. Работоспособность алгоритмов и ПС продемонстрирована на примере моделирования реального полета с последующей оценкой точности как невязки реального и расчетного высотно-скоростного профилей

полета и времени прибытия в аэропорт назначения. Наибольшая разница между расчетной и фактической траекториями наблюдается на участках переходов между этапами полета, наименьшая — на протяжении стационарного полета, т. е. при полете на крейсерском эшелоне. На этапе набора высоты и снижения наблюдаются относительно высокие расхождения расчетного и реального высотно-скоростного профилей полета, которые можно объяснить сложностью моделирования полета в отсутствии информации о профилях, которые применяются в пунктах отправления и прибытия на стандартных маршрутах SID и STAR, а также скорости ветра на маршруте. Тем не менее полученная точность прогноза дает основания рекомендовать разработанные алгоритмы для применения в задачах автоматизации УВД.

## Литература

1. Fairclough I., McKeever D. PHARE Advanced Tools Trajectory Predictor Final Report. Version 1.0 // EUROCONTROL DOC 98-70-18. Aug. 1999. — 50 p.
2. Morton S., Dias P., Garnier J., Redeborn B. EUROCONTROL Specification for Trajectory Prediction. Edition 1.0 // EUROCONTROL-SPEC-0143. July 2010. — 60 p.
3. Nuic A. User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA). Revision 3.12 // EUROCONTROL Experimental Centre. Aug. 2014. — 106 p.
4. Glover W., Lygeros J. A Multi-Aircraft Model for Conflict Detection and Resolution Algorithm Evaluation // IST-2001032460 of European Commission. Feb. 2004. — 49 p.
5. Airlines Electronic Engineering Committee. Navigation System Data Base. ARINC Specification 424-15. — Aeronautical Radio, Inc., Feb. 2000. — 361 p.
6. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Изд. второе, перераб. и доп. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 751 с.
7. Poles D. Revision of Atmosphere Model in BADA Aircraft Performance Model. — EUROCONTROL Experimental Centre, Feb. 2010. — 162 p.
8. Slattery R., Zhao Y. Trajectory Synthesis for Air Traffic Automation // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1997. Vol. 20. N 2. P. 232–238.
9. Caron G. M., Schoenauer M., Saveant P., Hadjaz A. Online Learning for Ground Trajectory Prediction // Proc. of the 2<sup>nd</sup> SESAR Innovation Days (2012), EUROCONTROL, 2012. — 8 p.
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. I: Механика. Изд. 5-е, стер. — М.: Физматлит, 2004. — 224 с.
11. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. Численные методы. — М.: Бином, 2001. — 636 с.
12. Morton S., Dias P., Garnier J., Redeborn B. EUROCONTROL Specification for Monitoring Aids // EUROCONTROL-SPEC-0142. Edition 1.0. July 2010. — 27 p.
13. National Imagery and Mapping Agency. Department of Defense World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems // Technical Report TR8350.2. Third Edition. Amendment 1. Jan. 2000. — 175 p.
14. Blythe W., Anderson H., King N. ADS-B Implementation and Operations Guidance Document. — International Civil Aviation Organization. Asia and Pacific Ocean, Sept. 2011. — 38 p.

UDC 629.086

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.33

### Aircraft Trajectory Prediction in Air Traffic Control Systems

Kiselev V. Y.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, vukis@bk.ruMonakov A. A.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, a\_monakov@mail.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** One of the ways to improve air traffic efficiency and safety is aircraft trajectory prediction. It helps to update and correct the flight plans according to the radar surveillance data, to perform short-term and middle-term conflict detection, to optimize arrival and departure management, to allocate secondary surveillance radar code. The goal of this research is to develop prediction tools for 4D aircraft trajectory simulation and to evaluate their prediction accuracy. **Methods:** Airborne autopilot simulation is used. In the simulation of the aircraft trajectory, it is presumed that the aircraft follows the planned route and has nominal flight modes during its climb, cruise and descend. The proposed approach is based on the recommendations formulated in the technical requirements of the European Organization for the Safety of Air Navigation. **Results:** Synthesis of aircraft trajectory prediction tools for air traffic control systems has been discussed. Heightspeed flight profile calculation helps to estimate the aircraft motion parameters in each waypoint along the route. The efficiency of the algorithms is demonstrated by the comparison of the heightspeed profiles of a real flight trajectory and its prediction. **Practical relevance:** The obtained results can be used in developing software for modern air traffic control systems to predict 4D aircraft trajectories.

**Keywords** — Air Traffic Control, Aircraft, Trajectory Prediction, Flight Simulation.

## References

1. Fairclough I., McKeever D. PHARE Advanced Tools Trajectory Predictor Final Report. Version 1.0. *EUROCONTROL DOC 98-70-18*, Aug. 1999. 50 p.
2. Morton S., Dias P., Garnier J., Redeborn B. EUROCONTROL Specification for Trajectory Prediction. Edition 1.0. *EUROCONTROL-SPEC-0143*, July 2010. 60 p.
3. Nuic A. User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA). Revision 3.12. EUROCONTROL Experimental Centre, Aug. 2014. 106 p.
4. Glover W., Lygeros J. A Multi-Aircraft Model for Conflict Detection and Resolution Algorithm Evaluation. *IST-2001032460 of European Commission*, Feb. 2004. 49 p.
5. Airlines Electronic Engineering Committee. *Navigation System Data Base. ARINC Specification 424-15*. Aeronautical Radio, Inc., Feb. 2000. 361 p.
6. Matveev L. T. *Kurs obshchei meteorologii. Fizika atmosfery*. [Standard Meteorological Course]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 751 p. (In Russian).
7. Poles D. *Revision of Atmosphere Model in BADA Aircraft Performance Model*. EUROCONTROL Experimental Centre, Feb. 2010. 162 p.
8. Slattery R., Zhao Y. Trajectory Synthesis for Air Traffic Automation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1997, vol. 20, no. 2, pp. 232–238.
9. Caron G. M., Schoenauer M., Saveant P., Hadjaz A. Online Learning for Ground Trajectory Prediction. *Proc. of the 2<sup>nd</sup> SESAR Innovation Days (2012)*, EUROCONTROL, 2012. 8 p.
10. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika. Tom I. Mekhanika*. [Course of Theoretical Physics. Vol. 1. Mechanics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 224 p. (In Russian).
11. Bakhvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobel'kov G. *Chislennyye metody* [Computational Techniques]. Moscow, Binom Publ., 2001. 636 p. (In Russian).
12. Morton S., Dias P., Garnier J., Redeborn B. *EUROCONTROL Specification for Monitoring Aids. Edition 1.0*. EUROCONTROL-SPEC-0142, July 2010. 27 p.
13. *National Imagery and Mapping Agency. Department of Defense World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems Third Edition. Amendment 1*. Technical Report TR8350.2, Jan. 2000. 175 p.
14. Blythe W., Anderson H., King N. *ADS-B Implementation and Operations Guidance Document*. International Civil Aviation Organization. Asia and Pacific Ocean, Sept. 2011. 38 p.