

УДК 351.814.331

DOI 10.51955/2312-1327_2024_2_77

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ И РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ ПЛАНИРОВАНИИ ЧЕТЫРЕХМЕРНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА

*Нгуен Тхи Линь Фыонг^{1,2},
orcid.org/0000-0001-8932-6821,*

¹аспирант

*¹Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
Волоколамское ш., д. 4
Москва, 125993, Россия*

²преподаватель-исследователь

*²Вьетнамская Авиационная Академия,
104 ул. Нгуен Ван Чой, квартал 8, район Фу Ньюан
Хошимин, Вьетнам
phuongntlp@vaa.edu.vn*

*Евгений Сергеевич Неретин,
orcid.org/0000-0003-0174-8929,*

*кандидат технических наук, доцент
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
Волоколамское ш., д. 4
Москва, 125993, Россия
neretines@mai.ru*

*Нгуен Ныы Ман,
orcid.org/0000-0003-4176-101X*

*кандидат технических наук,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
Волоколамское ш., д. 4
Москва, 125993, Россия
nguenntm@mai.ru*

Аннотация. Обнаружение и разрешение конфликтов являются одной из ключевых задач в обеспечении безопасности и эффективности эксплуатации воздушного транспорта. В операциях на основе траекторий (от англ. ТВО – Trajectory based operation) воздушным судам (ВС) предоставляется большая гибкость в планировании траекторий на маршруте и большая ответственность за самоэшелонирование друг от друга, при котором пилоту потребуется помощь для безопасного и эффективного выполнения задачи децентрализованного разрешения конфликтов в полете по маршруту. В настоящей работе разрабатывается методика идентификации и разрешения конфликтных ситуаций в крейсерском режиме полета на основе четырехмерных узлов сетки (4D-сетка) и алгоритма поиска кратчайшего пути A-star (далее – A*) для формирования оптимальной четырехмерной траектории (4D-траектория) обхода. Данный

новый подход помогает избегать ложных предупреждений о потенциальных конфликтных ситуациях (ПКС) в воздухе из-за возможности своевременного их обнаружения и точного определения расстояния от рассматриваемого ВС до зон опасного сближения (ОС) с запретными для полетов зонами, зонами ограничения полетов, зонами сложных метеоусловий (СМУ) и другими ВС, что и позволяет автономно сформировать временно-пространственную траекторию их обхода. Для демонстрации эффективности предлагаемой методики идентификации и разрешения конфликтов при оперативном планировании 4D-траектории полета с использованием 4D-сетки и алгоритма поиска кратчайшего пути A-star (далее – A*) по заданным критериям оптимизации проведем три эксперимента в различных условиях воздушного пространства (при наличии зон опасного сближения и без них). Результаты проведенных экспериментов доказывают, что потенциальные опасные сближения ВС в полете эффективно идентифицированы и разрешены при применении предлагаемой методики.

Ключевые слова: обнаружение и разрешение конфликтов, самоэшелонирование, четырехмерная траектория, 4D-сетка, алгоритм A*.

DEVELOPMENT OF A CONFLICT DETECTION AND RESOLUTION METHODOLOGY USED IN THE OPERATIONAL FLIGHT 4D-TRAJECTORY PLANNING

*Nguyen Thi Linh Phuong^{1,2},
orcid.org/0000-0001-8932-6821,*

¹Ph. D. Student

*¹Moscow Aviation Institute (National Research University),
4, Volokolamskoe shosse
Moscow, 125993, Russia*

²teacher-researcher

*²Vietnam Aviation Institute,
104 Nguyen Van Troi, Ward 8, Phu Nhuan District
Ho Chi Minh City, Vietnam
phuongntlp@vaa.edu.vn*

Evgeny S. Neretin,

orcid.org/0000-0003-0174-8929,

*Candidate of Technical Sciences, Associated Professor
Moscow Aviation Institute (National Research University),*

4, Volokolamskoe shosse

Moscow, 125993, Russia

neretines@mai.ru

Nguyen Nhu Man,

orcid.org/0000-0003-4176-101X,

Candidate of Technical Sciences

Moscow Aviation Institute (National Research University),

4, Volokolamskoe shosse

Moscow, 125993, Russia

nguenm@mai.ru

Abstract. Conflict detection and resolution is one of the key tasks in ensuring the safety and efficiency of air transport. In Trajectory Based Operation (TBO), aircraft are given greater flexibility in planning trajectories along the route and greater responsibility for self-separation from each other, so the

pilot will need assistance to safely and efficiently perform the task of decentralized conflict resolution during the en-route flight. In this work, we develop a method for identifying and resolving conflict situations in cruising phase based on four-dimensional grid nodes (4D-grid) and the A-star shortest path search algorithm (A* for short) to form an optimal four-dimensional trajectory (4D-trajectory) bypass all airspace obstacles. This new approach helps to avoid false warnings about potential conflicts due to the ability to early detect them and accurately determine the distance from aircraft to areas of dangerous proximity (prohibited zones (PZ), zones of bad weather, other aircraft) and then autonomously form a time-spatial trajectory to bypass them. In order to demonstrate the effectiveness of the proposed method, we conduct three experiments in different airspace conditions (with and without the areas of dangerous proximity). The results of the experiments prove that potential dangerous proximities of aircraft in flight are effectively identified and resolved using the proposed methodology.

Keywords: Conflict detection and resolution, self-separation, 4D trajectory, 4D-grid, algorithm A*.

Введение

В современном воздушном пространстве значительно растущий объем движения вызывает серьезные проблемы с ограничениями пропускной способности и безопасности авиационных перевозок. Одной из наиболее инновационных и многообещающих парадигм в организации воздушного движения (ОрВД) является передача ответственности за соблюдение эшелонирования с опасными материальными объектами в воздушном пространстве (ВП) от секторных авиадиспетчеров летному экипажу. Такая полная передача ответственности за эшелонирование называется самоэшелонированием в воздухе или свободным полетом. Рассматриваемая усовершенствованная концепция полетов с самоэшелонированием относится к типу операций, основанных на траекториях, в том смысле, что каждое ВС управляет бесконфликтной 4D-траекторией и сообщает об этом другим ВС. Однако, поскольку в таком случае задача эшелонирования передается от авиадиспетчера к экипажу, то ожидается, что пилоту потребуется помощь для безопасного и эффективного выполнения задачи идентификации и децентрализованного разрешения конфликтов при оперативном планировании 4D-траектории полета по маршруту.

Существуют различные подходы к решению задачи идентификации и децентрализованного разрешения конфликтов, включающие вероятностные оценки различных факторов полета [Hernández-Romero et al., 2019; Short-term conflict..., 2017; Wanke et al., 2007], использование фильтров Калмана [Gong et al., 2013], методы, основанные на сетках [Петров, 2014; A 4D grid-based approach..., 2019; Jardín, 2005] и др., для обнаружения конфликтов и ряд методов для разрешения конфликтов: полуопределенного программирования, смешанно-целочисленного нелинейного программирования, нейронных сетей, генетические методы, геометрические методы, методы потенциальных полей и др. [Дегтярев и др., 2010; Исаев и др., 2009; Кумков и др., 2013; Alonso-Ayuso et al., 2016; Architecture..., 1996; Bilimoria, 2000; Comparison..., 2000; Eby, 1994; Henk A. P. Blom et al., 2015; Hoekstra et al., 1998; Kuchar et al., 2000; Mondoloni et al., 2001; Nogami et al., 1998; Resolution... 2001; Wallace et al., 2000; Zeghal, 1998].

Среди вышеперечисленных подходов метод, основанный на узлах сетки, применен в работе [Петров, 2014] и показал высокую эффективность в решении задачи децентрализованного разрешения недопустимых сближений между ВС с другими опасными областями как стационарными, так и перемещающимися. Однако в работе лишь рассмотрено движение ВС с постоянной скоростью по двумерной сетке в горизонтальной плоскости на постоянном эшелоне полета. А по предложенному подходу в работах [A 4D grid-based approach..., 2019; Jardin, 2005] все точки в каждой ячейке сетки рассматриваются как одна – центральная точка этой ячейки, что приводит к двум ситуациям: ложному предупреждению о недопустимом сближении ВС с опасными объектами в пределах одной ячейки, но фактическое расстояние между ними не нарушает правила эшелонирования; невыявлению потенциальной конфликтной ситуации, когда ВС пролетает близко к конфликтной ячейке на расстоянии менее указанных норм эшелонирования, а не заходя в нее.

В настоящей работе предлагается методика идентификации и разрешения конфликтных ситуаций в крейсерском режиме полета на основе узлов четырехмерной сетки и алгоритма поиска кратчайшего пути A-star (далее – A*). Применение данного нового подхода позволяет избежать ложные предупреждения о потенциальных конфликтах путем обеспечения своевременного их обнаружения и точного расчета расстояния от рассматриваемого ВС до зон ОС, что и позволяет автономно сформировать временно-пространственную траекторию их обхода с минимальным отклонением от запланированной 4D-траектории (ЗТ) .

Постановка задачи

Под потенциальной конфликтной ситуацией в полете ВС понимается недопустимое его сближение с запрещенными зонами – ЗЗ (зоны, запретные для полетов и зоны СМУ) и с другими ВС (встречный курс, попутное сокращение дистанции, пересечение траекторий).

Постановка задачи предлагаемой методики идентификации и децентрализованного разрешения конфликтных ситуаций для ВС на крейсерском участке полета формулируется следующим образом: необходимо выработать методики идентификации об опасных сближениях ВС с другими ВС, с запрещенными зонами ВП и сформировать оптимальную 4D-траекторию обхода по узлам сетки пространства (рис. 1) с минимальным отклонением от запланированной траектории.

В качестве примерной задачи предполагается, что ВС и зоны СМУ перемещаются в трехмерной координатной сетке размером 2222 на 2222 на 22 точки, покрывающей пространство между параллелями 10° и 25° северной широты, меридианами 100° и 120° восточной долготы и эшелонами полета от FL180 до FL400. Информация о воздушном движении и метеорологическая информация могут быть получены от других ВС, радиолокационных станций, средств автоматического зависимого наблюдения (АЗН), бортового метеолокатора и т.д.

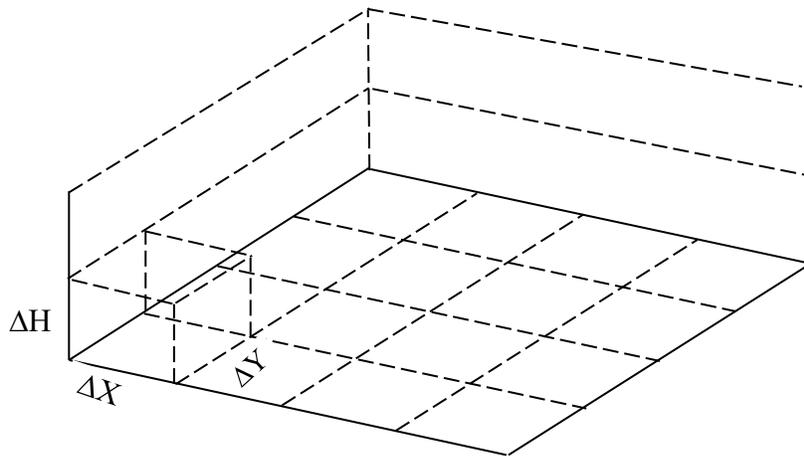


Рисунок 1 – Фрагмент координатной сетки с шагами разделения

Определение правила декомпозиции пространства является важной частью всей рассматриваемой задачи, необходимо определить шаги сетки по горизонтали и вертикали. Правильность определения шага сетки напрямую влияет на качество и корректность формирования оптимальной 4D-траектории обхода.

В качестве требований по точности в рассматриваемом вопросе следует учитывать нормы эшелонирования и также необходимо принимать во внимание летно-технические характеристики ВС и его динамические особенности при определении шага сетки.

По рекомендации ИКАО [ICAO..., 2016; ICAO..., 2012] в воздушном пространстве устанавливаются минимальные интервалы вертикального эшелонирования – 300 м (1000 футов) между ВС до эшелона полета FL290 и между ВС с применением сокращенных интервалов вертикального эшелонирования (RVSM) от эшелона полета FL290 до эшелона полета FL410. Минимум горизонтального эшелонирования при использовании системы наблюдения обслуживания воздушного движения (радар, АЗН-В или MLAT), предписанный документом ИКАО Doc. 4444, составляет 5 морских миль на крейсерском участке полета.

В соответствии с летно-техническими характеристиками ВС и его динамическими особенностями при выполнении маневрирования в вертикальной плоскости устанавливается допустимый угол наклона траектории на крейсерском участке полета для ВС гражданской авиации не более 8° . При движении ВС по узлам предлагаемой сетки пространства, в которой каждая ячейка имеет размеры $\Delta X = \Delta Y = 5$ морских миль и $\Delta H = 1000$ футов, угол наклона траектории равен 0 или θ_{max} в случае отключения перпендикулярного движения ВС (т.е. запрещается движение ВС к узлу над и под текущим узлом).

$$\theta_{max} = \arctan\left(\frac{1000\text{ft}}{\sqrt{(5NM)^2 + (5NM)^2}}\right) = 2.665^\circ < \theta_{oon} = 8^\circ \quad (1)$$

Таким образом, для решения рассматриваемой задачи достаточно выбрать шаги сетки, равные $\Delta H = 1000$ футов по вертикали и $\Delta X = \Delta Y = 5$ морских миль по

горизонталы плоскости, которые удовлетворяют требованиям по точности результатов траекторных вычислений и безопасности выполнения полетов.

Методика идентификации и разрешения опасных сближений

Для решения поставленной задачи по предлагаемой методике необходимо решить следующие подзадачи:

- преобразовать координаты между геодезической и прямоугольной системами координат;
- интегрировать прогнозируемые координаты запретных зон, зон СМУ и ВС-нарушителей в 4D-сетку;
- идентифицировать запретные узлы в 4D-сетку;
- вписывать найденные запретные узлы в список CLOSELIST нерассмотренных узлов сетки;
- сформировать оптимальную 4D-траекторию обхода с помощью алгоритма A*.

Формулы преобразования между геодезической и прямоугольной системами координат [ICAO..., 2002]

Для целей аэронавигации в гражданской авиации введена система координат WGS-84 с точностью публикации, соответствующей положениям Приложений 4 и 15 ИКАО.

Преобразование из геодезической системы координат в прямоугольную:

$$\begin{aligned}
 &(\varphi, \lambda, h)_{\text{WGS84}} \rightarrow (X, Y, Z)_{\text{WGS84}} \\
 &\begin{cases} X_i = [N(\varphi_i) + h_i] \cdot \cos \varphi_i \cdot \cos \lambda_i \\ Y_i = [N(\varphi_i) + h_i] \cdot \cos \varphi_i \cdot \sin \lambda_i \\ Z_i = [(1 - e^2)N(\varphi_i) + h_i] \cdot \sin \varphi_i \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

где, φ_i – широта (°); λ_i – долгота (°); h_i – высота (м)

Преобразование из прямоугольной системы координат в геодезическую:

$$\begin{aligned}
 &(X, Y, Z)_{\text{WGS84}} \rightarrow (\varphi, \lambda, h)_{\text{WGS84}} \\
 &\begin{cases} \varphi_i = \arctan \frac{Z_i}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2}} \left(1 - e^2 \frac{N(\varphi_i)}{N(\varphi_i) + h_i}\right)^{-1} \\ \lambda_i = \arctan \frac{Y_i}{X_i} \\ h_i = \frac{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2}}{\cos \varphi_i} - N(\varphi_i) \end{cases} \quad (3)
 \end{aligned}$$

где $e^2 = 0,006694379990141$; $N(\varphi_i) = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \cdot \sin^2 \varphi_i}}$ – радиус кривизны первого

вертикала системы WGS-84 в точке с широтой φ_i ; $a = 6\,378\,137$ м – большая полуось Земли.

На рисунке 2 изображены начало координат и оси системы координат WGS-84, которые также служат геометрическим центром и осями X, Y и Z эллипсоида WGS-84.

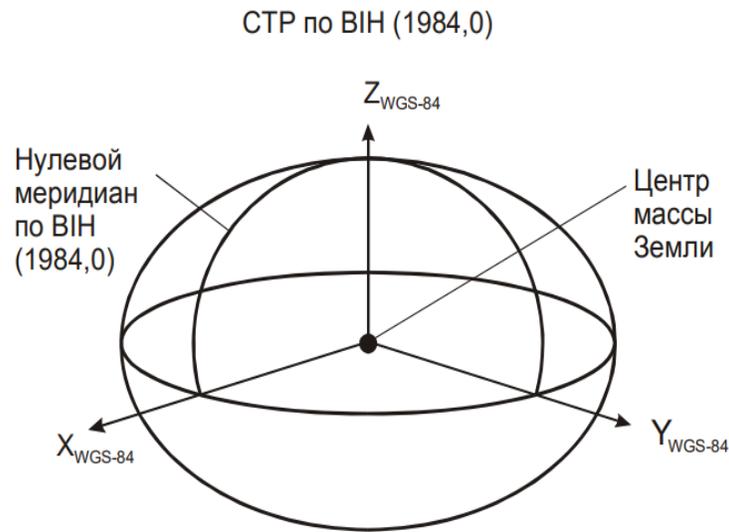


Рисунок 2 – Система координат WGS-84

Интегрирование запретных зон, зон СМУ и ВС-нарушителей в 4D-сетку

Координаты запретных зон получены из сборника аэронавигационной информации АИП (от англ. AIP – aeronautical information publication) государств, воздушное пространство которых входит в рассматриваемые сетки. Координаты зон СМУ получены из источников, выдающих прогнозируемые авиационные метеорологические данные. Координаты ВС-нарушителей (далее – ВС2) получены от них и/или от органов УВД через средства передачи данных как АНЗ, CPDLC.

Все координаты ВС2, запретных зон и зон СМУ располагаются в сетке пространства по их фактическим значениям.

Идентификация запретных узлов зон опасного сближения в 4D-сетке

Запретными узлами называются узлы сетки, попадающие (красные точки на рисунке 3) в запрещенные зоны (запретные для полетов зоны, зоны СМУ) и окружающие узлы (красные точки на рисунке 3), ближайšie к границам этих зон, и также узлы (синие точки на рисунке 3) в некотором заданном диапазоне $D_{\text{доп}}$ допустимой области безопасности. Далее эти запретные узлы будут добавлены в список CLOSELIST и не будут рассматриваться алгоритмом А* при формировании оптимальной траектории обхода.

Запретные узлы зон ОС с другими ВС2 определяются в зависимости от мест взаиморасположения ВС2 и 24 соседних рассматриваемых алгоритмом А* узлов в каждом текущем шаге его работы. Запретным (желтые точки на рисунке 3) является рассматриваемый узел, который одновременно нарушает нормы горизонтального и вертикального эшелонирования к ВС2, т.е. разница широт и долгот ВС2 и того узла менее 5 морских миль, и разница их высот менее 1000 футов.

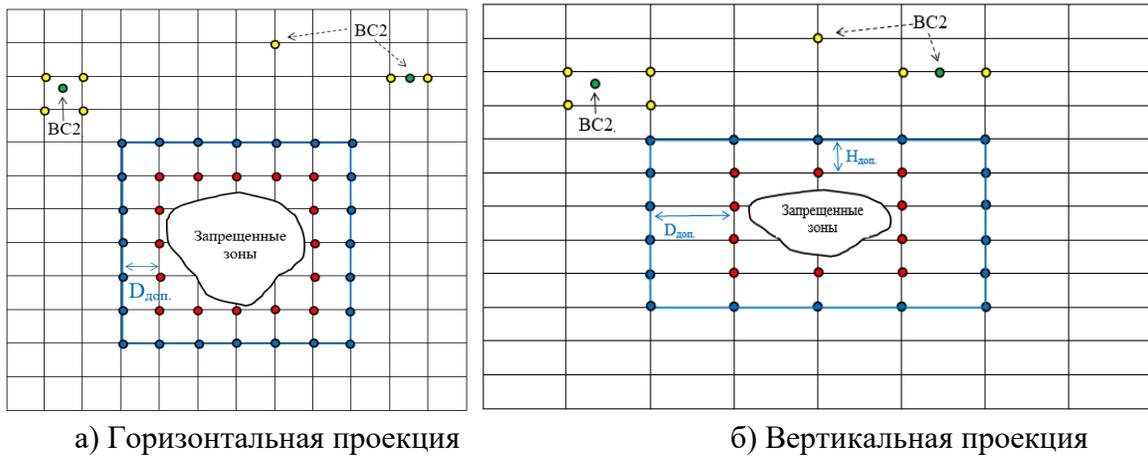


Рисунок 3 – Идентификация запретных узлов

В таблице 1 представлен общий результат идентификации запретных узлов зон потенциального ОС с другими ВС.

Таблица 1 – Запретные узлы зон потенциального ОС с другими ВС

Местоположения	Запретные узлы
ВС2 находится в анализируемом узле	Анализируемый узел
ВС2 находится в плоскости 2 анализируемых узлов	2 анализируемых узла
ВС2 находится в отрезке 4 анализируемых узлов	4 анализируемых узла
ВС2 находится внутри ячейки 8 анализируемых узлов	8 анализируемых узлов

После идентификации запретных узлов или обнаружения опасных сближений (конфликтов), варианты ее разрешения автоматически рассчитываются по процедуре алгоритма А*, в результате работы которого получена оптимальная 4D-траектория обхода.

Формирование оптимальной четырехмерной траектории обхода

Алгоритм А* выбирает узлы сетки, удовлетворяющие заданным критериям оптимизации (минимизация длины траектории обхода и минимизация отклонения от ЗТ). $S = \{s_0, s_1, \dots, s_{N-1}, s_N\}$ представляет собой набор узлов от пункта отправления

s_0 до пункта назначения s_N на 4D-сетки. Каждый узел s_i характеризуется тремя географическими координатами (x_i, y_i, z_i) и временем (t_i) .

В процессе решения задачи поиска оптимального пути от s_0 до s_N , в каждом известном узле s_{i-1} алгоритм A^* выбирает соседний узел s_i , удовлетворяющий минимуму целевой функции (функции стоимости) f :

$$J = \sum_{i=1}^N f_{s_i} = \sum_{i=1}^N g_{s_{i-1}s_i} + \sum_{i=1}^N h_{s_i s_N} \rightarrow \min \quad (4)$$

$$g_{s_{i-1}s_i} = k_{FPL} \Delta_{FPL_i} = k_{FPL} \sqrt{(x_i - x_{FPL_j})^2 + (y_i - y_{FPL_j})^2 + (z_i - z_{FPL_j})^2} \quad (4.1)$$

$$h_{s_i s_N} = k_{FPL} \Delta_{FPL_N} = k_{FPL} \sqrt{(x_i - x_N)^2 + (y_i - y_N)^2 + (z_i - z_N)^2} \quad (4.2)$$

где, $i = 1..N$ – количество найденных алгоритмом A^* узлов; $j = 1..M$ – количество точек ЗТ; $\sum_{i=1}^N g_{s_{i-1}s_i}$ – стоимость пути от s_0 до s_i ; $\sum_{i=1}^N h_{s_i s_N}$ – оценочная (эвристическая) стоимость пути от s_i до конечного узла s_N ; Δ_{FPL_i} – расстояние от s_i до точек ЗТ, расположенных в сторону узла s_N ; Δ_{FPL_N} – расстояние от s_i до s_N ; $k_{FPL} \geq 0$ – штрафной коэффициент, пропорциональный близости к ЗТ.

По логике работы алгоритма A^* очевидно, что большое значение штрафного коэффициента k_{FPL} приводит к выбору меньших значений расстояний Δ_{FPL_i} и Δ_{FPL_N} , чтобы обеспечить минимум целевой функции, то есть сформулированная алгоритмом A^* траектория более близка к ЗТ при большом значении k_{FPL} . Таким образом, алгоритм A^* сформулирует кратчайшую траекторию обхода вперед в сторону пункта назначения с наименьшим отклонением от ЗТ.

В процессе работы алгоритма A^* узлы сетки будут разделены на известные узлы и полностью оцененные узлы. Известные узлы – это узлы, для которых известен путь от s_0 до них (т.е. определены значения функций g и h), при этом пройденный путь может не быть оптимальным. Все эти узлы вместе с их атрибутами запоминаются в открытом списке, называемом OPENLIST. В начале поиска этот список содержит только начальный узел s_0 . Полностью оцененные узлы – это узлы, в которых определен наиболее оптимальный путь от s_0 до них. Эти узлы и все их атрибуты хранятся в закрытом списке, называемом CLOSELIST, чтобы избежать повторения поиска наилучшего пути к ним. После добавления в CLOSELIST эти узлы больше не будут рассматриваться алгоритмом A^* . В начальный момент CLOSELIST является пустым списком, если на сетке нет запрещенных зон, или содержит все ранее идентификационные запретные узлы зон (если они есть).

К атрибутам узла относятся значения функций g , h , f и информация о предшествующем узле в списке узлов на определенном пути от s_0 до него. Узел, предшествующий рассматриваемому, называется родителем этого узла. На основе этой информации возможен переход обратно от рассматриваемого узла к узлу пункта отправления для определения всех узлов на найденном оптимальном пути. Как только узел будет полностью оценен, он будет добавлен в список CLOSELIST, а его соседние узлы, не входящие в CLOSELIST, будут добавлены в список OPENLIST. Соседние узлы в списке OPENLIST будут рассматриваться по очереди. В случае, если будет найден более оптимальный путь от s_0 до этих узлов (т. е. новая функция g_{new} меньше, чем сохраненное значение функции g), то их атрибуты будут обновлены.

Поиск завершится, когда узел s_N будет добавлен в список CLOSELIST. Список узлов наиболее оптимального пути из s_0 в s_N (черная жирная линия на рисунке 4) будет создан на основе их родительской информации, начиная с узла s_N и работая в обратном направлении до узла s_0 .

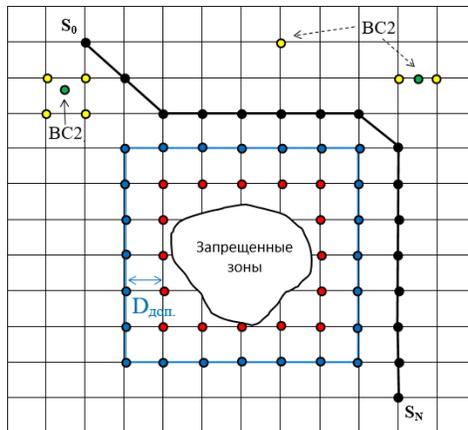


Рисунок 4 – Сформированная алгоритмом A^* оптимальная траектория обхода

Результативный оптимальный путь, найденный алгоритмом A^* , является решением в задаче децентрализованного разрешения конфликтов и формирования оптимальной 4D-траектории обхода.

Сформированная алгоритмом A^* траектория представляет собой ломаную линию, допускающую прямые и диагональные переходы между соседними узлами, по которым должно осуществляться движение ВС. Следовательно, на маршруте существуют переходы между участками маршрута с поворотом в 90 градусов, по которым осуществление движения ВС будет невозможным. Принимая во внимание летно-технические характеристики ВС, следует отметить, что движение ВС в таких поворотных пунктах можно осуществлять с радиусом, равным:

$$R_i = \frac{GS_i^2}{g \cdot \tan \gamma} \quad (5)$$

где, R_i – радиус поворота, м; GS_i – средняя путевая скорость ВС по i -ому участку, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\gamma = 5^\circ$ – угол крена (для поворота на больших высотах).

Точность результатов планирования траектории обеспечена учетом нижеуказанной по формулам (5), (7), (8) корректировки дистанции крейсерского этапа, ввиду спрямления поворотных участков для траектории, сформированной алгоритмом А*.

Дистанция рассматриваемого фрагмента (L) от А до D равняется сумме дистанций участков АВ и ВС в соответствии с формулой:

$$L = AB + BC + CD \quad (6)$$

Дистанции участков движения по дугам окружностей рассчитываются по формуле Гюйгенса:

$$L_i = \frac{\pi R_i \beta_i}{180^\circ} \quad \text{и} \quad L_j = \frac{\pi R_j \beta_j}{180^\circ}, \quad (7)$$

где L_i, L_j – длина дуги окружности с радиусом R_i, R_j соответственно, м; β – центральный угол, градусов.

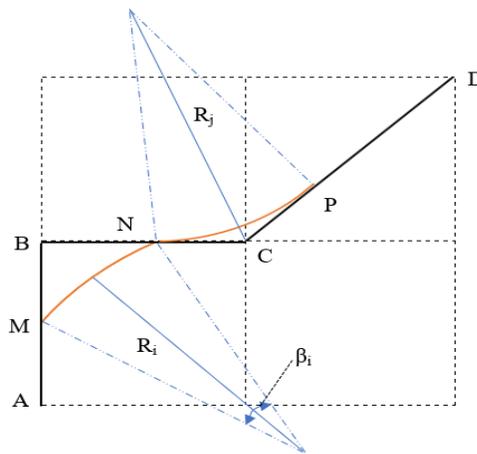


Рисунок 5 – Фрагмент поворотных участков траектории и их спрямление

Дистанции фрагментов спрямленных участков (L') от А до D должны вычисляться по формуле:

$$L' = AM + MN + NP + PD = AM + L_i + L_j + PD < L \quad (8)$$

Результаты и обсуждения

Для того, чтобы продемонстрировать эффективность предлагаемой методики идентификации и разрешения конфликтов при оперативном планировании 4D-траектории полета с помощью 4D-сетки и алгоритма поиска кратчайшего пути по критериям оптимизации, проведем три эксперимента в различных условиях воздушного пространства (с перемещающимися запрещенными зонами и без них).

Входными данными для экспериментов являются координаты пунктов отправления $s_0 = (15.6043, 108.2995, 18000, 0)$ и назначения $s_N = (11.4235, 107.5833, 18000, 2092)$, крейсерская скорость воздушного судна (например, для Боинг 747-400, $M = 0.855-0.88$), а также рассчитанная ЗТ на базе перспективной системы автоматического планирования полетов при внедрении операций, основанных на 4D-траекториях. В качестве ЗТ в данной работе используется предпочитаемая пользователем 4D-траектория (ППТ), полученная посредством предложенного в работе [Neretin et al., 2022] метода машинного обучения с помощью набора данных реализованных полетов по соответствующему маршруту.

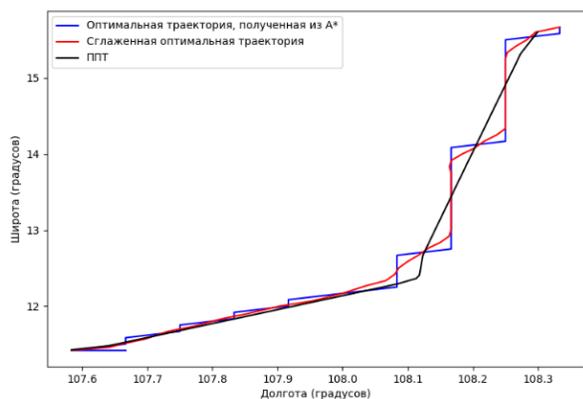
Чтобы использовать алгоритм A^* при поиске оптимальных траекторий по узлам координатной сетки, сначала необходимо преобразовать данные из геодезической системы в прямоугольную систему координат. Полученные в проведенных экспериментах координаты точек оптимальных 4D-траекторий (Рис. 5) также надо преобразовать обратно в геодезическую систему координат для использования в системах, которые взаимодействуют с графическими объектами.

lat	long	alt	time	dgc
15.58333	108.33333	18000.0	0	0.0
15.48333	108.27056	19000.0	50.92447	12.99529
15.41667	108.26722	20000.0	79.978	20.41685
15.33333	108.25056	21000.0	116.91797	29.85382
15.25	108.24722	22000.0	153.2116	39.12696
15.16667	108.25	23000.0	189.49867	48.39799
15.08333	108.25	24000.0	225.76811	57.66424
15.0	108.25	25000.0	262.03902	66.93048
14.91667	108.25	25000.0	298.29035	76.19672
14.83333	108.25	26000.0	334.56248	85.46297
14.75	108.25	27000.0	370.83608	94.72921
14.66667	108.25	28000.0	407.11116	103.99546
14.58333	108.25	29000.0	443.38772	113.2617
14.5	108.25	29000.0	479.64472	122.52794
14.41667	108.25	30000.0	515.92251	131.79419
14.33333	108.24667	31000.0	552.22916	141.06739
14.25	108.23278	32000.0	588.98481	150.45371
14.18333	108.21611	32000.0	618.84387	158.08124
14.08333	108.19944	32000.0	662.92896	169.34507
14.0	108.18278	32000.0	699.87441	178.78411
13.91667	108.16944	32000.0	736.57488	188.1614
13.83333	108.16667	32000.0	772.85431	197.43249
13.75	108.16667	32000.0	809.11428	206.69874
13.66667	108.16667	32000.0	845.37401	215.96498
13.58333	108.16667	32000.0	881.63349	225.23122
13.5	108.16667	32000.0	917.89273	234.49747
13.41667	108.16667	32000.0	954.15173	243.76371
13.33333	108.16667	32000.0	990.41049	253.02996
13.25	108.16667	32000.0	1026.66901	262.2962
13.16667	108.16667	32000.0	1062.9273	271.56244
13.08333	108.16667	32000.0	1099.18535	280.82869
13.0	108.16667	32000.0	1135.44377	290.09493

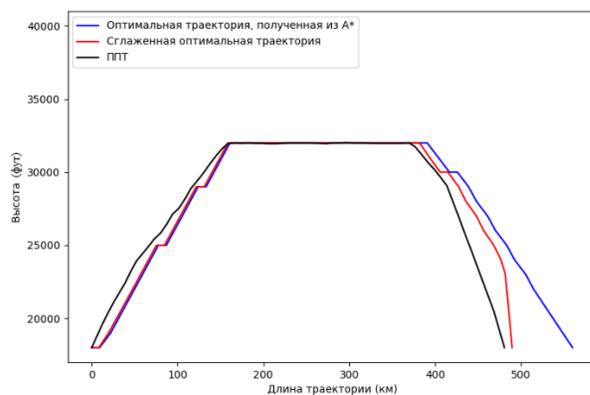
Рисунок 6 – Пример файла данных об оптимальной сглаженной 4D-траектории

Для того, чтобы наглядно проследить за правдоподобием полученных 4D-траекторий и способностью их обхода зон ОС при решении задач идентификации и разрешении ПКС, были построены графики 4D-траекторий на плоскости широта – долгота и вертикальных профилей высоты полета по его дистанции в различных условиях ВП (рисунки 6-8).

Эксперимент № 1: Сформировать оптимальную траекторию полета при отсутствии опасных сближений.



а) траектории на плоскости широта – долгота

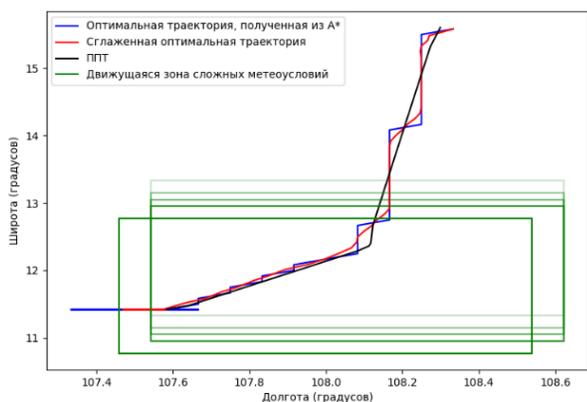


б) вертикальный профиль траекторий

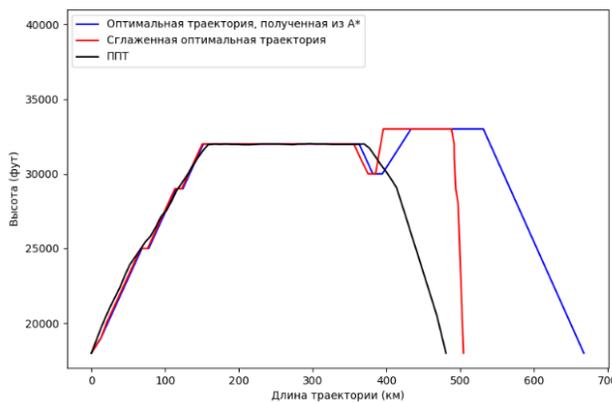
Рисунок 7 – 4D-траектории при отсутствии опасных сближений

Эксперимент № 2: Идентифицировать зоны опасного сближения ВС с перемещающейся зоной СМУ и сформировать оптимальные 4D-траектории обхода.

Пусть в ВП во время планирования 4D-траектории полета, зона СМУ в форме прямоугольного параллелепипеда с размером 222 км x 111 км x 2000 футов (от FL310 до FL330) перемещается вниз по высоте и по уменьшению долготы в течение 5 циклов работы алгоритма A* (начиная с 39-ого цикла).



а) траектории на плоскости широта – долгота

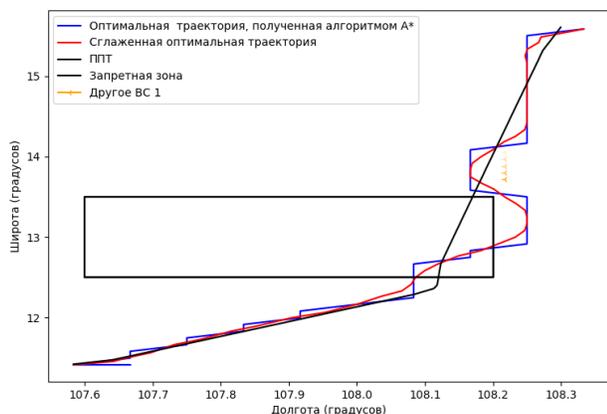


б) вертикальный профиль траекторий

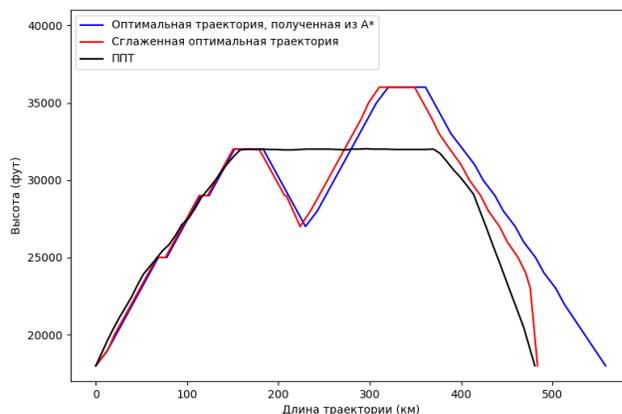
Рисунок 8 – 4D-траектории при наличии перемещающейся зоны СМУ

Эксперимент № 3: Идентифицировать зоны опасного сближения ВС с перемещающимся ВС2 с запретной зоной и сформировать оптимальные 4D-траектории обхода.

Пусть в ВП во время планирования 4D-траектории полета, по ормодромии между s_0 и s_n находится запретная зона в форме прямоугольного параллелепипеда с размером 111 км x 66.6 км x 35000 футов и появляется ВС, перемещающееся вниз по высоте в течение 3 циклов работы алгоритма A* (начиная с 19-ого цикла).



а) траектории на плоскости широта – долгота



б) вертикальный профиль траекторий

Рисунок 9– 4D-траектории при наличии запретной зоны и перемещающегося ВС2

Результаты экспериментов, представленные на рисунках 5-7, доказывают, что потенциальные опасные сближения ВС со стационарными и перемещающимися материальными объектами в ВП эффективно идентифицированы и разрешены с помощью предложенной в настоящей работе методики. Результативная оптимальная 4D-траектория помогает пилотам улучшить ситуационную осведомленность и поддерживать их в принятии важных решений в полете по маршруту.

В таблице 2 представлены параметры согласованной 4D-траектории и рассчитанные параметры сглаженной оптимальной 4D-траектории обхода различных зон опасного сближения в ВП.

Таблица 2 – Параметры траекторий

Запланированная 4D-траектория		Наличие опасного сближения	Сглаженная 4D-траектория обхода		Отклонение по длине (км)	Отклонение по времени (с)
Длина (км)	Время полета (с)		Длина (км)	Время полета (с)		
481	1904	НЕТ	483	1893	+ 2	- 11
		Перемещающаяся зона СМУ	504	1979	+ 23	+ 75
		Запретная зона и перемещающееся ВС2	484	1923	+ 3	+ 19

Заключение

В работе предложена методика идентификации и разрешения конфликтных ситуаций в крейсерском режиме полета на основе узлов четырехмерной сетки и алгоритма поиска кратчайшего пути A*, применение которой позволяет избежать ложные предупреждения о потенциальных конфликтах путем обеспечения расчета

расстояния от рассматриваемого ВС до зон опасного сближения и автономно сформировать временно-пространственную траекторию их обхода с минимальным отклонением от запланированной 4D-траектории (т.е. позволяет выдержать запланированную 4D-траекторию при возникновении незапланированных конфликтных ситуаций в процессе полета).

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод об адекватности применения предлагаемой методики для формирования 4D-траектории обхода при оперативном планировании в процессе полета на маршруте и возможности ее применения в бортовых и наземных системах проектирования и управления 4D-траекториями полета.

Библиографический список

- Дегтярев О. В.* Разработка бортовых алгоритмов обнаружения и децентрализованного разрешения опасных сближений в воздухе, основанных на методе потенциальных полей / О. В. Дегтярев, В. С. Орлов, Б. В. Пучков // Теория и системы управления. 2010. № 5. С. 93.
- Исаев В. К.* Некоторые задачи 2D-маневрирования самолета с целью обеспечения вихревой безопасности / В. К. Исаев, В. В. Золотухин // Вестник МАИ. 2009. Том 16, № 7. С. 1. EDN LASYGP.
- Кумков С. И.* Задача обнаружения и разрешения конфликтных ситуаций в автоматизированной системе управления воздушным движением / С. И. Кумков, С. Г. Пятко // Научный вестник «НИИ Аэронавигации». 2013. № 12. С. 35-46.
- Петров Н. А.* Разработка универсального алгоритма разрешения конфликтных ситуаций в воздушном пространстве при полете магистрального самолета // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 205. С. 129-136.
- A 4D grid-based approach for efficient conflict detection in large-scale multi-UAV scenarios / J. J. Acevedo, Á. R. Castaño, J. L. Andrade-Pineda, A. Ollero // 2019 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS). Cranfield, UK, 2019. pp. 18-23. doi: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999724.
- Alonso-Ayuso A.* Multiobjective optimization for aircraft conflict resolution: A metaheuristic approach / A. Alonso-Ayuso, L. F. Escudero, F. J. Martin-Campo // European Journal of Operational Research. 2016. Vol. 248(2). pp. 691-702.
- Architecture of National Airspace System (NAS). Concepts for Future NAS Operations. Department of Transportation, FAA, USA. 1996.
- Bilimoria K. D.* A Geometric Optimization Approach to Aircraft Conflict Resolution // AIAA Guidance, Navigation and Control Conf. Denver, 2000.
- Comparison of centralized and decentralized conflict resolution strategies for multiple-aircraft problems / K. D. Bilimoria, H. Q. Lee, Z. H. Mao [et al] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. Denver, 2000.
- Eby M. S.* A Self-Organizational Approach for Resolving Air Traffic Conflicts // The Lincoln Laboratory Journal. 1994. Vol. 7, № 2. P. 239-254.
- Gong H.* Flight short-term collision detection based on control tower simulation system / H. Gong, X. Zhou // Computer. Technology and Development. 2013. Vol. 23, № 4. pp. 151-154.
- Henk A. P. Blom.* Safety evaluation of advanced self-separation under very high en route traffic demand / A. P. Blom Henk, G. J. Bakker // Journal of Aerospace Information Systems. 2015. Vol. 12, № 6. pp. 413-427.
- Hernández-Romero E.* A probabilistic approach to measure aircraft conflict severity considering wind forecast uncertainty / E. Hernández-Romero, A. Valenzuela, D. Rivas // Aerospace Science and Technology. 2019. Vol. 86. pp. 401-414. doi: 10.1016/j.ast.2019.01.024.

- Hoekstra J. M. M.* Conceptual Design of Free Flight with Airborne Separation Assurance / J. M. M. Hoekstra, M. Gent, M. Ruigrok // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. Boston, 1998.
- ICAO 2002. Doc 9674 – World Geodetic System — 1984 (WGS-84) Manual. Second edition. 2002.
- ICAO 2012. Doc 9574 – Manual on Implementation of a 300 m (1000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive. Third edition. 2012.
- ICAO 2016. Doc 4444 – Procedures for Air Navigation Services/Air Traffic Management (PANS/ATM). 16th Edition. 2016.
- Jardin M.* Grid-Based Strategic Air Traffic Conflict Detection // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 2005. doi:10.2514/6.2005-5826.
- Kuchar J. K.* A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods / J. K. Kuchar, L. C. Yang // IEEE Trans, on Intelligent Transportation Systems. 2000. Vol. 1, № 4. pp. 179-189.
- Mondoloni S.* An Airborne Conflict Resolution Approach Using a Genetic Algorithm / S. Mondoloni, S. Conway // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. Montreal, 2001.
- Neretin E. S.* An Analysis of Human Interaction and Weather Effects on Aircraft Trajectory Prediction via Artificial Intelligence / E. S. Neretin, N. T. L. Phuong, N. N. H. Quan // 2022 XIX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh). Moscow, 2022. pp. 85-89. doi: 10.1109/TSCZh55469.2022.9802458.
- Nogami J.* Real-time Decision Support for Air Traffic Management, Utilizing Concept Learning / J. Nogami, S. Nakasuka, K. Hori // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. Boston, 1998.
- Resolution of Conflicts Involving Many Aircraft via Semi-definite Programming / E. Frazzoli, Z. H. Mao, J. H. Oh [at al.] // Journal Guidance, Control and Dynamics. 2001. Vol. 24, № 1. P. 79-86. DOI 10.2514/2.4678.
- Short-term conflict detection algorithm for free flight in low-altitude airspace / Y. Liu, J. Xiang, Z. Luo, W. Jin // Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2017. Vol. 43, № 9. pp. 1873-1881. DOI 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0687.
- Wallace E.* Advances in Force Field Conflicts Resolution Algorithms / E. Wallace, I. Kelly // AIAA Guidance, Navigation and Control Conf. Denver, 2000.
- Wanke C.* Incremental, Probabilistic Decision Making for En Route Traffic Management / C. Wanke, D. Greenbaum // Air Traffic Control Quarterly. 2007. № 15(4). pp. 299-319.
- Zeghal K.* A Review of Different Approaches based on Force Fields for Airborne Conflict Resolution // AIAA Guidance, Navigation and Control Conf. Boston, 1998.

References

- Acevedo J. J., Castaño Á. R., Andrade-Pineda J. L., Ollero A.* (2019). A 4D grid-based approach for efficient conflict detection in large-scale multi-UAV scenarios. *2019 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS)*. Cranfield, UK, 2019. pp. 18-23. doi: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999724.
- Alonso-Ayuso A., Escudero L. F., Martin-Campo F. J.* (2016). Multiobjective optimization for aircraft conflict resolution: A metaheuristic approach. *European Journal of Operational Research*. 248(2): 691-702.
- Architecture of National Airspace System (NAS). Concepts for Future NAS Operations. Department of Transportation, FAA, USA. 1996.
- Bilimoria K. D.* (2000). A Geometric Optimization Approach to Aircraft Conflict Resolution. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conf.* Denver, 2000.
- Bilimoria K. D., Lee H. Q., Mao Z. H. [et al].* (2000). Comparison of centralized and decentralized conflict resolution strategies for multiple-aircraft problems. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf.* Denver, 2000.

Degtyarev O. V., Orlov V. S., Puchkov B. V. (2010). Development of on-board algorithms for detection and decentralized resolution of dangerous approaches in the air based on the method of potential fields. *Theory and Control Systems*. 5: 93. (in Russian)

Eby M. S. (1994). A Self-Organizational Approach for Resolving Air Traffic Conflicts. *The Lincoln Laboratory Journal*. 7(2): 239-254.

Frazzoli E., Mao Z. H., Oh J. H. [et al.]. (2001). Resolution of Conflicts Involving Many Aircraft via Semi-definite Programming. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 24(1): 79-86. DOI 10.2514/2.4678.

Gong H., Zhou X. (2013). Flight short-term collision detection based on control tower simulation system. *Computer Technology and Development*. 23(4): 151-154.

Henk A. P. Blom, Bakker G. J. (2015). Safety evaluation of advanced self-separation under very high en route traffic demand. *Journal of Aerospace Information Systems*. 12(6): 413-427.

Hernández-Romero E., Valenzuela A., Rivas D. (2019). A probabilistic approach to measure aircraft conflict severity considering wind forecast uncertainty. *Aerospace Science and Technology*. 86: 401–414. doi: 10.1016/j.ast.2019.01.024.

Hoekstra J. M. M., Gent M., Ruigrok M. (1998). Conceptual Design of Free Flight with Airborne Separation Assurance. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf.* Boston, 1998.

ICAO 2002. Doc 9674 – World Geodetic System — 1984 (WGS-84) Manual. Second edition. 2002.

ICAO 2012. Doc 9574 – Manual on Implementation of a 300 m (1000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive. Third edition. 2012.

ICAO 2016. Doc 4444 – Procedures for Air Navigation Services/Air Traffic Management (PANS/ATM). 16th Edition. 2016.

Isaev V. K., Zolotukhin V. V. (2009). Some tasks of 2D aircraft maneuvering in order to ensure vortex safety. *Bulletin of MAI*. 16(7): 1. (in Russian)

Jardin M. (2005). Grid-Based Strategic Air Traffic Conflict Detection. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. 2005. doi:10.2514/6.2005-5826.

Kuchar J. K., Yang L. C. (2000). A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods. *IEEE Trans, on Intelligent Transportation Systems*. 1(4): 179-189.

Kumkov S. I., Pyatko S. G. (2013). The task of detecting and resolving conflict situations in an automated air traffic control system. *Scientific Bulletin of the Research Institute of Aeronautics*. 12: 35-46. (in Russian)

Liu Y., Xiang J., Luo Z., Jin W. (2017). Short-term conflict detection algorithm for free flight in low-altitude airspace. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 43(9): 1873-1881. DOI 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0687.

Mondoloni S., Conway S. (2001). An Airborne Conflict Resolution Approach Using a Genetic Algorithm. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf.* Montreal, 2001.

Neretin E. S., Phuong N. T. L., Quan N. N. H. (2022). An Analysis of Human Interaction and Weather Effects on Aircraft Trajectory Prediction via Artificial Intelligence. *2022 XIX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh)*. Moscow, 2022. pp. 85-89. doi: 10.1109/TSCZh55469.2022.9802458.

Nogami J., Nakasuka S., Hori K. (1998). Real-time Decision Support for Air Traffic Management, Utilizing Concept Learning. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf.* Boston, 1998.

Petrov N. A. (2014). Development of a universal algorithm for resolving conflict situations in airspace during the flight of a mainline aircraft. *Scientific Bulletin of MSTU GA*. 205: 129-136. (in Russian)

Wallace E., Kelly I. (2000). Advances in Force Field Conflicts Resolution Algorithms. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conf.* Denver, 2000.

Wanke C., Greenbaum D. (2007). Incremental, Probabilistic Decision Making for En Route Traffic Management. *Air Traffic Control Quarterly*. 15(4): 299-319.

Zeghal K. (1998). A Review of Different Approaches based on Force Fields for Airborne Conflict Resolution. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conf.* Boston, 1998.