

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-3-47-62

Оптимизация сети маршрутов обслуживания воздушного движения с ограничением углов пересечения

Нгуен Нгок Хоанг Куан¹, В.Н. Нечаев², Р.А. Субботин²

¹Вьетнамская авиационная академия, г. Хошимин, Вьетнам

²Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Аннотация: Ежедневно в воздушном пространстве перемещаются тысячи воздушных судов (ВС), управление которыми осуществляется профессиональной командой специалистов – поставщиков аэронавигационного обслуживания. Для обеспечения качественной и эффективной организации воздушного движения (ОрВД) поставщики аэронавигационного обслуживания непрерывно разрабатывают новые подходы к модернизации и автоматизации всех процессов, связанных с этим. Одним из ключевых направлений является оптимизация сети маршрутов обслуживания воздушного движения (ОВД), что способствует увеличению пропускной способности (ПС) воздушного пространства (ВП), снижению загруженности и повышению эффективности предоставления ОВД. В данной статье рассматривается разработка модели оптимизации сети маршрутов ОВД с использованием алгоритма A-star с целью минимизации расстояний маршрутов. Исследование включает анализ с учетом и без учета угловых ограничений в точках пересечения маршрутов в трех основных сценариях. Оптимизация сети маршрутов ОВД приносит значительные преимущества в повышении качества предоставления услуг ОрВД и снижении эксплуатационных расходов для авиакомпаний. Эта модель была успешно применена в ВП районного диспетчерского центра (РДЦ) Хошимина. Результаты применения модели демонстрируют высокую эффективность и практическую ценность при ее использовании в ВП с высокой интенсивностью.

Ключевые слова: ОрВД, модель оптимизации, сеть маршрутов ОВД, минимизация протяженности, угол пересечения, алгоритм A-star, ВП РДЦ Хошимина.

Для цитирования: Хоанг Куан Н.Н., Нечаев В.Н., Субботин Р.А. Оптимизация сети маршрутов обслуживания воздушного движения с ограничением углов пересечения // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 3. С. 47–62. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-3-47-62

Optimization of air traffic service route networks with intersection angle constraints

Nguyen Ngoc Hoang Quan¹, V.N. Nechaev², R.A. Subbotin²

¹Vietnam Aviation Academy, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: On a daily basis, thousands of aircraft move through the airspace, with their management entrusted to specialized teams of specialists from Air Navigation Service Providers (ANSPs). To ensure effective and efficient air traffic management (ATM), ANSPs continually develop innovative methods to modernize and automate the processes involved in ATM. One of the key areas of focus in this effort is the optimization of air traffic service route networks, which contributes to increasing airspace capacity, reducing congestion, and enhancing the efficiency of air traffic services. This paper proposes a model for ATS route network optimization using the A-star algorithm to minimize route distances. The study analyzes three key scenarios, considering the presence and absence of angle constraints at route intersection points. Optimizing the ATS route network provides substantial benefits in enhancing the quality of ATM services and reducing operational costs for airlines. The model has been successfully implemented within the Ho Chi Minh Area Control Center (ACC HCM) airspace. The results of the model's application demonstrate its high efficiency and practical value, particularly in airspaces with high traffic density.

Key words: air traffic management (ATM), optimization model, ATS route network, minimization of length, intersection angle, A-star algorithm, Ho Chi Minh Area Control Center (ACC HCM) airspace.

For citation: Hoang Quan, N.N., Nechaev, V.N., Subbotin, R.A. (2025). Optimization of air traffic service route networks with intersection angle constraints. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 3, pp. 47–62. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-3-47-62

Введение

Развитие аэронавигации идет по пути совершенствования технической базы, включающей средства автоматизации, связи, навигации и наблюдения. Регулярность, безопасность и эффективность воздушных перевозок во многом зависят от внедрения инновационных технологий, особенно в сфере автоматизации и оптимизации процессов организации воздушного движения (ОрВД). В условиях роста воздушного трафика критически важна оптимизация сети маршрутов обслуживания воздушного движения (ОВД) с использованием современных решений. Это способствует достижению баланса между пропускной способностью, безопасностью и экономической эффективностью. Изучение данной темы позволяет выделить ключевые подходы для создания более гибкой и устойчивой системы ОрВД.

В рамках данной статьи рассмотрена задача разработки модели оптимизации сети маршрутов ОВД с учетом ограничений углов в точках пересечения маршрутов в соответствии с Дос 4444¹ с целью обеспечения бокового эшелонирования при использовании навигационных средств. Для достижения этой цели авторы исследовали ряд алгоритмов оптимизации, таких как алгоритм Дейкстры [1], генетические алгоритмы [2], алгоритм GNN [3] и алгоритм A-star [4]. Каждый из исследованных алгоритмов имеет свои ограничения, что делает выбор наиболее подходящего из них крайне важным. Алгоритм Дейкстры хотя и прост в реализации и обеспечивает точное определение кратчайших маршрутов, становится крайне ресурсоемким при анализе больших и сложных сетей маршрутов, что снижает его практическую применимость в условиях высокозагруженного воздушного пространства (ВП) [5]. Генетические алгоритмы демонстрируют гибкость в поиске решений, но требуют значительного времени и вычислительных мощностей для конвергенции, что ограничивает их использование в условиях реального времени, при этом не гарантируя нахождения оптимального решения в заданное время, а в некоторых случаях даже могут пре-

вратиться в бесконечный цикл [2]. Алгоритм GNN, основанный на применении графовых нейронных сетей, является перспективным для задачи поиска кратчайшего маршрута, однако отсутствие гарантии оптимального решения, а также сильная зависимость от больших объемов обучающих данных, сложность масштабирования, ограниченная интерпретируемость и чувствительность к изменениям структуры графа затрудняют его практическое применение [6]. В отличие от других методов алгоритм A-star сочетает в себе ключевые преимущества, позволяя учитывать множество факторов и ограничений для поиска оптимальных решений даже в сложных и изменяющихся условиях. Одним из его главных достоинств является использование эвристического подхода, который значительно ускоряет процесс поиска, направляя его в наиболее перспективные области пространства решений. Это делает алгоритм особенно эффективным при работе с большими сетями и в условиях ограниченного времени. Кроме того, A-star обладает высокой точностью и предсказуемостью, так как на каждом этапе он стремится минимизировать общую стоимость маршрута, что способствует нахождению действительно оптимального маршрута. Его способность учитывать динамические изменения в сети, например внезапное увеличение нагрузки или изменение условий, позволяет сохранять высокую эффективность в реальном времени. Благодаря этим особенностям A-star зарекомендовал себя как надежный инструмент для решения задач оптимизации маршрутов в сложных системах ОрВД. За последние несколько лет было представлено множество примечательных исследований [7–13], посвященных применению алгоритма A-star и его различных модификаций для поиска оптимальных маршрутов для транспортных средств и роботов с учетом заданных ограничений и условий эксплуатации. Однако большинство этих исследований сосредоточено на оптимизации лишь одного маршрута и еще не рассматривает взаимосвязи между маршрутами при необходимости одновременной оптимизации нескольких маршрутов, как, например, в задачах оптимизации сети маршрутов ОВД. Этот аспект открывает новое направление исследований с большими перспективами для дальнейшего развития методов на основе алгоритма A-star.

¹ Дос 4444: Правила аэронавигационного обслуживания: Организация воздушного движения, Раздел 5.4.1. 16-е изд. // ИКАО, 2016. 530 с.

После проведенного анализа различных алгоритмов оптимизации маршрутов в качестве базы для разработки модели оптимизации маршрутов ОВД был выбран алгоритм A-star. В качестве объекта для применения разработанной модели будет выбрано ВП районного диспетчерского центра (РДЦ) Хошимина, что позволит адаптировать алгоритм к реальным условиям и протестировать его на конкретной сети маршрутов с учетом специфики региона. Такой подход обеспечивает практическую применимость решения и его соответствие актуальным требованиям ОрВД.

На территории ВП РДЦ Хошимина расположено 22 аэродрома различных ведомств, из которых 14 относятся к гражданской авиации, включая 5 международных аэропортов: Тан Сон Нхат (Хошимин), Камрань (Кханьхоа), Дананг, Фукуок (Кьензянг), Кантхо. Ряд аэродромов относится к категории совместного базирования или использования. Ежедневно специалисты РДЦ Хошимина обслуживают около 1 500 воздушных судов (ВС) (включая ВС, выполняющие рейсы в аэропорты региона и из них, а также транзитные рейсы), из которых более 50 % приходится на иностранные авиакомпании. Через район ответственности РДЦ Хошимина проходят потоки ВС, соединяющие в обоих направлениях страны Юго-Восточной Азии, Австралии и Европу, рейсы из Северо-Восточной Азии в Австралию и Новую Зеландию, а также маршруты, связывающие Индонезию, Малайзию, Таиланд и Вьетнам с другими странами Азиатско-Тихоокеанского региона. С учетом высокой интенсивности воздушного движения (ВД), а также ограниченной географической ширины наземной территории в некоторых районах (вследствие формы территории Вьетнама) ВП РДЦ Хошимина часто испытывает перегрузки, особенно в часы пик или при неблагоприятных погодных условиях. Кроме того, структура ВП РДЦ Хошимина характеризуется значительным количеством маршрутов ОВД, пересекающихся в направлениях с юга на север и с востока на запад, что приводит к образованию множества горячих точек с высокой плотностью ВД. Эта особенность усложняет проектирование сети маршрутов ОВД и требует более оптимальных решений.

Методы и методология исследования

Оптимизационная модель сети маршрутов ОВД на основе алгоритма A-star

Алгоритм A-star – один из наиболее эффективных и широко используемых методов информированного поиска в теории графов, предназначенный для нахождения маршрута с минимальной стоимостью между двумя узлами. Его основная идея заключается в сочетании эвристического подхода с точным расчетом стоимости маршрута, что значительно ускоряет процесс поиска по сравнению с неоптимизированными методами. Алгоритм начинается с рассмотрения всех смежных узлов с начальным, выбирая узел с минимальным значением функции стоимости $f(n)$, которая вычисляется как сумма двух компонентов: $g(n)$ – стоимости маршрута от начального узла до текущего и $h(n)$ – эвристической оценки оставшегося расстояния до конечной точки. Таким образом, функция стоимости маршрута определяется как

$$f(n) = g(n) + h(n). \quad (1)$$

Поставленная задача при разработке модели оптимизации сети маршрутов ОВД заключается в нахождении оптимального маршрута между аэропортами / навигационными средствами / точками пути (далее совместно именуемыми поворотными пунктами маршрута (ППМ)) с минимальной протяженностью перемещения при соблюдении заданных ограничений. Иными словами, необходимо выбрать оптимальный маршрут из множества всех возможных маршрутов в графе, представляющем оптимальные маршруты, который удовлетворяет всем требованиям.

Поскольку алгоритм A-star представляет собой оптимизационный поиск маршрута, основанный на теории графов, самым важным входными данными являются координаты ППМ и весовые значения расстояний между ними.

Рис. 1, а иллюстрирует процесс поиска оптимального маршрута, начиная от исходного ППМ (красный квадрат) и заканчивая конеч-

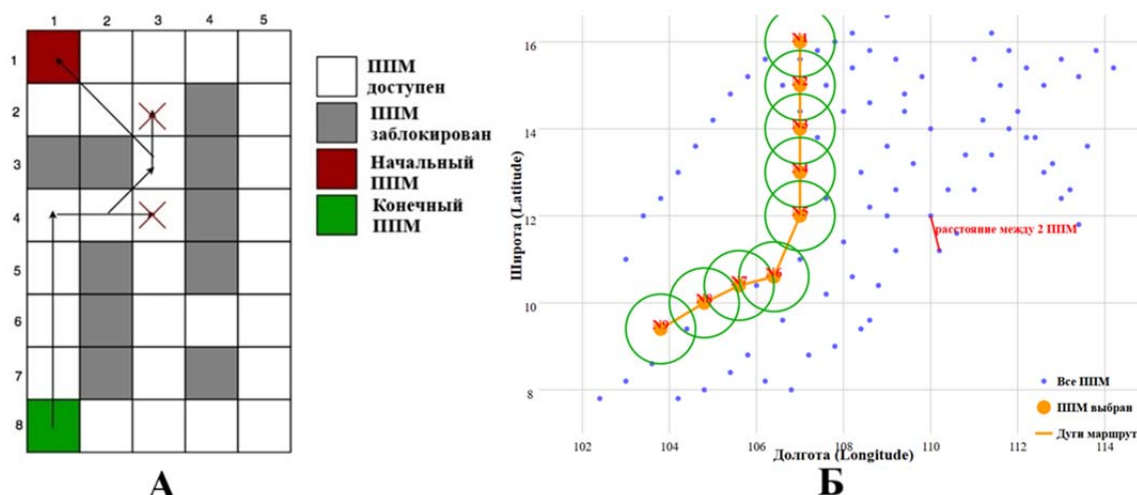


Рис 1. Иллюстрация входных данных и их взаимосвязи в алгоритме A-star
Fig. 1. Illustration of input data and their relationships in the A-star algorithm

ным ППМ (зеленый квадрат), проходя через промежуточные ППМ (белые квадраты). Поиск осуществляется на основе родительско-дочерних отношений между ППМ (подробности изложены в следующем разделе статьи) и заранее установленных значений расстояний. В сети ППМ присутствуют заблокированные ППМ (черные квадраты), которые не могут быть использованы для построения маршрута. Это может быть связано с их расположением в запретной зоне, зоне ограничения полетов или опасной зоне, а также с тем, что их эксплуатация в реальных условиях невозможна из-за погодных условий, технических неисправностей или других факторов. Рис. 1, б демонстрирует найденный оптимальный маршрут после анализа всех возможных маршрутов между ППМ (где ППМ определены через широту и долготу), соединяющими начальный ППМ 1 и конечный ППМ 9.

Этапы разработки модели оптимизации сети маршрутов ОВД

Первый и наиболее важный этап заключается в определении цели и задач модели. Этот этап является основой для дальнейших исследований, поскольку правильное определение целей позволяет не только направить усилия в нужное русло, но и минимизировать возможные ошибки при выборе методов и инструментов моделирования. Важно понимать, что каждый дополнительный параметр или ограниче-

ние может существенно изменить характер задачи, и потому их тщательное рассмотрение на начальном этапе гарантирует более точные и эффективные результаты. В данной статье целью модели является нахождение оптимальной конфигурации сети маршрутов ОВД с минимальной протяженностью каждого маршрута, одновременно учитывая угловые значения в ППМ на пересечениях маршрутов. В рамках модели рассматривались три сценария:

сценарий 1: не накладывается никаких ограничений на точки пересечения маршрутов в ППМ, образующих маршруты. Все ППМ могут соединять маршруты под произвольным углом без каких-либо дополнительных условий;

сценарий 2: установка ограничения на угол пересечения маршрутов в ППМ сети, если ППМ является промежуточным на маршруте ОВД (то есть данное ограничение не распространяется на начальные и конечные ППМ маршрутов ОВД);

сценарий 3: ограничение на углы пересечения маршрутов вводится для всех ППМ, за исключением ППМ TSH. ППМ TSH исключается из условий ограничения, так как он выполняет ключевую роль в сети, будучи связующим элементом для множества маршрутов. В частности, ППМ TSH является начальной ППМ для 8 из 20 маршрутов ОВД, выбранных для оптимизации. Введение ограничения на углы пересечения в этом ППМ может привести к невозможности построения полного набора оптимальных маршрутов, удовлетворяющих всем условиям.

Следующим этапом является формирование и уточнение математической модели с четко определенными целевыми функциями и системой ограничений. В данной статье авторы использовали математическую модель и метод оптимизации на основе алгоритма A-star с эвристической функцией Евклида [14]. Каждый маршрут ОВД представлен графом $G^m = (N^m, F^m)$, где множество узлов $N = \{N_0^m, N_1^m, \dots, N_{last}^m\}$ представляет собой ППМ маршрута и множество дуг $F = \{F_0^m, F_1^m, \dots, F_{last}^m\}$ представляет собой прямые соединения между двумя соседними ППМ на маршруте ОВД m , включая такие характеристики, как угол (θ) и расстояние (d).

Построение целевой функции играет ключевую роль в корректной постановке задачи оптимизации. В данном исследовании целевая функция, представленная в уравнении (2), используется для всех трех сценариев. В сценариях 2 и 3 помимо выполнения целевой функции модель должна учитывать построение оптимальных маршрутов, удовлетворяющих ограничениям углов на пересечениях маршрутов в трех сценариях. Однако условия для применения уравнения (3) варьируются в зависимости от конкретного сценария. В частности, во втором сценарии уравнение (3) действует для всех ППМ, за исключением N_0^m и N_{last}^m . В сценарии 3 уравнение (3) не применяется, если $(N_0^m = TSH) \vee (N_{last}^m = TSH)$.

$$D_m = \sum_{N=N_0^m}^{N_{last}^m-1} d_{N,N+1}^m \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $d_{N,N+1}^m = \sqrt{(x_{N+1} - x_N)^2 + (y_{N+1} - y_N)^2}$.

$$\Delta\theta_q^{m,n} = |\theta_{q,p}^m - \theta_{q,p'}^n| \geq \theta_{\min}, \quad (3)$$

где $\Delta\theta_q^{m,n}$ – угол между маршрутами ОВД в ППМ q , p и p' – ППМ, следующие за q на маршрутах « m » и « n » соответственно.

Значение $\theta_{\min}$ зависит от используемых средств навигации при пролете ППМ q :

– если ППМ q является географическим пунктом (имя ППМ обозначается пятью символами), $\theta_{\min} = 30^\circ$;

– если ППМ q является станцией NDB (имя ППМ обозначается двумя символами), $\theta_{\min} = 30^\circ$;

– если ППМ q является станцией VOR (имя ППМ обозначается тремя символами), $\theta_{\min} = 15^\circ$.

Следующий этап – определение координат входных точек. В данной модели используются координатные данные (долгота и широта) 130 ППМ, взятые из Сборника аэронавигационной информации² Вьетнама. Из них 114 ППМ расположены в пределах зоны ответственности РДЦ Хошимина, а остальные 16 ППМ находятся в приграничных районах ВП, прилегающих к зоне РДЦ Хошимина, и могут оказывать влияние на ВД в пределах зоны РДЦ Хошимина. Поскольку ВП РДЦ Хошимина охватывает как земную, так и морскую территории, мы разделим эти 130 ППМ на три зоны: земля (Land), побережье (Coast) и море (Sea). В частности:

– побережье (Coast): ППМ, расположенные на расстоянии до 30 км по обе стороны от береговой линии в ВП РДЦ Хошимина;

– земля (Land): ППМ, находящиеся на суше в ВП РДЦ Хошимина, за исключением ППМ, относящихся к категории побережья;

– море (Sea): ППМ, расположенные на морской территории в ВП РДЦ Хошимина, за исключением ППМ, относящихся к категории побережья.

После определения координат всех ППМ будет установлена связь «родительский ППМ – дочерний ППМ» между ППМ. Для формирования связи вокруг каждого родительского ППМ строится круг с фиксированным радиусом, внутри которого определяются дочерние ППМ. На каждой итерации сканирования с угловым шагом 1 градус из области сканирования выбирается только один дочерний ППМ. Этот ППМ определяется как находящийся на минимальном расстоянии от родительского. Принцип выбора дочерних ППМ визуализирован на рис. 2, выбранные ППМ выделены зеленым цветом.

² Сборник аэронавигационной информации (англ. Aeronautical Information Publication): выпущенная или санкционированная государством публикация, которая содержит долгосрочную аэронавигационную информацию, имеющую важное значение для аэронавигации.

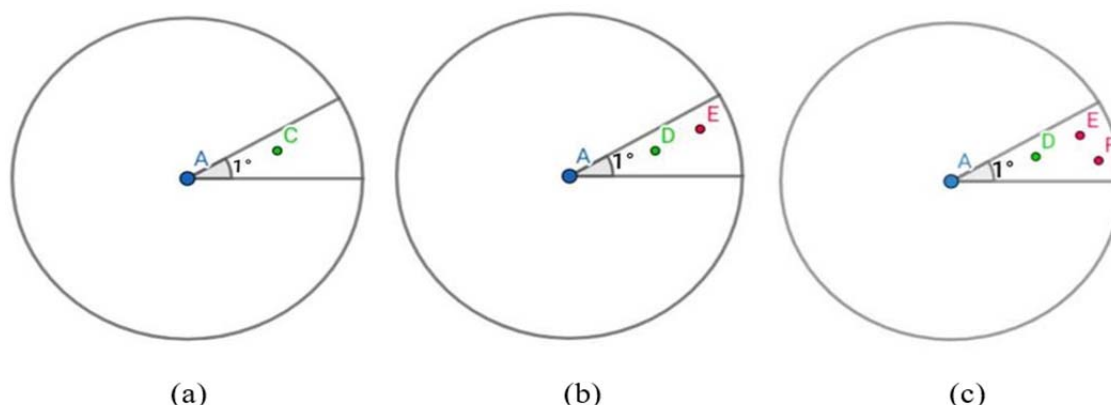


Рис. 2. Иллюстрация связей между ППМ (ППМ А – родитель)
Fig 2. Illustration of the connections between the waypoint of the route (waypoint A is the parent)

Для родительских ППМ, расположенных в различных зонах (побережье, земля, море), значения радиуса круга для определения дочерних ППМ различаются. Эти значения определяются на основе действующих минимумов эшелонирования, плотности расположения ППМ и фактического расстояния между парами ППМ. Если родительский ППМ находится в зоне «земля», его дочерний ППМ может быть либо в зоне «земля», либо в зоне «побережье», при этом радиус круга составляет 175 км. Если родительский ППМ находится в зоне «море», его дочерний ППМ может быть либо в зоне «море», либо в зоне «побережье», а радиус составляет 330 км. Наконец, если родительский ППМ расположен в зоне «побережье», радиус для дочернего ППМ составит 175 км, если он находится в зоне «земля» или «побережье», и 330 км, если в зоне «море».

После завершения построения связей между ППМ, то есть создания полного ориентированного графа, следующим этапом является формирование списка оптимальных маршрутов ОВД. Для выполнения этой задачи был проведен анализ статистических данных о состоянии ВД в ВП РДЦ Хошимаина за три месяца – июнь, июль и август 2024 года, включая данные о количестве выполненных рейсов на каждом маршруте, распределении трафика по временным интервалам и тенденциях изменения загрузки ВП. На основе полученных данных и с учетом экспертных оценок была проведена оценка значимости реальных соединений между ППМ в авиационных операциях. При этом учитывались такие факторы, как плотность

воздушного движения, связность маршрутов с ключевыми регионами и оперативная эффективность их использования.

После проведения анализа было выбрано 20 маршрутов ОВД, включая как внутренние, так и международные маршруты в ВП РДЦ Хошимаина, для их оптимизации. Оптимальные маршруты должны иметь четко определенные начальные и конечные ППМ, которые могут быть аэропортами или точками передачи управления. Подробный список 20 оптимальных маршрутов представлен в табл. 1.

Для обеспечения соответствия модели функциональным требованиям на этапе стратегического проектирования, а также для снижения сложности задачи при сохранении возможности применения в большинстве реальных ситуаций наряду с целевой функцией и ограничениями, определенными в математической модели [14], необходимо ввести ряд допущений. Применение допущений позволило не только адаптировать математическую модель к реальным условиям эксплуатации, но и обеспечить ее соответствие специфическим особенностям системы, включая техническую инфраструктуру, организационные аспекты ОВД и стабильность трафика. В модели использовались следующие допущения:

- навигационная инфраструктура: все системы и устройства, поддерживающие навигацию (например, VOR, DME, GPS), предполагаются работающими в штатном режиме и обеспечивающими стабильное покрытие;
- характеристики ВП и организация органа ОВД: структура и границы ВП, а также воз-

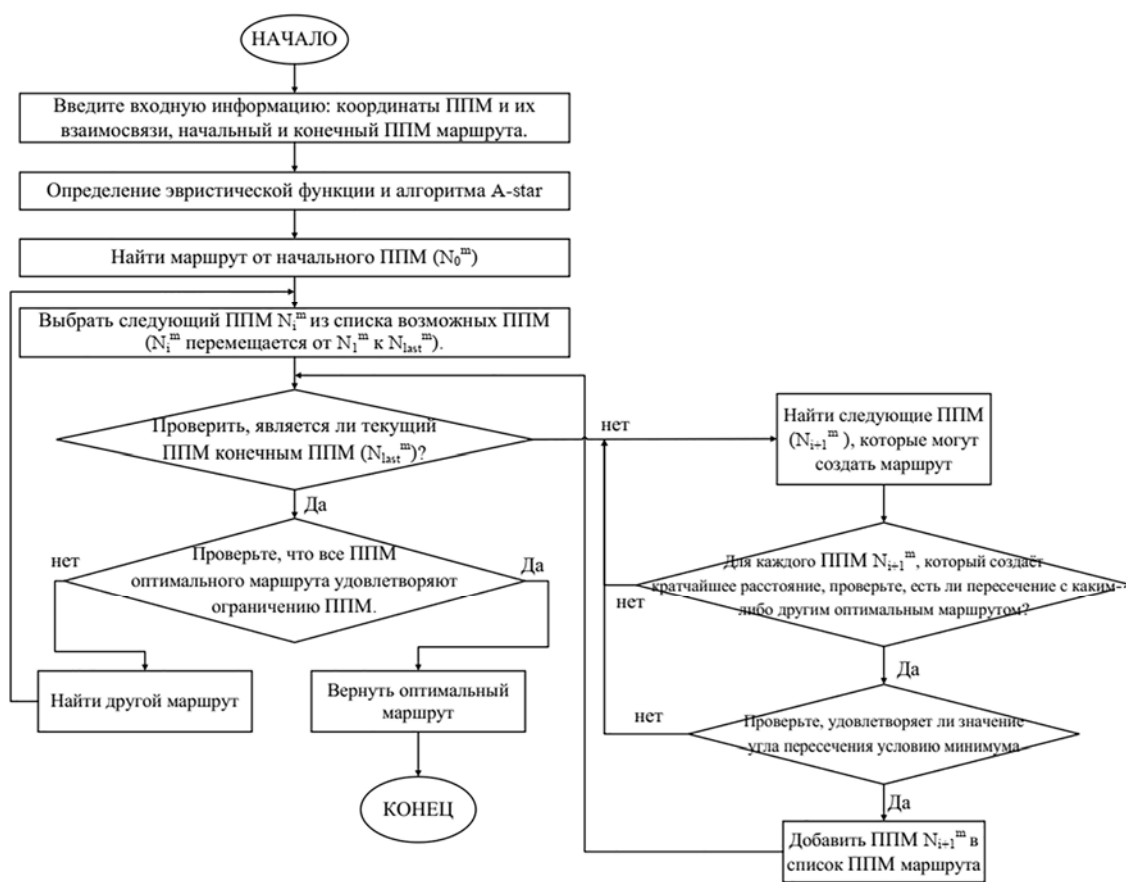


Рис. 3. Блок-схема алгоритма поиска оптимального маршрута с учетом ограничений по углу между пересекающимися маршрутами

Fig. 3. Block diagram of the algorithm for finding the optimal route taking into account the constraints on the angle between intersecting routes

возможности органа ОВД считаются фиксированными и неизменными на протяжении всего периода эксплуатации;

- интенсивность и плотность ВД считаются постоянными, без влияния чрезвычайных ситуаций или резкого роста спроса.

На основе усовершенствованной математической модели, данных о ППМ и оптимальных маршрутах ОВД, а также принятых предположений разработана программная модель оптимизации сети маршрутов ОВД на языке Python [15].

На рис. 3 представлена блок-схема простого алгоритма поиска оптимального маршрута с использованием алгоритма A-star с учетом угловых ограничений. Ограничения по углу выполняются на этапе оценки возможных направлений движения для обеспечения достаточного бокового эшелонирования на маршрутах. Алгоритм последовательно проверяет все

допустимые узлы, оценивая их стоимость на основе комбинированного критерия, включающего протяженность маршрута и угол пересечения маршрутов. Для сценария 1 применяется аналогичная схема алгоритма, но этапы проверки углов пропускаются. Этот вариант представляет собой альтернативный подход, который может использоваться в зависимости от условий задачи. Оба подхода являются допустимыми и применяются в различных ситуациях в зависимости от требований к маршруту.

Результаты модели оптимизации сети маршрутов ОВД

Подробное сравнение каждого маршрута (включая протяженность и ППМ маршрута) для всех трех сценариев представлено в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Сравнение результатов трех сценариев оптимизации сети маршрутов ОВД
Comparison of the results of three scenarios for optimizing the ATS route network

Маршрут ОВД	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
TSH – DAN	612,2 км TSH – DONXO – MULAD – DADEN – TATIM – DAN	612,2 км TSH – DONXO – MULAD – DADEN – TATIM – DAN	612,2 км TSH – DONXO – MULAD – DADEN – TATIM – DAN
CRA – PQU	602,2 км CRA – SOSPA – LKH – KADUM – SAPEN – KISAN – PQU	602,2 км CRA – SOSPA – LKH – KADUM – SAPEN – KISAN – PQU	602,2 км CRA – SOSPA – LKH – KADUM – SAPEN – KISAN – PQU
TSH – ARESI	930,2 км TSH – ENRIN – SOSPA – ATVIT – NITOM – MESOX – ARESI	931,7 км TSH – VETOM – IBUNU – NITOM – MESOX – ARESI	931,7 км TSH – VETOM – IBUNU – NITOM – MESOX – ARESI
TSH – IGARI	548,1 км TSH – BITIS – ANHOA – BIBAN – IGARI	548,1 км TSH – BITIS – ANHOA – BIBAN – IGARI	548,1 км TSH – BITIS – ANHOA – BIBAN – IGARI
TSH – BUNTA	732,0 км TSH – DONXO – MULAD – MUMGA – CQ – BUNTA	741,6 км TSH – KADUM – PATMA – MEVON – MUMGA – CQ – BUNTA	741,6 км TSH – KADUM – PATMA – MEVON – MUMGA – CQ – BUNTA
DAN – PQU	885,7 км DAN – TATIM – DADEN – MULAD – DONXO – POPET – KISAN – PQU	947,4 км DAN – VILOT – XAQUA – ENGIM – BMT – DOVIN – DONXO – POPET – DADEM – PQU	982,7 км DAN – PATNO – XAQUA – ENGIM – BMT – DOVIN – DONXO – POPET – DADEM – OSOTA – PQU
CRA – BUNTA	539,1 км CRA – KARAN – ASUKU – BUNTA	539,1 км CRA – KARAN – ASUKU – BUNTA	553,6 км CRA – KARAN – VIMUT – ITBAM – BUNTA
TSH – DUDIS	424,8 км TSH – XOBAB – LITAM – DUDIS	424,8 км TSH – XOBAB – LITAM – DUDIS	424,8 км TSH – XOBAB – LITAM – DUDIS
TSH – POPET	82,6 км TSH – POPET	82,6 км TSH – POPET	82,6 км TSH – POPET
EXOTO – ESPOB	1105,2 км EXOTO – VEPAM – KARAN – ELSAS – CN – ESPOB	1105,2 км EXOTO – VEPAM – KARAN – ELSAS – CN – ESPOB	1108,8 км EXOTO – VEPAM – NHATA – ELSAS – CN – ESPOB
DUDIS – DONDA	1027,5 км DUDIS – DAGAG – SUDUN – DAMVO – NITOM – DAMEL – DONDA	1042,6 км DUDIS – DAGAG – ATVIT – DAMEL – DONDA	1042,6 км DUDIS – DAGAG – ATVIT – DAMEL – DONDA
MIGUG – MELAS	1110,3 км MIGUG – MESOX – MUGAN – MIMUX – MAPNO – OSIXA – MOXON – MELAS	1162,4 км MIGUG – MESOX – AGSAM – ALDAS – OSIXA – MOXON – MELAS	1162,4 км MIGUG – MESOX – AGSAM – ALDAS – OSIXA – MOXON – MELAS
AKMON – ARESI	788,8 км AKMON – UDOSI – ALDAS – AGSAM – ANOKI – ARESI	852,3 км AKMON – MAPNO – MIMUX – ANOKI – ARESI	852,3 км AKMON – MAPNO – MIMUX – ANOKI – ARESI
CRA – DAN	471,2 км CRA – KARAN – KAMGO – PCA – KUMUN – DAN	475,7 км CRA – NOBID – BANSU – SADIN – DAN	501,4 км CRA – NOBID – PCA – KUMUN – DAN
TSH – PANDI	806,3 км TSH – BUKMA – MATGI – AGSIS – DAMVO – MIMUX – AGSAM – PANDI	851,8 км TSH – VEPMA – AGSIS – DAMVO – MUGAN – PANDI	851,8 км TSH – VEPMA – AGSIS – DAMVO – MUGAN – PANDI

Окончание таблицы 1

Маршрут ОВД	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
TSH – AKMON	486,4 км TSH – LOSON – MOXON – AKMON	486,4 км TSH – LOSON – MOXON – AKMON	486,4 км TSH – LOSON – MOXON – AKMON
PANDI – IGARI	1258,2 км PANDI – ALDAS – MAPNO – SAMAP – CN – VIGEN – BITOD – IGARI	1356,8 км PANDI – ALDAS – DAMVO – SAMAP – LITAM – VIGEN – BITOD – IGARI	1364 км PANDI – ALDAS – DAMVO – SAMAP – LITAM – VIGEN – IPRIX – IGARI
PQU – IGARI	367,3 км PQU – ADBOP – IGARI	367,3 км PQU – ADBOP – IGARI	417,4 км PQU – ADBOP – SAMOG – IGARI
ANINA – ARESI	758,5 км ANINA – MUMGA – VIMUT – VEPAM – DAMEL – MESOX – ARESI	782,2 км ANINA – MUMGA – VIMUT – DONDA – ARESI	882,5 км ANINA – MUMGA – VIMUT – DONDA – MIGUG – ARESI
PCA – TRN	563,7 км PCA – NOBID – PATMA – DONXO – RUNOP – MOXEB – TRN	593,9 км PCA – NOBID – ONEBI – ENRIN – ENPAS – TRN	654,3 км PCA – SADAS – BMT – VETOM – LOSON – TRN

Таблица 2
Table 2

Таблица 3
Table 3

Частичные результаты расчета углов
в сценарии 2

Partial results of angle calculation in scenarios 2

Частичные результаты расчета углов
в сценарии 3

Partial results of angle calculation in scenarios 3

Node	route1	WP_in route1	WP_out route1	route2	WP_in route2	WP_out route2	Angle
ALDAS	route_17	PANDI	ALDAS	route_12	ALDAS	OSIXA	169.8021
ALDAS	route_12	AGSAM	ALDAS	route_17	PANDI	ALDAS	32.84379
ALDAS	route_17	ALDAS	DAMVO	route_12	AGSAM	ALDAS	122.7799
ALDAS	route_12	ALDAS	OSIXA	route_17	ALDAS	DAMVO	34.57419
DAMVO	route_15	DAMVO	MUGAN	route_17	ALDAS	DAMVO	31.84812

Node	route1	WP_in route1	WP_out route1	route2	WP_in route2	WP_out route2	Angle
AKMON	route_13	AKMON	MAPNO	route_16	MOXON	AKMON	58.08929
AKMON	route_16	MOXON	AKMON	route_13	AKMON	MAPNO	58.08929
ALDAS	route_17	PANDI	ALDAS	route_12	ALDAS	OSIXA	169.8021
ALDAS	route_12	ALDAS	OSIXA	route_17	ALDAS	DAMVO	34.57419
ALDAS	route_17	ALDAS	DAMVO	route_12	AGSAM	ALDAS	122.7799

Анализ данных из табл. 1 позволяет выделить ряд ключевых выводов о влиянии ограничений на результаты построения маршрутов ОВД. Примечательно, что шесть маршрутов ОВД: TSH – DAN, CRA – PQU, TSH – IGARI, TSH – DUDIS, TSH – POPET и TSH – AKMON, демонстрируют полностью идентичные результаты во всех трех сценариях. Этот факт указывает на их устойчивость к изменению условий работы алгоритма и сохранение оптимальных параметров при варьировании ограничений. В то же время маршруты DAN – PQU, CRA – DAN, PANDI – IGARI, ANINA – ARESI и PCA – TRN показали полностью различные результаты во всех сценариях. Это свидетельствует о высокой чувствительности данных маршрутов к изменению условий, особенно связанных с угловыми ограничениями пересечения маршрутов.

Сравнительный анализ всех трех сценариев показывает, что сценарий 1 с минимальным

числом ограничений обеспечивает наименьшие значения протяженности маршрутов. В таком случае алгоритм действует в наиболее «свободных» условиях, обеспечивая минимальные дистанции. Наоборот, в сценарии 3, где установлено максимальное число угловых ограничений, наблюдается увеличение протяженности, что связано с более жесткими условиями, накладываемыми на построение маршрутов.

При сравнении сценариев 1 и 2 можно отметить, что помимо ранее упомянутых шести маршрутов идентичные результаты были получены для следующих маршрутов: CRA – BUNTA, EXOTO – ESPOB и PQU – IGARI. Это указывает на отсутствие значительного влияния введенных ограничений в сценарии 2 на данные маршруты и сохранение их оптимальности. Сравнительный анализ сценариев 2 и 3 позволяет выделить следующие маршруты: TSH – ARESI, TSH – BUNTA, DUDIS – DON-

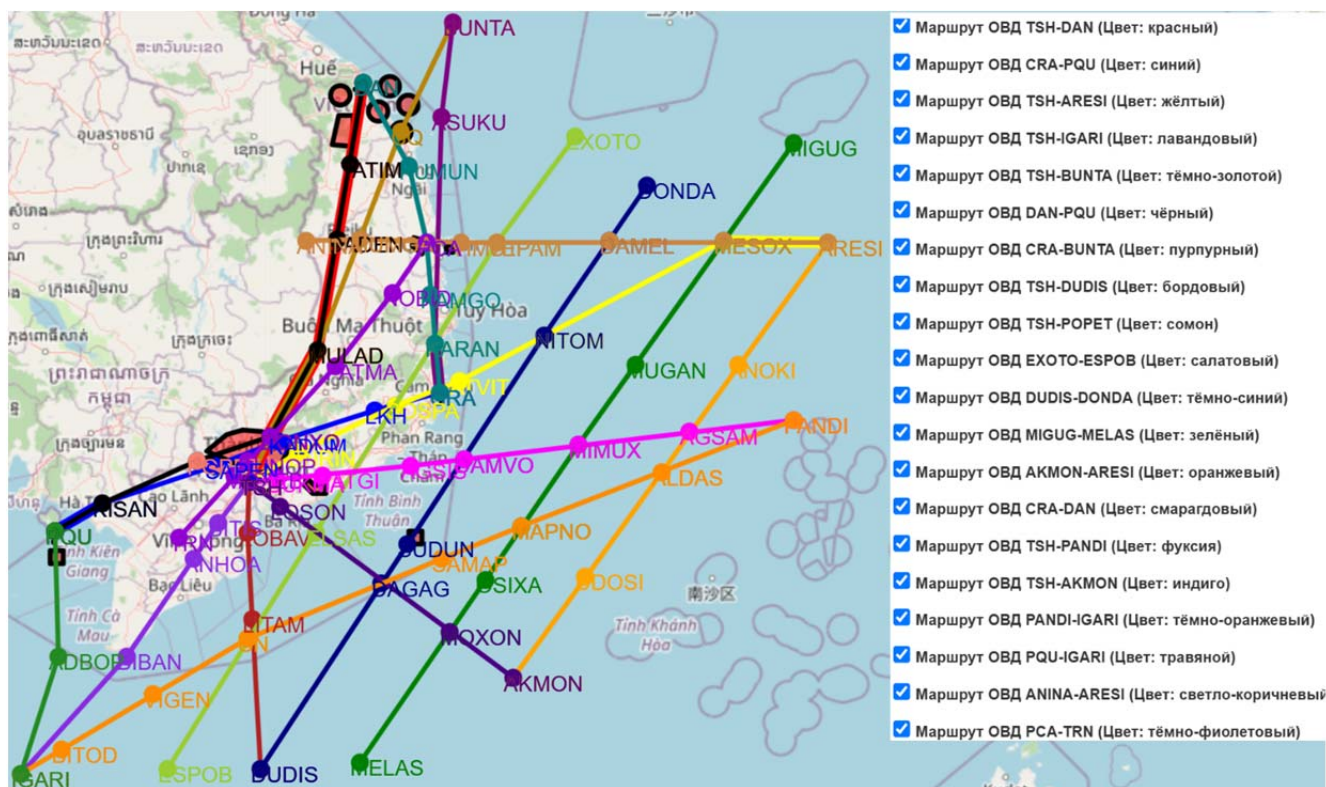


Рис. 4. Оптимальные результаты для 20 маршрутов ОВД в сценарии 1

Fig. 4. Optimal results for 20 ATS routes in scenario 1

DA, MIGUG – MELAS, AKMON – ARESI и TSH – PANDI. Эти маршруты демонстрируют одинаковые результаты и имеют большую протяженность по сравнению с соответствующими маршрутами в сценарии 1, что свидетельствует о заметном влиянии угловых ограничений, введенных при построении модели оптимизации сети маршрутов ОВД.

Для проверки точности и корректности алгоритма был создан файл Excel с данными об углах пересечения оптимизационных линий для сценариев 2 и 3. Табл. 2 представляет часть результатов углов пересечения для сценария 2, а таблица 3 – для сценария 3. Например, во второй строке табл. 2 (выделенной желтым) ППМ ALDAS является пересечением двух сегментов: PANDI – ALDAS маршрута 17 (PANDI – IGARI) и ADLAS – OSIXA маршрута 12 (MIGUG – MELAS), образующих угол $169,802^\circ$. В сценарии 2 рассчитано 38 углов, а в сценарии 3 – 75 углов. Все вычисленные значения соответствуют установленным ограничениям.

Рис. 4, 5 и 6 последовательно иллюстрируют результаты оптимизации 20 маршрутов ОВД, соответствующих сценариям 1, 2 и 3.

При анализе рис. 5 и 6, иллюстрирующих маршруты ОВД в сценариях 2 и 3, можно заметить, что для удовлетворения требований по угловым ограничениям на пересечениях маршрутов оптимальные траектории становятся ломаными, часто меняя направление. Эти изменения направлений приводят к созданию сложных маршрутов с многочисленными ППМ, что особенно заметно на маршрутах DUDIS – DONDA, MIGUG – MELAS, AKMON – ARESI и PANDI – IGARI. Подобная конфигурация маршрутов может создавать значительные трудности при пилотировании и ОВД. Излишняя изломанность маршрутов требует от экипажа повышенного внимания и более частых корректировок курса, что увеличивает когнитивную нагрузку на пилотов и диспетчеров. Кроме того, такие маршруты могут увеличить общее время полета и расход топлива. Постоянные изменения направления вызывают дополнительные нагрузки на бортовые системы навигации и автопилот, а также могут повлиять на комфорт пассажиров и экипажа из-за частых изменений крена и курса, особенно в условиях турбулентности.

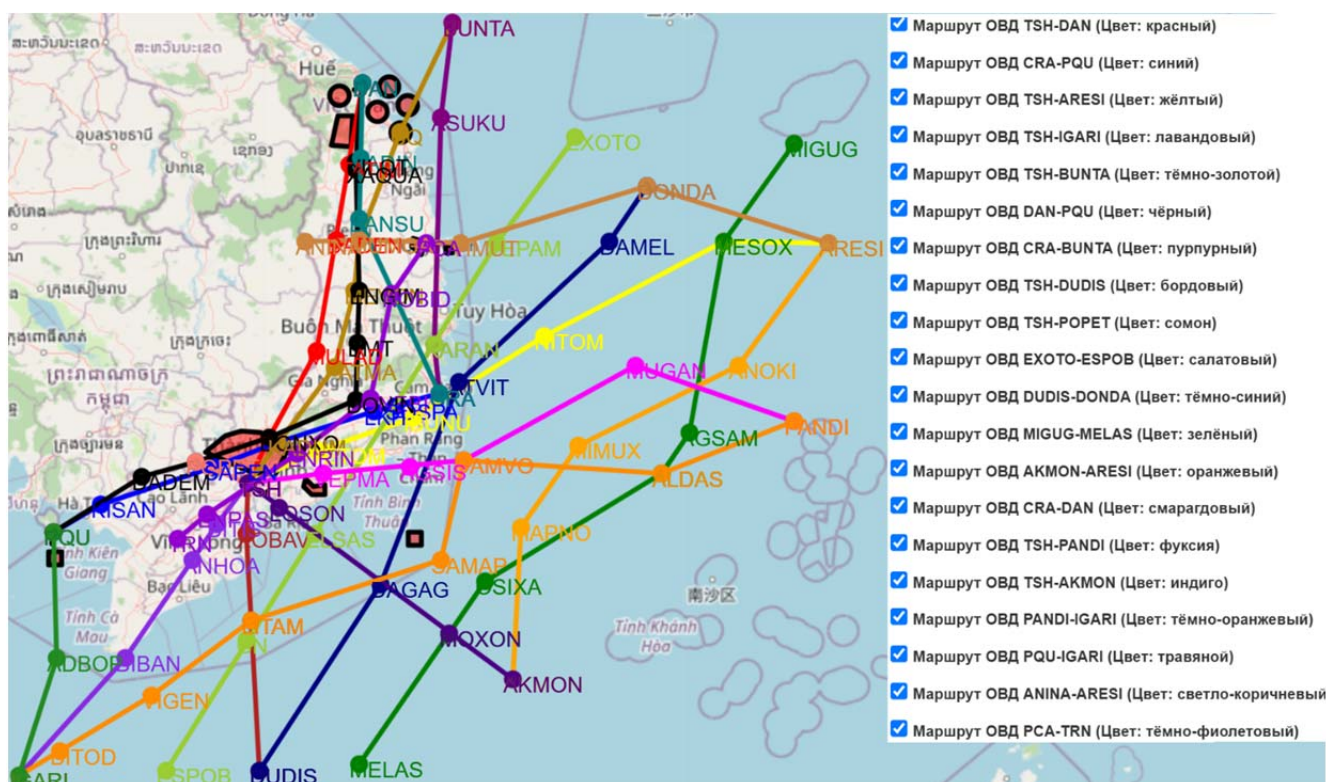


Рис. 5. Оптимальные результаты для 20 маршрутов ОВД в сценарии 2

Fig. 5. Optimal results for 20 ATS routes in scenario 2

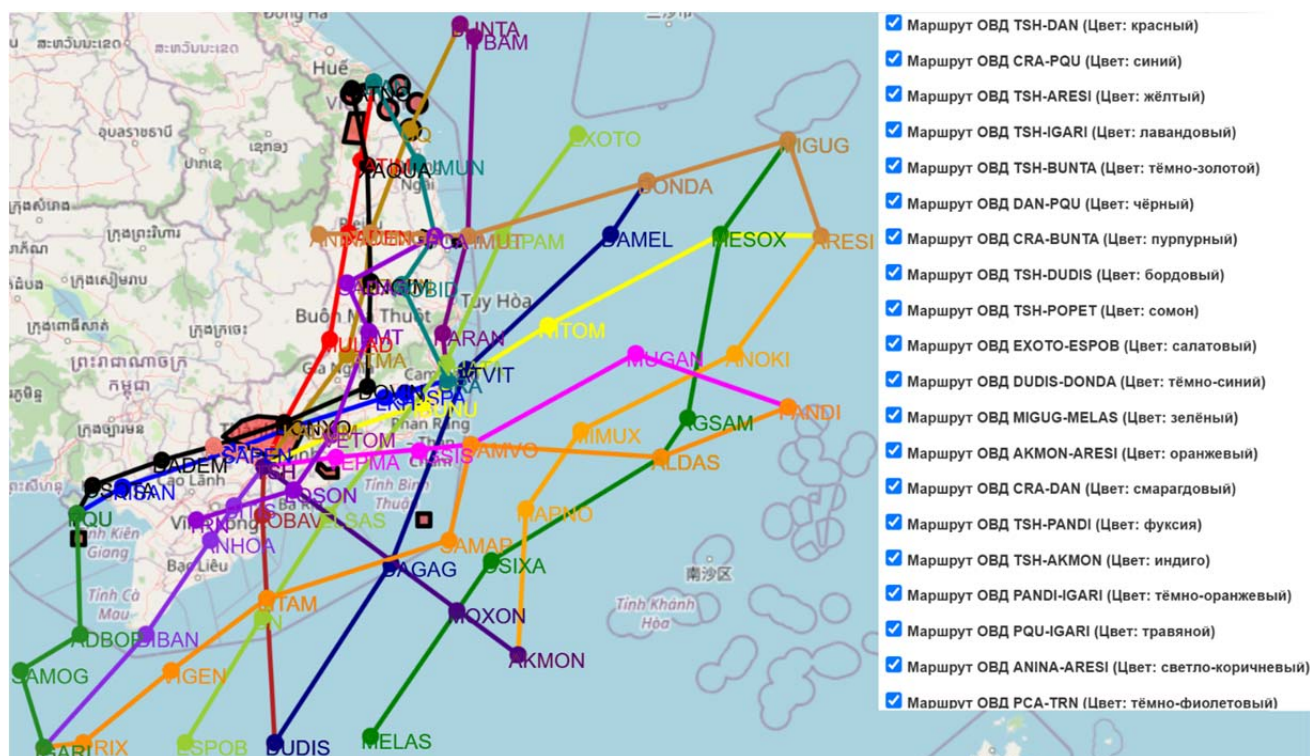


Рис. 6. Оптимальные результаты для 20 маршрутов ОВД в сценарии 3

Fig. 6. Optimal results for 20 ATS routes in scenario 3

В противоположность этому, сценарий 1 формирует преимущественно прямолинейные маршруты, которые не только обеспечивают более простой и понятный профиль полета для экипажа, но и способствуют сокращению эксплуатационных расходов. Такие маршруты уменьшают количество маневров, минимизируя необходимость частых корректировок, что сокращает общее время полета и снижает расход топлива. Это способствует повышению экономической эффективности и экологичности. С точки зрения безопасности снижение числа маневров уменьшает риск ошибок экипажа и диспетчеров, а также снижает вероятность конфликтных ситуаций с другими ВС в загруженном ВП.

Кроме того, в сценариях 2 и 3 углы пересечения маршрутов в ППМ превышают минимальное значение, установленное уравнением (3), что теоретически способствует соблюдению бокового эшелонирования диспетчерами при использовании NDB, VOR или GNSS на пересекающихся маршрутах ОВД. Вместе с тем в реальных условиях помимо использования бокового эшелонирования при невозможности или недостаточности его обеспечения диспетчер также может применять вертикальное и продольное эшелонирование для обеспечения безопасного и эффективного управления воздушным движением. Следовательно, преимущества, которые потенциально могут дать сценарии 2 и 3, не настолько значительны, чтобы перевесить их недостатки при применении, особенно в ВП Вьетнама. Особенности расположения государственной границы Вьетнама, обуславливающие ограничения использования воздушного пространства (ИВП) в приграничной полосе, создают дополнительные сложности для обеспечения безопасного эшелонирования.

Таким образом, несмотря на видимые преимущества сценариев 2 и 3, их внедрение может оказаться менее эффективным, чем ожидается, особенно в условиях сложной и загру-

женной воздушной обстановки. Хотя эти сценарии предлагают теоретически оптимальные маршруты с учетом угловых ограничений на их пересечениях, сценарий 1 остается наиболее предпочтительным для практического применения. Он обеспечивает оптимальный баланс между операционной эффективностью, экономической целесообразностью и уровнем безопасности, что делает его оптимальным для планирования маршрутов ОВД. Тем не менее сценарии 2 и 3 могут эффективно использоваться в условиях, когда большой пространственный объем позволяет сформировать относительно бесконфликтную структуру ВП, и в случае изменения воздушной, аэронавигационной или метеорологической обстановки на маршруте по плану применение сценариев 2 и 3 при относительно больших расстояниях между ППМ обеспечивает гибкость и высокую эффективность альтернативных маршрутов.

Для оценки эффективности модели оптимизации результаты маршрутов из сценария 1 (выбранный сценарий) сравниваются с текущими маршрутами, используемыми в реальных условиях. Табл. 4 показывает, что в 20 маршрутах ОВД расстояние сократилось на 15 маршрутах по сравнению с существующими. Среди них некоторые оптимизированные маршруты значительно уменьшили свою протяженность, например, маршрут DAN – PQU уменьшился на 83,6 км (8,6 %). Новые маршруты более прямолинейны, что упрощает пилотирование ВС, снижает расход топлива и сокращает время полета. Это помогает снизить количество «горячих точек» (hot spot), уменьшить вероятность конфликтных ситуаций, сократить объем координации движения в ВП для диспетчеров и уменьшить частоту ведения радиообмена экипажами ВС. Таким образом, нагрузка как на диспетчеров, так и на экипажи ВС снижается, что в свою очередь увеличивает пропускную способность (ПС) ВП и повышает его эффективность.

Таблица 4
Table 4

Сравнение результатов оптимизированных маршрутов в сценарии 1 с реальными маршрутами
Comparison of the results of the optimized routes in scenario 1 with the actual routes

Маршрут ОВД	Сценарий 1	Реальный маршрут
TSH – DAN	612,2 км TSH – DONXO – MULAD – DADEN – TATIM – DAN	648,9 км TSH – KADUM – PATMA – SADAS – DADEN – LATOM – PATNO – DAN

Окончание таблицы 4

Маршрут ОВД	Сценарий 1	Реальный маршрут
CRA – PQU	602,2 км CRA – SOSPA – LKH – KADUM – SAPEN – KISAN – PQU	615,7 км CRA – SOSRA – LKH – VETOM – AC – ESDOB – TSH – ATGAS – TUNPO – PQU
TSH – ARESI	930,2 км TSH – ENRIN – SOSPA – ATVIT – NITOM – MESOX – ARESI	934,8 км TSH – ESDOB – AC – VETOM – LKH – SOSRA – CRA – ATVIT – NITOM – MESOX – ARESI
TSH – IGARI	548,1 км TSH – BITIS – ANHOA – BIBAN – IGARI	552,3 км TSH – BITIS – ANHOA – BIBAN – BITOD – IGARI
TSH – BUNTA	732,0 км TSH – DONXO – MULAD – MUMGA – CQ – BUNTA	757,0 км TSH – KADUM – PATMA – BMT – NOBID – PCA – ASUKU – BUNTA
DAN – PQU	885,7 км DAN – TATIM – DADEN – MULAD – DONXO – POPET – KISAN – PQU	969,4 км DAN – SADIN – BANSU – MUMGA – BMT – DOVIN – AC – TSH – ATGAS – TUNPO – PQU
CRA – BUNTA	539,1 км CRA – KARAN – ASUKU – BUNTA	540,8 км CRA – NHATA – KARAN – KAMGO – PCA – ASUKU – BUNTA
TSH – DUDIS	424,8 км TSH – XOBAY – LITAM – DUDIS	425,4 км TSH – XOBAY – NIXIV – CN – DUDIS
TSH – POPET	82,6 км TSH – POPET	82,6 км TSH – SAEN – POPET
EXOTO – ESPOB	1105,2 км EXOTO – VEPAM – KARAN – ELSAS – CN – ESPOB	1105,3 км EXOTO – VEPAM – KARAN – SOSPA – PTH – ELSAS – CN – ESPOB
DUDIS – DONDA	1027,5 км DUDIS – DAGAG – SUDUN – DAMVO – NITOM – DAMEL – DONDA	1027,5 км DUDIS – DAGAG – SUDUN – DAMVO – NITOM – DAMEL – DONDA
MIGUG – MELAS	1110,3 км MIGUG – MESOX – MUGAN – MIMUX – MAPNO – OSIXA – MOXON – MELAS	1110,3 км MIGUG – MESOX – MUGAN – MIMUX – MAPNO – OSIXA – MOXON – MELAS
AKMON – ARESI	788,8 км AKMON – UDOSI – ALDAS – AGSAM – ANOKI – ARESI	788,8 км AKMON – UDOSI – ALDAS – AGSAM – ANOKI – ARESI
CRA – DAN	471,2 км CRA – KARAN – KAMGO – PCA – KUMUN – DAN	474,1 км CRA – KARAN – KAMGO – PCA – KUMUN – CQ – DAN
TSH – PANDI	806,3 км TSH – BUKMA – MATGI – AGSIS – DAMVO – MIMUX – AGSAM – PANDI	806,4 км TSH – BUKMA – MATGI – PTH – AGSIS – DAMVO – MIMUX – AGSAM – PANDI
TSH – AKMON	486,4 км TSH – LOSON – MOXON – AKMON	486,4 км TSH – LOSON – MOXON – AKMON
PANDI – IGARI	1258,2 км PANDI – ALDAS – MAPNO – SAMAP – CN – VIGEN – BITOD – IGARI	1258,2 км PANDI – ALDAS – MAPNO – SAMAP – CN – VIGEN – BITOD – IGARI
PQU – IGARI	367,3 км PQU – ADBOP – IGARI	392,1 км PQU – ADBOP – BITOD – IGARI
ANINA – ARESI	758,5 км ANINA – MUMGA – VIMUT – VEPAM – DAMEL – MESOX – ARESI	758,6 км ANINA – DADEN – PLK – MUMGA – PCA – VIMUT – VEPAM – DAMEL – MESOX – ARESI
PCA – TRN	563,7 км PCA – NOBID – PATMA – DONXO – RUNOP – MOXEB – TRN	564,1 км PCA – NOBID – BMT – PATMA – DONXO – RUNOP – MOXEB – TRN

Заключение

В современном мире одним из направлений совершенствования аэронавигационного обслуживания является внедрение эффективных траекторий полета, что подразумевает переход от маршрутов ОВД к маршрутам зональной навигации, создание зон ВП со свободной маршрутизацией; создание или изменение схем вылетов и заходов на посадку в аэропортах на основании баланса экономики пользователей ВП и провайдера услуг АНС; повышение доступности ВП для всех пользователей за счет сокращения количества и времени действия зон ограничения полетов.

В то же время в реальных условиях, когда на формирование структуры ВП оказывают влияние конфликты интересов многих пользователей ВП, например в Московской зоне Единой системы ОрВД, а также в условиях снижения ПС ВП вследствие изменения метеорологической обстановки, ввода запретов и ограничений на ИВП, создание возможности для оперативного изменения траекторий полетов по оптимальным маршрутам ОВД является одним из способов поддержания безопасности полетов на приемлемом уровне.

В статье представлены методика и результаты моделирования оптимизации маршрутов ОВД в трех случаях: с учетом угловых ограничений и без них, применительно к ВП РДЦ Хошимина. Полученные результаты демонстрируют эффективность и работоспособность модели, а также ее способность предоставлять решения для улучшения сети маршрутов ОВД. Модель обладает универсальностью и может быть легко внедрена в ВП различных регионов путем изменения входных данных (координат).

В будущем авторский коллектив планирует усовершенствовать модель, чтобы она могла предлагать альтернативные маршруты в случаях, когда основные маршруты становятся недоступными (по причинам, связанным с неблагоприятными погодными условиями или другими ограничениями). Такие альтернативные маршруты станут эффективным резервным инструментом в случаях сокращения ПС ВП вследствие ограничения его использования, связанного с реализацией государственных приоритетов в ИВП, а также с

изменением метеорологической обстановки или другими факторами, влияющими на безопасность полетов.

Список литературы

1. **Дольников В.Л., Якимов О.П.** Основные алгоритмы на графах: текст лекций. Ярославль: ЯрГУ, 2011. 80 с.
2. **Короткин А.А., Краснов М.В.** Генетические алгоритмы: учеб.-метод. пособие. Ярославль: ЯрГУ, 2020. 40 с.
3. **Гафаров Ф.М., Гилемзянов А.Ф.** Нейронные сети в PyTorch: учеб. пособие. Казань: Казанский федеральный университет, 2024. 106 с.
4. **Laparra D.M.** Pathfinding algorithms in graphs and applications. Universitat de Barcelona, 2019. 39 p.
5. **Jurkiewicz P.** Empirical Time Complexity of Generic Dijkstra Algorithm / P. Jurkiewicz, E. Biernacka, J. Domżał, R. Wójcik // IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management. France: Bordeaux, 2021. pp. 594–598. DOI: 10.48550/arXiv.2006.06062
6. **Khemani B., Patil S., Kotecha K. et al.** A review of graph neural networks: concepts, architectures, techniques, challenges, datasets, applications, and future directions [Электронный ресурс] // Journal of Big Data. 2024. Vol. 11, ID: 18. DOI: 10.1186/s40537-023-00876-4 (дата обращения: 12.01.2025).
7. **Скрыпник О.Н.** Алгоритмы оптимизации траекторий воздушных судов при гибкой маршрутизации / О.Н. Скрыпник, Е.Е. Нечаев, Н.Г. Арефьева, Р.О. Арефьев // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 5, С. 19–31. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-19-31
8. **Нурлыбаев М.А., Алмазхан Н.А.** Применение алгоритмов поиска пути для контроля беспилотных летательных аппаратов аэродромного базирования для предотвращения столкновений // Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем: материалы II Всероссийской научно-практической конференции обучаю-

щихся и преподавателей. Санкт-Петербург, 22 декабря, 2022. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. С. 23–26.

9. **Zhang H., Tao Y., Zhu W.** Global path planning of unmanned surface vehicle based on improved a-star algorithm [Электронный ресурс] // *Sensors*. 2023. Vol. 23, iss. 14. ID: 6647. DOI: 10.3390/s23146647 (дата обращения: 12.01.2025).

10. **Chatzisavvas A., Dossis M., Dasygenis M.** Optimizing mobile robot navigation based on a-star algorithm for obstacle avoidance in smart agriculture [Электронный ресурс] // *Electronics*. 2024. Vol. 13, iss. 11. ID: 2057. DOI: 10.3390/electronics13112057 (дата обращения: 12.01.2025).

11. **Kabir R.** Enhanced robot motion block of a-star algorithm for robotic path planning / R. Kabir, Y. Watanobe, M.R. Islam, K. Naruse [Электронный ресурс] // *Sensors*. 2024. Vol. 24, iss. 5. ID: 1422. DOI: 10.3390/s24051422 (дата обращения: 12.01.2025).

12. **Farid G.** Modified A-Star approach to plan the motion of a quadrotor UAV in Three-Dimensional Obstacle-Cluttered Environment / G. Farid, S. Cocuzza, T. Younas, A.A. Razzaqi, W.A. Wattoo, F. Cannella, H. Mo [Электронный ресурс] // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, iss. 12. ID: 5791. DOI: 10.3390/app12125791 (дата обращения: 12.01.2025).

13. **Yoo Y.D., Moon J.H.** Study on A-Star algorithm-based 3D path optimization method considering density of obstacles [Электронный ресурс] // *Aerospace*. 2025. Vol. 12, iss. 2. ID: 85. DOI: 10.3390/aerospace12020085 (дата обращения: 12.01.2025).

14. **Нгуен Н.Х.К., Нечаев В.Н., Малыгин В.П.** Математическая модель и применение алгоритма A-star для оптимизации маршрутов ОВД в воздушном пространстве районного диспетчерского центра Хошимина // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2025. № 1. С. 64–85. DOI: 10.51955/2312-1327_2025_1_64

15. **Van Rossum G., Drake F.L.** Python 3 Reference Manual. CreateSpace, Scotts Valley, CA, USA, 2009. 242 p.

References

1. **Dolnikov, V.L., Yakimova, O.P.** (2011). Basic graph algorithms: Lecture notes. Yaroslavl: YarGU, 80 p. (in Russian)

2. **Korotkin, A.A., Krasnov, M.V.** (2020). Genetic algorithms: Tutorial. Yaroslavl: YarSU, 40 p. (in Russian)

3. **Gafarov, F.M., Gilemzyanov, A.F.** (2024). Neural networks in PyTorch: Tutorial. Kazan: Kazanskiy federal'nyy universitet, 106 p. (in Russian)

4. **Laparra, D.M.** (2019). Pathfinding algorithms in graphs and applications. Universitat de Barcelona, 39 p.

5. **Jurkiewicz, P., Biernacka, E., Domżał, J., Wójcik, R.** (2021). Empirical time complexity of generic Dijkstra algorithm. In: *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management*. France: Bordeaux, pp. 594–598. DOI: 10.48550/arXiv.2006.06062

6. **Khemani, B., Patil, S., Kotecha, K. et al.** (2024). A review of graph neural networks: concepts, architectures, techniques, challenges, datasets, applications, and future directions. *Journal of Big Data*, vol. 11. ID: 18. DOI: 10.1186/s40537-023-00876-4 (accessed: 12.01.2025).

7. **Skrypnik, O.N., Nechaev, E.E., Arefyeva, N.G., Arefyev, R.O.** (2019). Optimization of an aircraft flight trajectory in the GLONASS dynamic accuracy field. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 22, no. 5, pp. 19–31. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-19-31

8. **Nurlybayev, M.A., Almazkhan, N.A.** (2023). Application of path finding algorithms for control of airfield-based unmanned aircraft for collision prevention. In: *Energetika, upravleniye i avtomatizatsiya: innovatsionnyye resheniya problem: materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii obuchayushchikhsya i prepodavateley*. St. Petersburg: VSHTe SPbGUPTD, pp. 23–26. (in Russian)

9. **Zhang, H., Tao, Y., Zhu, W.** (2023). Global path planning of unmanned surface vehicle based on improved a-star algorithm. *Sensors*, vol. 23, issue 14, ID: 6647. DOI: 10.3390/s23146647 (accessed: 12.01.2025).

10. Chatzisavvas, A., Dossis, M., Dasygenis, M. (2024). Optimizing mobile robot navigation based on a-star algorithm for obstacle avoidance in smart agriculture. *Electronics*, vol. 13, issue 11, ID: 2057. DOI: 10.3390/electronics13112057 (accessed: 12.01.2025).

11. Kabir, R., Watanobe, Y., Islam, M.R., Naruse, K. (2024). Enhanced robot motion block of A-star algorithm for robotic path planning. *Sensors*, vol. 24, issue 5, ID: 1422. DOI: 10.3390/s24051422 (accessed: 12.01.2025).

12. Farid, G., Cocuzza, S., Younas, T., Razzaqi, A.A., Wattoo, W.A., Cannella, F., Mo, H. (2022). Modified A-Star approach to plan the motion of a quadrotor UAV in three-dimensional obstacle-cluttered environment. *Applied Sciences*, vol. 12, issue 12. ID: 5791. DOI: 10.3390/app12125791 (accessed: 12.01.2025).

13. Yoo, Y.D., Moon, J.H. (2025). Study on A-Star algorithm-based 3D path optimization method considering density of obstacles. *Aerospace*, vol. 12, issue 2. ID: 85. DOI: 10.3390/aerospace12020085 (accessed: 12.01.2025).

14. Nguyen, N.H.Q., Nechaev, V.N., Malygin, V.B. (2025). Mathematical model and application of the A-star algorithm to optimize ATS routes in the area control center Ho Chi Minh airspace. *Crede Experto: transport, society, education, language*, no. 1, pp. 64–85. DOI: 10.51955/2312-1327_2025_1_64 (in Russian)

15. Van Rossum, G., Drake, F.L. (2009). Python 3 Reference Manual. CreateSpace, Scotts Valley, CA, USA, 242 p.

Сведения об авторах

Нгуен Нгок Хоанг Куан, магистр, заведующий кафедрой помощников по процедурам FPL и полетных диспетчеров Центра подготовки авиационного персонала Вьетнамской авиационной академии, аспирант МГТУ ГА, quannnh@mail.ru.

Нечаев Владимир Николаевич, кандидат исторических наук, доцент, заведующий кафедрой управления воздушным движением МГТУ ГА, v.nechaev@mstuca.ru.

Субботин Роман Александрович, кандидат военных наук, доцент, доцент кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, r.subbotin@mstuca.ru.

Information about the authors

Nguyen Ngoc Hoang Quan, Master, the Head of Department of FPL Procedure Assistant Staff and Flight Dispatcher, Aviation Staff Training Center, Vietnam Aviation Academy, Postgraduate Student at the Moscow State Technical University of Civil Aviation, quannnh@mail.ru.

Vladimir N. Nechaev, Candidate of Historical Sciences, Associate Professor, the Head of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.nechaev@mstuca.ru.

Roman A. Subbotin, Candidate of Military Sciences, Associate Professor, the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, r.subbotin@mstuca.ru.

Поступила в редакцию

20.02.2025

Received

20.02.2025

Одобрена после рецензирования

31.03.2025

Approved after reviewing

31.03.2025

Принята в печать

22.05.2025

Accepted for publication

22.05.2025