

УДК 681.518.3

ББК 39.56

DOI 10.51955/2312-1327_2021_1_37

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МАРШРУТОВ ЧЕТЫРЁХМЕРНОЙ НАВИГАЦИИ В ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ, И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПУТЕЙ ИХ РЕШЕНИЯ

*Александр Сергеевич Будков^{1,2}
orcid.org/0000-0002-7655-4291*

*аспирант¹, очное отделение, 4 курс, М70-406-17,
инженер-конструктор 1 категории²*

*¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»;*

*²Филиал ПАО «Корпорация «Иркут» «Центр комплексирования»
Москва, Россия*

ASBUdkov@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена анализу проблем при выполнении маршрутов четырёхмерной навигации в гражданской авиации, определению минимально необходимых требований для системы поддержки принятия решения, которая бы обеспечивала решение этих проблем, а также разработке методики поиска оптимального четырёхмерного маршрута.

Ключевые слова: гражданский самолёт, четырёхмерная навигация, система самолётовождения, система поддержки принятия решения.

ANALYSIS OF PROBLEMS ARISING DURING THE FLIGHT ON FOUR- DIMENSIONAL NAVIGATION ROUTES IN CIVIL AVIATION AND DETERMINING THE BASIC WAYS OF THEIR SOLUTION

*Alexander Sergeevich Budkov^{1,2}
orcid.org/0000-0002-7655-4291*

*4th year postgraduate student¹, M70-406-17,
1 category engineer²*

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University);

*² Integration Center branch of Irkut Corporation
Moscow, Russia*

ASBUdkov@gmail.ru

Abstract. The work is devoted to the analysis of problems during the flight on four-dimensional navigation routes in civil aviation, determining the minimum necessary requirements for a decision support system that would provide a solution to these problems, as well as developing a methodology for searching an optimal four-dimensional route.

Key words: civil aircraft, four-dimensional navigation, flight management system, decision support system.

Анализ проблем при полётах по маршрутам четырехмерной навигации

Ключевая функция четырехмерной навигации – способность ВС прибыть в заданную точку пространства в заданное время. На сегодняшний день в существующих современных системах самолётовождения реализована так называемая функция RTA (от англ. Required Time of Arrival), которая в той или иной мере решает эту задачу.

Для выполнения функции экипажу в первую очередь на этапе предполётной подготовки необходимо ввести в систему путем взаимодействия через человеко-машинный интерфейс следующую минимально необходимую информацию:

- Промежуточный пункт маршрута – указывает путевую точку в плане полета, в которой будет определено ограничение по времени прибытия;
- Ограничение по времени прибытия – указывает желаемое время прибытия в заданную путевую точку маршрута;
- Тип ограничения по времени прибытия – указывает границы времени, которое должно выполняться воздушным судном. Три типа ограничения, которые в настоящее время поддерживаются: AT – в строго заданное время; AT или Before (AB) – в заданное время прибытия или раньше; AT или After (AA) – в заданное время прибытия или позже.

Далее после расчета временного профиля полёта в процессе его выполнения функция обеспечивает непрерывный контроль ошибки (задержки/опережения) во времени прибытия. Допустимая ошибка ограничивается нормативной документацией [RTCA/DO-283, 2015].

В процессе полёта по маршруту может произойти ситуация, когда ошибка превышает допустимые значения, в таком случае система отреагирует информационным сообщением о невозможности прибыть вовремя. При возникновении вдоль сформированного маршрута сложных метеоусловий или конфликтных ситуаций с другими участниками воздушного движения реакция системы будет носить также уведомительных характер.

Таким образом, проанализировав общий принцип работы функции RTA, можно сделать вывод, что при возникновении нештатной ситуации система ответит лишь уведомлением о том, что текущее заданное ограничение по времени обеспечить невозможно.

Но в условиях глобального управления четырехмерными траекториями, в сторону чего в настоящее время движется мировое аэронавигационное сообщество [ICAO Doc 9750-AN/963, 2016] гражданской авиации, такого функционала может быть недостаточно.

Система, обеспечивающая поддержку четырехмерных траекторий, должна быть устойчива к внешним возмущениям, приводящим к изменениям маршрута, таким как: сложные метеоусловия вдоль участков маршрута, конфликтные ситуации с другими воздушными судами, запретные зоны. Система должна максимально упрощать процесс принятия решения и обеспечивать экипаж максимально полной необходимой информацией.

В таких ситуациях на сегодняшний день весь груз ответственности принятия решения, а также ведение и контроль каждого воздушного судна ложится на диспетчера. В условиях высокой загруженности воздушного пространства такие ситуации в лучшем случае будут приводить к нарушению целостности управления четырёхмерными траекториями каждого участника воздушного движения, а в худшем случае возможны катастрофические ситуации.

Функции системы поддержки принятия решения

Для решения выявленных в результате анализа проблем, возникающих при полётах по маршрутам четырёхмерной навигации, предлагаемая система поддержки принятия решения должна обеспечивать:

- решение задачи поиска оптимального четырёхмерного маршрута;
- выдачу необходимой информации в информационно-управляющее поле кабины о доступных стратегиях полёта в конкретной типовой ситуации.

Рассмотрим подробнее задачу поиска оптимального четырёхмерного маршрута, так как именно эта функция системы должна решать навигационную задачу.

В первую очередь при поиске оптимального маршрута возникает вопрос о необходимых критериях оптимизации. Для рассматриваемой задачи необходимо находить четыре оптимальных маршрута по следующим критериям:

1) Минимизация разницы между заданным временем прибытия в точку и расчетным временем прибытия.

Данный критерий имеет высший приоритет, так как именно он определяет наличие решения, удовлетворяющее требованиям четырёхмерной навигации [RTCA/DO-283, 2015]. Решение по данному критерию существует не всегда, поэтому при его отсутствии, решение не предоставляется.

2) Минимизация затрачиваемого топлива.

3) Минимизация затрачиваемого времени.

4) Многокритериальная задача: минимизация топлива/времени.

Для поиска решения по последнему критерию используется параметр индекса стоимости (CI). Он характеризует вес двух критериев по отношению друг к другу. Параметр вводится вручную экипажем или определяется стратегией авиакомпании. Параметр, как правило, определяется значением от 0 до 100. Крайние значения параметра характеризуют критерии минимизации топлива и минимизации времени.

При формировании каждого из описанных критериев необходимо учитывать следующие факторы:

- ветровая обстановка вдоль вычисляемой траектории полёта;
- зоны сложных метеоусловий или запретные для полёта области пространства;
- ЛТХ ВС, в особенности при формировании вертикального профиля полёта.

Каждый из этих факторов существенно влияет на итоговый результат, а именно на рассчитанные параметры оптимального маршрута. Игнорирование при расчетах этих факторов приведет к ошибочному итоговому результату, который с высокой долей вероятности не будет являться оптимальным по искомому критерию.

На следующем шаге решения задачи поиска оптимального маршрута возникает потребность в расчёте параметров каждого из участков траектории маршрута, таких как: расход топлива, время полёта, градиент набора высоты, потребная дальность при наборе высоты и т. д. Расчёт этих параметров возможен благодаря наличию базы данных лётно-технических характеристик (БД ЛТХ) (от англ. «performance database» – PDB) [Eurocontrol BADA, 2017]. В БД ЛТХ для конкретного воздушного судна для всех этапов полёта приведены расчётные таблицы параметров в зависимости от заданного режима и условий полёта.

Также, в процессе решения задачи аэронавигации необходимо выбрать подходящую для неё систему координат, так как от её выбора, прежде всего, зависит точность вычислений навигационных параметров местоположения ВС, а также параметров вычисленной траектории. Так как при решении задачи необходимо рассматривать дальности свыше 500 км, необходимо учитывать, что меридианы сходятся в полюсах Земли, а, следовательно, в зависимости от широты цена деления градуса долготы будет изменяться в линейном выражении. Для учета этих искажений используется преобразование в проекции Гаусса-Крюгера. Развертка карты в проекции Гаусса-Крюгера представлена на рисунке 1.

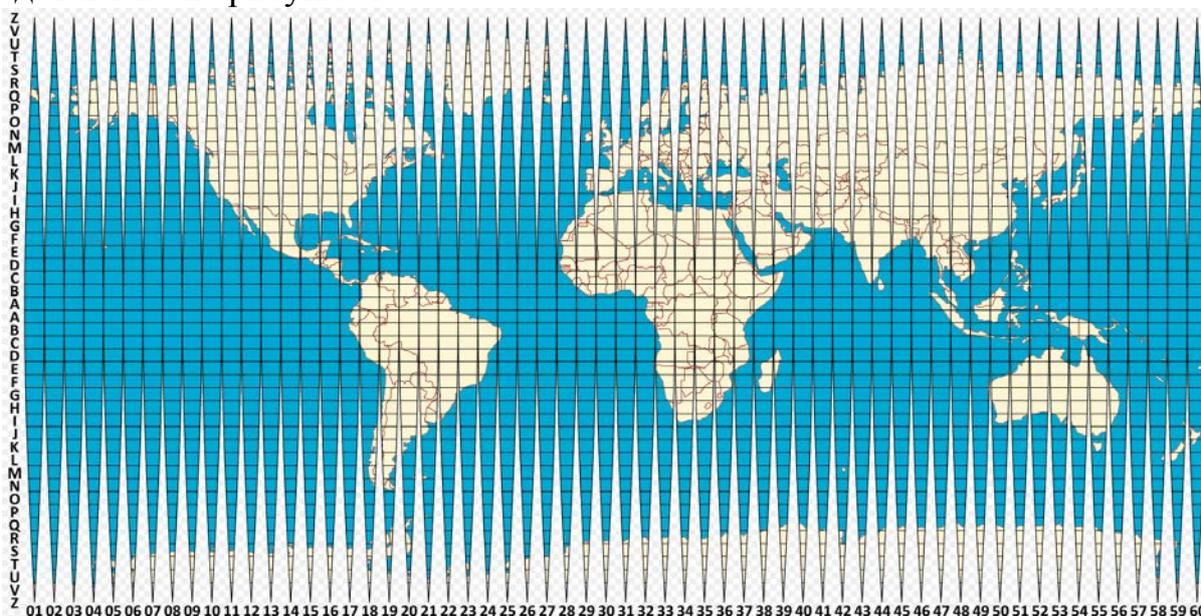


Рисунок 1 – Развертка карты в проекции Гаусса-Крюгера

Методика поиска оптимального четырехмерного маршрута

В результате анализа научных работ на тему рассматриваемой задачи, в которых приведены различные подходы к решению задачи поиска оптимального маршрута сделаны следующие выводы:

– для задачи поиска оптимального четырехмерного маршрута процедура планирования трехмерной траектории и определение скоростного профиля разделяется на два этапа [Degtyarev, 2006]. Первым шагом осуществляется поиск траектории в горизонтальной плоскости, а затем на её основе выполняется оптимизация вертикального профиля. Но даже при учете влияния всех описанных факторов такое разделение на два этапа приведет к ошибочному результату в результате поиска оптимальной траектории по потребным критериям для четырёхмерной навигации.

– для задачи поиска оптимального четырехмерного маршрута используются только критерии минимизации расхода топлива и минимизации времени в пути [Roberto Salvador Félix Patrón, 2013]. При этом не учитывается самый важный критерий оптимизации для задачи четырехмерной навигации – минимизация задержки прибытия в заданную точку маршрута.

Поэтому крайне необходимо иметь процедуру, которая обеспечила бы оптимизацию трехмерной траектории за один шаг с учетом влияющих на нее факторов.

Методика, обеспечивающая поиск решений для задачи планирования оптимального четырехмерного маршрута, должна отвечать следующим требованиям:

- осуществлять поиск решений по четырем критериям оптимальности:
 - минимизация задержки по времени прибытия;
 - минимизация общего путевого времени;
 - минимизация расхода топлива;
 - минимизация общего путевого времени/расхода топлива;
- учитывать при поиске решений параметры воздушного пространства (ветер, запретные зоны, зоны сложных метеоусловий) и ЛТХ ВС;
- обеспечивать расчет множества существующих четырехмерных траекторий за один шаг без разделения вертикальной составляющей от горизонтальной.

Такую методику можно представить в виде алгоритма, состоящего из 8 последовательных шагов.

Блок-схема разработанного алгоритма поиска оптимального четырехмерного маршрута, удовлетворяющего вышеизложенным требованиям, представлена на рисунке 2.

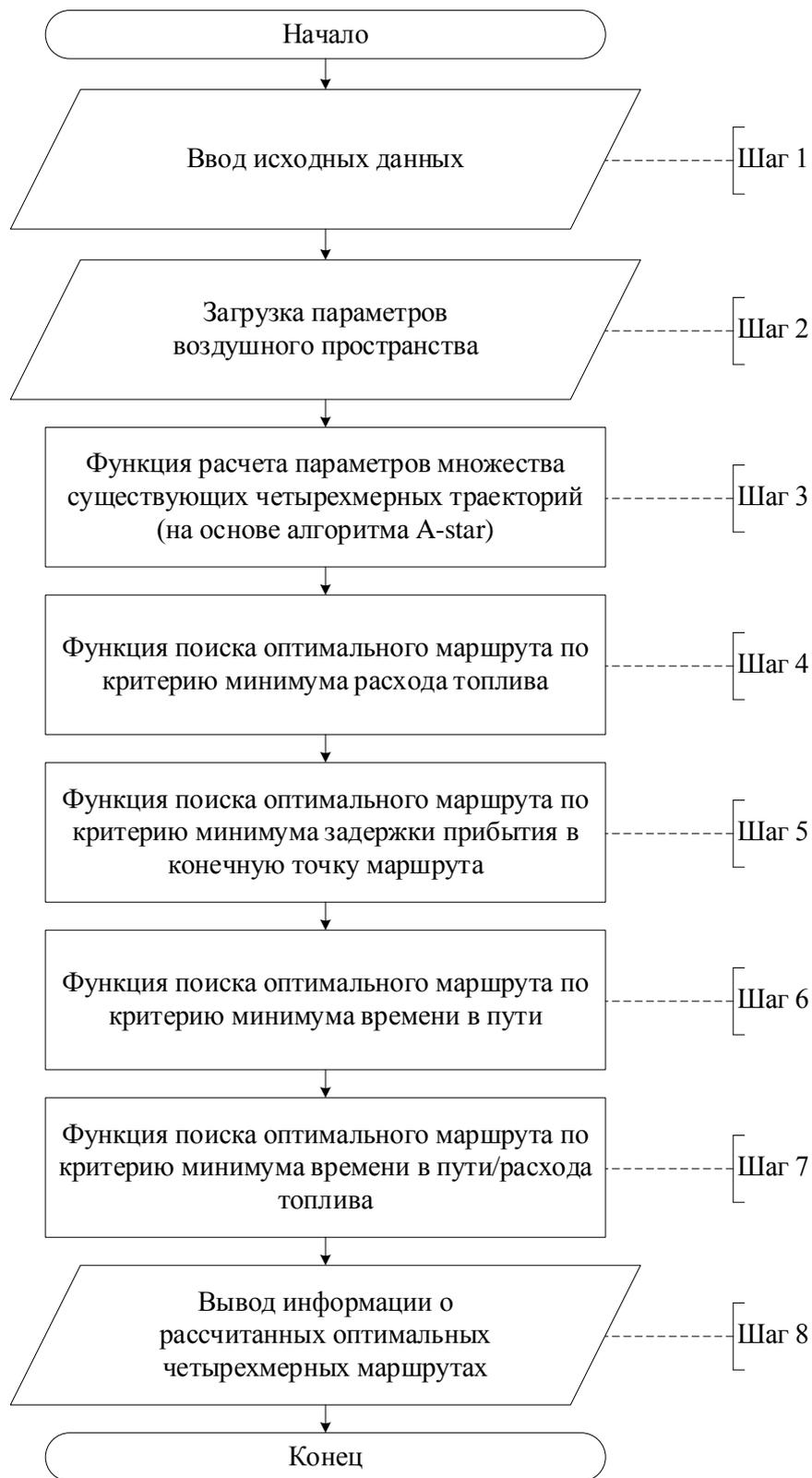


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма поиска оптимального четырехмерного маршрута

Шаги 1, 2 являются шагами определения исходных данных для работы алгоритма.

Функция шага 3 обеспечивает расчёт множества существующих четырёхмерных траекторий в диапазоне допустимых высот и скоростей полёта на основе алгоритма A-star. Результатом работы функции является множество значений стоимости полёта, учитывающей расход топлива и время в пути для каждой найденной траектории.

Функции шагов 4-7 обеспечивают поиск траекторий, удовлетворяющих соответствующему критерию. Поиск таких траекторий осуществляется на основе полученного множества значений стоимости полёта на шаге 3.

В результате вышеизложенных вычислений получаются решения по четырем критериям оптимизации, которые могут быть предоставлены для принятия решения экипажу (шаг 8).

Заключение

В результате выполнения научной работы проведен анализ проблем, возникающих при выполнении маршрутов четырёхмерной навигации в гражданской авиации, определены требования к системе поддержки принятия решения, которая будет обеспечивать решение этих проблем, а также разработана методика поиска оптимального четырёхмерного маршрута.

Библиографический список

Degtyarev O. V. Methodical and Algorithmic Issues of Constructing Four-Dimensional Flight Routes for Long-Range Aircrafts // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2006. №1. Pp. 110-124.

Roberto Salvador Félix Patrón Flight trajectories optimization under the influence of winds using genetic algorithms // AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference, 2013, Montreal, Quebec, H3C-1K3, Canada.

RTCA/DO-283 2015 Minimum Operational Performance Standards for Required Navigation Performance for Area Navigation.

ICAO Doc 9750-AN/963 «Global Air Navigation Plan», 5th edition, Canada, Montreal, 2016 – 142 p.

Eurocontrol, User manual for the Base of aircraft Data (BADA) Revision 3.14, EEC Technical/Scientific Report №17/05/29-143, June 2017.

References

Degtyarev O. V. Methodical and Algorithmic Issues of Constructing Four-Dimensional Flight Routes for Long-Range Aircrafts // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2006. №1. Pp. 110-124. (In English).

Roberto Salvador Félix Patrón Flight trajectories optimization under the influence of winds using genetic algorithms // AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference, 2013, Montreal, Quebec, H3C-1K3, Canada. (In English).

RTCA/DO-283 2015 Minimum Operational Performance Standards for Required Navigation Performance for Area Navigation. (In English).

ICAO Doc 9750-AN/963 «Global Air Navigation Plan», 5th edition, Canada, Montreal, 2016 – 142 p. (In French).

Eurocontrol, User manual for the Base of aircraft Data (BADA) Revision 3.14, EEC Technical/Scientific Report №17/05/29-143, June 2017. (In English).