

УДК 629.7

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ НЕПРЕРЫВНОГО СНИЖЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ НАВИГАЦИИ, ОСНОВАННОЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКАХ, ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ЗАХОДА НА ПОСАДКУ В АЭРОПОРТАХ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ

Кириллов Дмитрий Олегович,Независимый исследователь,
Россия, г. Санкт-Петербург.
sibir_dimsan@mail.ru

Аннотация

Цель данной статьи - продемонстрировать преимущества сочетания концепции PBN с реализацией CDA, предложив инновационную систему автоматической генерации траекторий криволинейного и непрерывного захода на посадку (CCDA). Эти траектории снижают расход топлива самолетами и шумовое воздействие вблизи аэропорта. Кроме того, свойство кривизны траектории сохраняет разброс траекторий по отношению к обычной наземной траектории прибытия с понижением как в поперечном, так и в вертикальном профилях. Предлагаемая система реализует процедуру, описанную ниже. Сначала разрабатываются конкретные траектории с расчетной точкой начала снижения в соответствии с заданным углом или с заданной высотой подъема, чтобы пересечь глиссаду снижения под постоянным или переменным углом. При такой разработке учитываются препятствия с географической привязкой, чтобы избежать потенциальных конфликтов с ограничениями аэропорта/внешней среды, автоматически генерируя корректирующие маневры. Затем разрабатываются эксплуатационные параметры самолета BADA для расчета расхода топлива, связанного с каждой расчетной траекторией снижения. Наконец, выбирается траектория CCDA, которая минимизирует расход топлива. Характеристики системы оцениваются с точки зрения топливной экономичности, шумового воздействия, а также боковых и вертикальных защищенных зон для обеспечения устойчивости при отслеживании.

Ключевые слова: навигация, основанная на характеристиках, заход с непрерывным снижением, управление воздушным движением, эффективность.

PERFORMANCE-BASED NAVIGATION WITH CONTINUOUS DESCENT OPERATIONS FOR EFFICIENT APPROACH AT THE AIRPORTS WITH DIFFICULT TERRAIN

Dmitriy O. Kirillov,Independent researcher,
Russia, Saint-Petersburg
sibir_dimsan@mail.ru

ABSTRACT

This paper aims to demonstrate the benefits of combining the PBN concept with the CDA implementation by proposing an innovative system for the automatic generation of Curved and Continuous Descent Approach (CCDA) trajectories. These trajectories reduce aircraft fuel consumption and noise impact near to airport. Furthermore, the path curvature property preserves the dispersion of tracks with respect to the conventional ground-based step-down arrival path in both lateral and vertical profiles. The proposed system implements procedure described in the following. First, specific paths are elaborated, with calculated top of descent point according to predefined angle or with axed altitude up to intercept the descend glide path at constant or variable angle. This elaboration integrates obstacles geo-referenced to avoid potential conflicts with airport/external environmental constraints by automatically generating corrective maneuvers. Then, the BADA aircraft performance parameters are elaborated in order to compute the fuel consumption associated to each calculated descent path. Finally, the CCDA path that minimizes the fuel consumption is selected. The system performances are evaluated in terms of fuel efficiency, noise impact, and lateral and vertical protected areas for tracking tolerance.

Keywords: performance-based navigation, continuous descent approach, air traffic management, efficiency.

Введение

Большинство густонаселенных районов вблизи аэропортов находятся под влиянием авиационного шума. В дополнение к этой проблеме, загрязнение окружающей среды из-за сжигания авиационного топлива приводит к ограничениям в процедурах воздушного движения, производстве самолетов и проектировании аэропортовых сооружений. Одной из инновационных концепций, внедренных в последние годы с целью снижения уровня шума и выбросов загрязняющих веществ, является прямое снижение на холостом ходу или почти на холостой тяге, начиная с входа в аэродромную диспетчерскую зону до посадки. Этот метод обычно называют процедурами непрерывного снижения (Continuous Descent Operations - CDO) [1]. Кроме того, в настоящее время самолеты оснащаются системой зональной навигации (RNAV), которая использует спутниковые системы (GNSS) и передовую авионику в качестве навигационных датчиков для обеспечения высокой точности навигации по сравнению с наземными радионавигационными средствами [5].

Концепция навигации, основанной на характеристиках (PBN), позволяет оптимизировать работу приборов с учетом навигационных характеристик воздушного судна. В частности, вертикальные профили прибытия RNAV часто разрабатываются для авиации общего назначения, чтобы позволить воздушному судну непрерывно снижаться с момента начала процедуры до точки начала конечного этапа захода на посадку (FAF) с помощью более эффективной и экологически чистой методики, известной как заход на посадку с непрерывным снижением (Continuous Descent Approach - CDA).

В последние годы NextGen и Европейская программа SESAR разработали новые операционные концепции на основе CDA и PBN, направленные на стратегическую реконструкцию и корректировку процедур прибытия более эффективным образом, повышая пропускную способность, производительность и безопасность полетов, а также снижая воздействие на окружающую среду вблизи аэропортов. Одним из их основных результатов является переход от тактического управления воздушным движением к стратегическому за счет использования PBN и операций, основанных на траектории

(Trajectory-Based Operations - TBO). Применение TBO позволяет точно контролировать время прибытия, что способствует естественному разделению трафика в определенных точках, а требуемые навигационные характеристики (Required Navigation Performance - RNP) обеспечивают точное определение боковых и вертикальных траекторий, сокращая пролетаемое расстояние.

Цель данной статьи - продемонстрировать преимущества сочетания концепции PBN [2] с руководством по внедрению CDA [3], реализуя таким образом инновационную систему автоматической генерации криволинейных и непрерывных траекторий снижения.

Концепция CDA

ИКАО определяет режим непрерывного снижения как «метод эксплуатации воздушного судна, которому способствует соответствующая схема воздушного пространства и процедур, а также соответствующие разрешения УВД, позволяющие выдерживать профиль полета, оптимизированный в соответствии с эксплуатационными возможностями воздушного судна, при установлении малой тяги двигателя и, по возможности, с низким аэродинамическим сопротивлением, что позволяет снизить расход топлива и выбросы вредных веществ во время снижения. Оптимальный вертикальный профиль представляет собой траекторию непрерывного снижения с минимальным количеством горизонтальных сегментов полета, необходимых только для торможения и создать посадочную конфигурацию воздушного судна или захватить луч курсоглиссадной системы» [1].

CDA позволяет воздушному судну в течение длительного времени лететь выше по сравнению с обычным заходом на посадку, непрерывно снижаясь с нижней высоты зоны ожидания или с верхней точки снижения (Top of Descent - TOD) и избегая любого горизонтального участка полета, прежде чем пересечь глиссаду (обычно для ILS она определяется как 3,5 градуса). Такое непрерывное снижение упрощает неточный заход на посадку благодаря точному наведению по кривой траектории и вертикальным наведением, в результате чего получается непрерывная вертикальная траектория, рассчитываемая бортовым оборудованием или вручную, исходя из требуемой скорости снижения без учета горизонтальных участков полета, как показано на рисунке 1.



Рисунок 1. Различия вертикальных профилей

Даже если метод CDA предпочтительнее обычного снижения, поскольку он требует меньшей тяги двигателя что, следовательно, способствует уменьшению выбросов и акустических воздействий на окружающую среду, на эту процедуру влияют возможности авиадиспетчеров и систем управления воздушным движением, общие ограничения

скорости, высоты полета и эшелонирования, особенно в зонах с интенсивным движением. Надлежащее управление потоком прибывающих ВС могло бы способствовать внедрению CDA.

Сегодня самолеты оснащаются системой зональной навигации, обеспечивающей повышенную точность по сравнению с обычными системами полета по приборам, такими как приводные радиостанции, УКВ Оборудование для измерения всенаправленной дальности (VOR) и расстояния (DME), и другие наземные радионавигационные средства, как показано на рисунке 2.

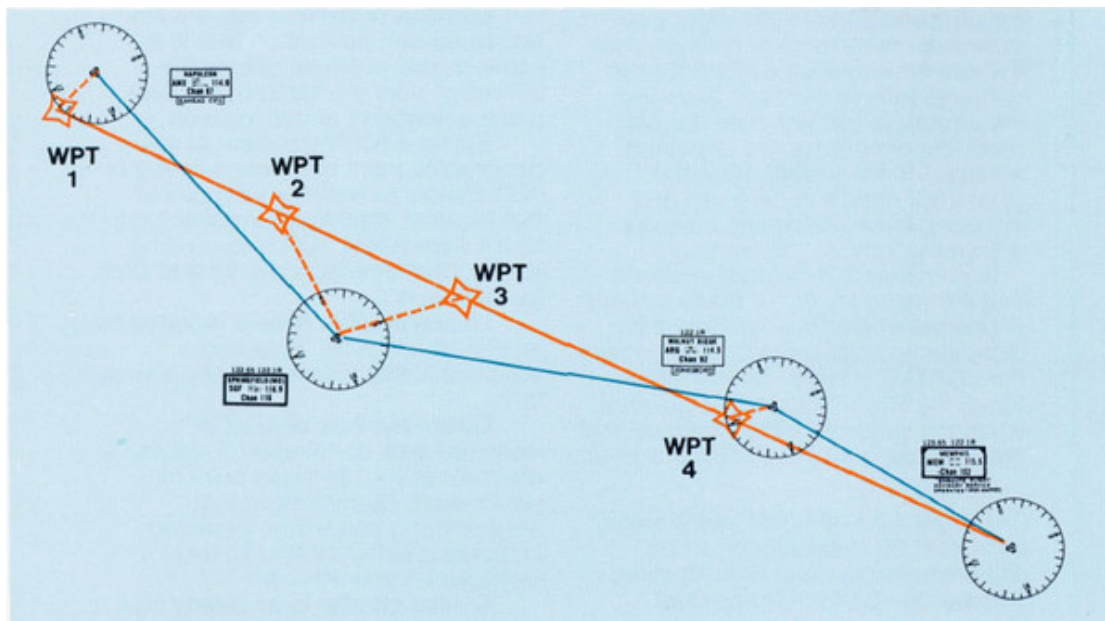


Рисунок 2. Пример традиционного полета по приборам и траектории RNAV [8]

Традиционная навигация основана на том, что воздушное судно выполняет полет НА или ОТ радиостанции. RNAV позволяет воздушному судну следовать маршрутам и процедурам IFR по любой желаемой траектории, не обязательно проходящей через радиомаяки [7].

Модель высокоуровневой архитектуры

Предлагаемая система непрерывного снижения по криволинейны траекториям (Curved and Continuous Descent Approach - CCDA) разработана с использованием различных взаимосвязанных инструментов. На рисунке 3 показана высокоуровневая архитектура модели.

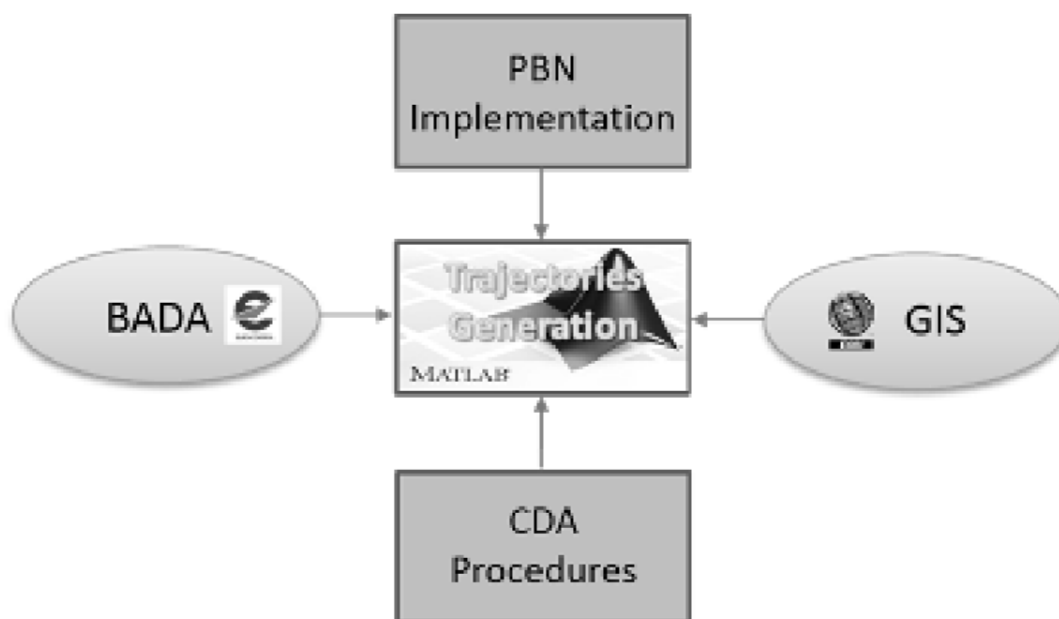


Рисунок 3. Высокоуровневая архитектура системы CCDA [7]

Все начинается с оценки выбора расчетной TOD в соответствии со снижением с заданным углом или по траектории до пересечения глиссады снижения на фиксированной высоте под постоянным или переменным углом траектории. Кроме того, предлагаемая система учитывает препятствия, чтобы избежать потенциальных столкновений, автоматически генерируя корректирующие маневры, и разрабатывает параметры летно-технических характеристик воздушного судна на основе базы данных о воздушном судне (BADA) [6] для расчета и оценки расхода топлива. Затем она объединяет процедуры PBN и CDA для генерации траекторий с помощью специальных алгоритмов. Здесь цель состоит в том, чтобы предоставить более подробное описание внедрения и утверждения PBN в сочетании с процедурами CDA.

Генерирование траекторий, сочетающих внедрение PBN с процедурами CDA

Модуль формирования траекторий представляет собой основную часть системы. В этом процессе учитываются данные, поступающие от навигационной инфраструктуры, параметры воздушного судна и географические элементы. В частности, базовый сценарий включает в себя такие ограничения, как скорость и минимальное расстояние до препятствий, стандартные процедуры прибытия (STAR) и навигацию по P-RNAV, опубликованные в циркуляре аэронавигационной информации (AIC) и разработанные в соответствии с критериями GNSS и DME/DME. Результатом является набор смоделированных траекторий, удовлетворяющих условиям с точки зрения расхода топлива.

Первая моделируемая траектория представляет собой эталонную традиционную траекторию снижения, основанную на технике ступенчатого снижения. Здесь фиксируется набор путевых точек и рекомендуемых навигационных средств. После определения угла глиссады для базовой траектории автоматически генерируется набор различных методов CDA и связанных с ними расчетных значений TOD и исправлений, которые сравниваются со ступенчатой траекторией. С математической точки зрения, для формирования траектории воздушного судна обычно используется метод кубической интерполяции, чтобы обеспечить непрерывную кривизну траектории. Используемая здесь контурная интерполяция основана на кусочно-кубическом интерполяционном многочлене Эрмита. Функция интерполяции использует известные координаты путевых точек и фиксированный интервал в зависимости от сценария. Этот интервал делится на регулярный дискретизированный подынтервал для сравнения расхода топлива на каждом

участке траектории. Линейная полиномиальная формула построена для альтиметрической интерполяции, чтобы получить прямую траекторию снижения, в соответствии с рекомендуемой реализацией траектории непрерывного снижения [3]. Опорная траектория дискретизируется по точкам, чтобы ее можно было аппроксимировать набором бесконечно малых прямолинейных отрезков. Криволинейная и непрерывная траектории дискретизируются по одинаковому количеству бесконечно малых отрезков с интервалами, чтобы сравнить результаты из оценки состояния окружающей среды для всех предложенных траекторий. Угол глиссады является одним из наиболее важных различий между ступенчатым снижением и непрерывным снижением, поскольку значение угла равно нулю на участках горизонтального полета при обычном снижении по траектории. Различные криволинейные и непрерывные траектории являются результатом изменения угла глиссады. Алгоритм возвращает набор траекторий в подходящей форме для оценки расхода топлива.

Модель расхода топлива

Данные о летно-технических характеристиках воздушных судов, использованные для исследования, предоставлены Базой воздушных судов и данных ЕВРОКОНТРОЛЯ (BADA) [6]. Кроме того, разработанная модель для оценки расхода топлива основана на уравнениях, полученных с использованием концепций динамики полета и модели полной энергии BADA (Total Energy Model - TEM) [6]. Модель полной энергии приравнивает скорость работы, выполняемой силами, действующими на летательный аппарат, к скорости увеличения потенциальной и кинетической энергии, то есть:

$$(T - D)V_{\text{ист}} = mg \frac{dh}{dt} + mV_{\text{ист}} \frac{dV_{\text{ист}}}{dt} \quad (1)$$

Расход топлива рассчитывается с учетом приведенных выше условий [4] и является интегралом от расхода топлива по времени:

$$f_r = \left(\frac{c_{f1} c_{D0} \rho S}{c_{f2} 2} \right) v^3 + \left(\frac{c_{f1} c_{D0} \rho S}{2} + \frac{c_{f1}}{c_{f2}} m \frac{dv}{ds} \right) v^2 + \left(c_{f1} m \frac{dv}{ds} + \frac{c_{f1}}{c_{f2}} mg \sin \gamma \right) v + c_{f1} mg \sin \gamma + \left(\frac{c_{f1} 2c_{D2} m^2 g^2}{c_{f2} \rho S} \right) \frac{1}{v} + \left(c_{f1} \frac{2c_{D2} m^2 g^2}{\rho S} \right) \frac{1}{v^2} \quad (2)$$

$$FC = \int_0^T f_r dt \quad (3)$$

Интеграл можно рассматривать как дискретизированную сумму расхода топлива на каждом отрезке траектории на протяжении всего расстояния от точки снижения до приземления [4]. На расход топлива влияют различные факторы. В этом исследовании смоделированные траектории были предварительно дискретизированы в трехмерном интервальном сегменте, чтобы рассчитать расход топлива на каждом интервале траектории и на всех сгенерированных траекториях от начала снижения до приземления. Кроме того, во время всего эксперимента учитывались параметры Airbus A320.

Заключение

В этом документе представлена методология создания различных вертикальных профилей и оценки потенциальных преимуществ CDA на основе PBN. Криволинейные и непрерывные траектории захода на посадку предпочтительнее используемых в настоящее

время ступенчатых траекторий снижения, поскольку этот инновационный подход позволяет снизить воздействие на окружающую среду с точки зрения расхода топлива. Кроме того, непрерывный профиль снижения, поддерживаемый PBN, обеспечивает повышение пропускной способности и эффективности с точки зрения воздействия на окружающую среду по сравнению с традиционными маршрутами прибытия.

Список литературы:

1. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Руководство по заходам на посадку с непрерывным снижением (CDA). Doc 9931. Монреаль: ICAO, 2010. 150 с.
2. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Руководство по навигации, основанной на характеристиках. Doc 9613. 3-е изд. Монреаль: ICAO, 2012. 300 с.
3. EUROCONTROL. Руководство по внедрению непрерывного захода на посадку (CDA). // Брюссель: EUROCONTROL, 2008. 120 с.
4. Эррико, А., Ди Вито, В., Федерико, Л. Исследование непрерывного захода на посадку для эффективной системы воздушного транспорта. // Американский институт аэронавтики – AIAA Aviation 2016. Вашингтон, США, 2016. 15 с.
5. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Правила полетов. // Монреаль: ICAO, 2005. 100 с.
6. EUROCONTROL. Руководство пользователя BADA. // Брюссель: EUROCONTROL, 2004. 95 с.
7. Сарайский Ю. Н., Липин А. В., Либерман Ю. И. Аэронавигация. Ч. II. Радионавигация в полете по маршруту: Учебное пособие. /СПбГУ ГА. Санкт-Петербург, 2013. 383 с.
8. Нетрадиционная навигация. Livejournal [Электронный ресурс] сайт // URL: <https://otto-pilot.livejournal.com/2724.html>

References:

1. The International Civil Aviation Organization (ICAO). Guidance on Continuous Descent Approaches (CDA). Doc 9931. Montreal: ICAO, 2010. 150 p.
2. The International Civil Aviation Organization (ICAO). A guide to performance-based navigation. Doc 9613. 3rd ed. Montreal: ICAO, 2012. 300 p.
3. EUROCONTROL. Guidance on the implementation of Continuous Approach (CDA). Brussels: EUROCONTROL, 2008. 120 p.
4. Errico, A., Di Vito, V., Federico, L. A study of continuous approach for an efficient air transport system. American Institute of Aeronautics – AIAA Aviation 2016. Washington, USA, 2016. 15 p.
5. International Civil Aviation Organization (ICAO). Flight rules. Montreal: ICAO, 2005. 100 p.
6. EUROCONTROL. BADA User's Guide. Brussels: EUROCONTROL, 2004. 95 p.
7. Saraiskiy Yu. N., Lipin A.V., Lieberman Yu. I. Aeronautics. Part II. Radio navigation in flight along the route: A textbook. /St. Petersburg State University GA. St. Petersburg, 2013. 383 p.

8. Non-traditional navigation. Livejournal [Electronic resource] website // URL:
<https://otto-pilot.livejournal.com/2724.html>