

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ.

Ч. 1. Стратегическое планирование четырехмерных траекторий

Е.Л. Кулида, В.Г. Лебедев

Аннотация. Рассмотрены задачи повышения безопасности и эффективности организации воздушного движения. Особое внимание уделено перспективным методам обнаружения и разрешения конфликтов между воздушными судами. Приведена классификация этих методов. Рассмотрена задача минимизации числа потенциальных конфликтов при использовании перспективной технологии управления воздушным движением – стратегическом планировании четырехмерных траекторий. Представлена математическая модель учета неопределенности при стратегическом планировании четырехмерных траекторий, формальная постановка в виде задачи смешанного целочисленного программирования и подходы к ее решению. Для оценки целевой функции необходим подсчет числа потенциальных конфликтов между воздушными судами, который, при учете неопределенностей, требует особенно больших объемов вычислений. Рассмотрен альтернативный подход к оценке пропускной способности воздушного пространства, связанный со сложностью воздушного движения, зависящей от структуры трафика и геометрии воздушного пространства.

Ключевые слова: управление воздушным движением, стратегическое планирование четырехмерных траекторий, обнаружение и разрешение конфликтов воздушных судов.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозируемый рост объемов воздушного движения требует совершенствования системы управления воздушным движением (УВД). С целью разработки и внедрения новых концепций УВД реализуются проекты NextGen [1] в США и SESAR [2] в Европе. Основой новой организации УВД призваны стать стратегическое планирование четырехмерных траекторий (три пространственных координаты и время) и выдерживание назначенных четырехмерных траекторий с большой точностью при помощи автоматизированных систем управления полетами. Ожидается, что такой подход позволит увеличить пропускную способность воздушного пространства и повысить уровень автоматизации труда авиадиспетчеров при сохранении высокого уровня безопасности полетов.

Основной функцией систем УВД является разделение воздушных судов (ВС) с целью обеспече-

ния безопасности воздушного движения, обнаружение и разрешение конфликтов между ВС. Между ВС должны соблюдаться предписанные расстояния: N_v – для вертикального разделения, N_h – для горизонтального разделения за пределами зон аэропортов. В воздушном пространстве, ограниченном цилиндром вокруг ВС (рис. 1), не должны находиться другие ВС, в противном случае ВС считаются потенциально конфликтными, поскольку не обеспечивается необходимое минимальное расстояние разделения между ними.

В процессе разработки проектов автоматизации УВД была предложена концепция спецификации траекторий [3]. Основная идея спецификации траекторий заключается в ограничении положения ВС в любой момент полета точно определенным объемом воздушного пространства. Это пространство определяется допустимыми отклонениями от заданной опорной четырехмерной траектории. Допуски являются динамическими и зависят от летно-технических характеристик ВС и полетной си-

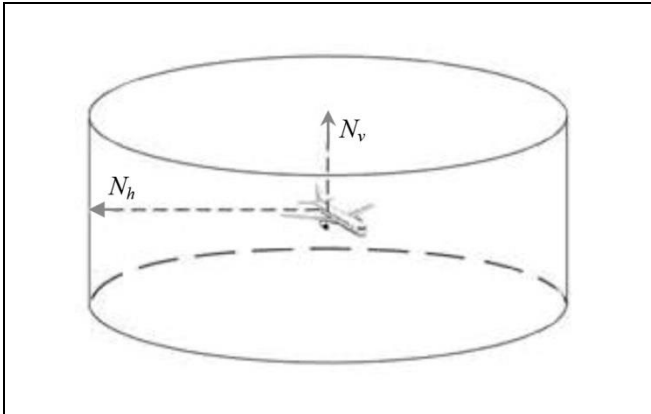


Рис. 1. Ограниченное пространство вокруг ВС, в котором не должны находиться другие ВС

туации. До тех пор, пока все ВС находятся в границах допустимых отклонений от опорной траектории, гарантировано безопасное разделение между ВС даже в случае отказа системы УВД или системы передачи данных в течение рассчитанного бесконфликтного временного горизонта. Этот бесконфликтный временной горизонт составляет порядка 10–15 мин.

Концепция спецификации траекторий должна опираться на совокупность наземного компонента системы УВД и бортового компонента управления полетами. Бортовой компонент предназначен для прогнозирования бесконфликтной траектории с учетом параметров полета ВС и траекторий окружающих ВС. Прогнозируемая траектория передается в наземный компонент, где она проверяется на наличие конфликтов с текущими назначенными траекториями других рейсов и при необходимости изменяется для устранения конфликтов и затем передается обратно в бортовой компонент в качестве назначенной траектории [4].

При стратегическом планировании потенциальные конфликты между ВС должны разрешаться заранее, чтобы тактическое управление в режиме реального времени, вызванное непредвиденным отклонением от назначенной траектории на маршруте, требовалось редко.

В настоящем обзоре приводится классификация методов обнаружения и разрешения конфликтов, применяемых в существующих системах автоматизации УВД. Рассматриваются различные подходы к решению задачи минимизации числа потенциальных конфликтов между ВС, в том числе с учетом неопределенности положения ВС. Для задачи больших масштабов стратегического планирования траекторий в европейском воздушном пространстве с целью уменьшения вычислитель-

ной сложности вместо подсчета количества ВС и числа потенциальных конфликтов между ними предлагается решать задачу снижения сложности воздушного движения. Одним из наиболее узких мест УВД является пропускная способность крупных аэропортов. В этой связи актуальна задача оптимизации последовательности ВС на посадку, решение которой позволит повысить эффективность использования имеющейся инфраструктуры. Во второй части обзора особое внимание уделяется работам, предлагающим применение нового перспективного подхода к решению этих задач, основанного на использовании глубокого обучения с подкреплением.

1. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТОВ

В пилотируемой авиации предотвращение потери безопасного разделения между ВС обеспечивается авиадиспетчерами. На борту для предотвращения опасных ситуаций используется система предупреждения столкновений самолетов в воздухе TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System), а для предупреждения пилотов об угрозе столкновения с землей или с иным препятствием – система предупреждения о близости земли GPWS (Ground Proximity Warning System).

Большое количество научных работ посвящено методам решения задачи автоматизации обеспечения безопасного разделения между ВС. Одной из центральных проблем в этих методах является необходимость предсказания траекторий дальнейшего движения ВС. Поскольку при прогнозировании потенциальных конфликтов ВС необходимо учитывать случайные факторы, предлагались методы обнаружения конфликтов пары ВС на основе случайных процессов [5, 6]. Для более сложных сценариев воздушного движения предлагался алгоритм системы взаимодействующих частиц [7]. В работе [8] проблема обнаружения конфликтов ВС рассматривается как проблема бинарной классификации для обнаружения конфликта нескольких ВС, находящихся в свободном полете, т. е. имеющих свободу выбора своей траектории и скорости. Предлагается метод прогнозирования конфликтов в течение краткосрочного и среднесрочного времени с помощью метода распознавания образов.

В работе [9] сравниваются более ста методов обнаружения и разрешения конфликтов для пилотируемой и беспилотной авиации. Вводятся категории методов обнаружения конфликтов (табл. 1).



Таблица 1

Категории методов обнаружения конфликтов

Наблюдение	Централизованное зависимое Распределенное зависимое Независимое
Распространение траекторий	На основе текущего состояния ВС С учетом номинальных траекторий
Гипотеза прогнозирования	Номинальная Наихудший случай Вероятностная

Наблюдение за окружающими ВС может быть централизованным – через системы УВД с земли – или распределенным. При распределенном зависимом наблюдении ВС обмениваются параметрами о своем местоположении, высоте, идентификационных данных посредством канала передачи данных ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast) без какого-либо вмешательства со стороны наземных систем. Беспилотной авиацией для обнаружения статических и динамических препятствий используется независимое наблюдение – бортовые системы/датчики, не взаимодействующие друг с другом.

Распространение траектории ВС может быть спрогнозировано на основе их текущего состояния или с учетом их номинальных траекторий. Распространение траектории на основе текущего состояния предполагает прямолинейную проекцию текущего положения ВС и вектора скорости. Однако, если будущие изменения траектории всех задействованных ВС не принимаются во внимание, могут возникать ложные тревоги, а возможные конфликты могут быть упущены из виду.

Оценка будущих положений ВС может быть номинальной, оценкой наихудшего случая и вероятностной. Номинальная оценка не учитывает неопределенности (т. е. поведение других ВС, ветер),

такую оценку формируют на короткий отрезок времени. Оценка наихудшего случая учитывает все возможные изменения траектории в результате неопределенностей. Однако это непрактично в реальной среде, поскольку приводит к большим вычислениям, большому количеству сигналов ложной тревоги и сокращает пространство для маневрирования. Чаще всего используется вероятностная оценка, которая учитывает вероятность каждого возможного изменения траектории на основе текущего положения, максимальных скоростей разворота и набора высоты.

Категории методов разрешения конфликтов представлены в табл. 2.

Управление разделением ВС может быть централизованным или распределенным. Централизованная система способна обеспечить глобальное решение сложных проблем для многих участников. В пилотируемой авиации УВД осуществляет централизованное обеспечение безопасности движения. В распределенной системе разделение обеспечивается отдельными ВС. Поскольку при распределенной системе предотвращения конфликтов каждое ВС учитывает только соседние ВС, ожидается, что она будет иметь меньшую вычислительную сложность. Рост количества беспилотных ВС также способствует развитию распределенных подходов. Главным недостатком распределенной системы является отсутствие глобальной координации со стороны окружающего трафика, что может отрицательно сказаться на безопасности. Ожидается, что внедрение технологии ADS-B позволит распределенной системе разрешения конфликтов гарантировать безопасное разделение ВС в воздухе.

Централизованные методы разделяются на две основные категории: точные и эвристические (метаэвристические). Для нахождения точного решения обычно используется смешанное целочисленное линейное программирование. Первый точный подход к глобальной оптимизации был представлен в 2002 г. [10], было предложено две модели

Таблица 2

Категории методов разрешения конфликтов

Управление разделением ВС	Категории методов управления	Разрешение конфликтов многих участников
Централизованное	Точный Эвристический	Последовательно Параллельно
Распределенное	Предписанный Реактивный Явное согласование	Последовательно попарно Попарно, суммированный Совместное решение

смешанного целочисленного линейного программирования: первая модель основана на управлении скоростью, а вторая – на управлении курсом. В работе [11] предлагается двухэтапный подход, при котором максимальное количество конфликтов сначала устраняется только с помощью контроля скорости, а неразрешенные конфликты устраняются с помощью контроля направления. В монографии [12] приводится обзор литературы по точным подходам к разрешению конфликтов. Этот обзор свидетельствует о том, что «...математическое программирование может сыграть существенную роль при разработке инструментов поддержки принятия решений для организации воздушного движения и, в частности, для устранения конфликтов с ВС. Однако после нескольких десятилетий усилий современным подходам все еще свойственны существенные ограничения, когда дело доходит до их реального применения... Будущие подходы, помимо удовлетворения вычислительных требований из-за необходимости решать задачи в режиме реального времени, должны будут учитывать более широкий набор характеристик, чем существующие модели. К ним относятся, среди прочего, способность справляться с неопределенностью, точное моделирование таких целей, как потребление энергии, устойчивость решения к сбоям и интеграция с погодными условиями.»

Точный алгоритм требует слишком большого объема вычислений, что обычно делает его неприменимым в реальной жизни. Эвристические (метаэвристические) алгоритмы, хотя и не гарантируют оптимального решения, часто используются для сокращения времени выполнения. Обычно применяются такие эвристические (метаэвристические) подходы, как поиск по переменной окрестности [13], оптимизация муравьиной колонии [14], эволюционные алгоритмы [15].

Распределенные подходы разделяются на три основные категории: предписанные, реактивные и разрешение путем согласования. В предписанных методах движение регулируется в соответствии с заранее определенным набором правил. В реактивных методах стратегия маневрирования определяется геометрией конфликта. Методы разрешения путем согласования устраняют конфликты с помощью явной связи между ВС [16]. Однако в любых переговорах существует риск тупика, когда ВС общаются бесконечно, не достигая соглашения. Количество взаимодействий должно быть ограничено, чтобы ВС не могло слишком долго вести переговоры или бесконечно ожидать данных от другого ВС.

В табл. 3 представлены основные особенности маневров разрешения конфликтов между ВС.

Таблица 3

Категории маневров разрешения конфликтов

Планирование уклонения	Стратегическое Тактическое Отвод
Маневр уклонения	Курс Скорость По вертикали План полета
Тип препятствия	Статические Динамические Все
Оптимизация	Траектория полета Время полета Потребление топлива/энергии

В зависимости от времени, на которое планируется маневр уклонения, прогнозирование может быть:

– стратегическое – это действие на большие расстояния, которое значительно изменяет траекторию полета;

– тактическое – это действие на средние расстояния, которое изменяет небольшую часть траектории полета;

– отвод – это краткосрочный маневр, который выводит ВС в безопасное место без дополнительного учета траектории полета.

Маневры для сохранения необходимого разделения между ВС могут быть основаны на изменении текущего курса, скорости, высоты полета, плана полета. Желательно чтобы количество выполняемых маневров и отклонение от первоначальной траектории было минимальным, при этом решение должно быть найдено в течение времени, имеющегося до потери минимального разделения между ВС.

В работе [9] утверждается, что в настоящее время большинство моделей включают тактическое планирование, распределенное управление и фокусируются на номинальном распространении траекторий на основе текущего состояния всех задействованных ВС. Отмечено, что для определения дальнейших путей улучшения методов необходимо получить более полное представление о том, как существующие методы работают в конкретных сценариях трафика.



2. ЗАДАЧА МИНИМИЗАЦИИ ЧИСЛА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ КОНФЛИКТОВ

2.1. Модель неопределенности положения воздушного судна

Рассматриваются дискретизированные четырехмерные траектории – последовательности четырехмерных координат, по которым проходит траектория ВС: (x, y, z, t) , где x – широта; y – долгота; z – высота; t – время.

На траекторию ВС может влиять большое количество случайных причин, таких как ветер, а также ошибки слежения, навигации и управления.

Для решения задачи стратегического планирования траекторий в работе [17] предлагается положение ВС рассматривать с учетом неопределенности в горизонтальной плоскости вдоль траектории. В дополнение к неопределенности в горизонтальной плоскости в работе [18] рассматривается неопределенность высоты полета и неопределенность времени прибытия в заданную точку.

Математическая модель неопределенности положения ВС вводится следующим образом (рис. 2).

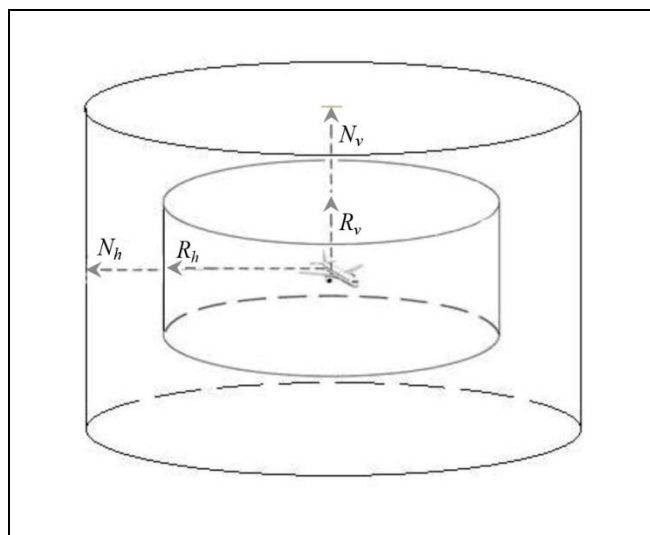


Рис. 2. Ограниченное пространство вокруг ВС с учетом неопределенности

Из-за неопределенности в момент времени t в горизонтальной плоскости ВС может находиться в круге установленного радиуса R_h с центром (x, y) :

$$\{(x^r, y^r) : (x^r - x)^2 + (y^r - y)^2 \leq R_h^2\}.$$

Вследствие этого радиус надежного минимального разделения ВС в горизонтальной плоскости

увеличивается на величину радиуса неопределенности:

$$N_h^r = N_h + R_h.$$

Аналогично неопределенность положения ВС в вертикальной плоскости определяется установленным радиусом неопределенности R_v :

$$|z - z^r| \leq R_v.$$

Таким образом, расстояние надежного минимального разделения в вертикальной плоскости с учетом величины неопределенности

$$N_v^r = N_v + R_v.$$

Неопределенность времени прибытия определяет t_E – максимальная временная ошибка.

Реальное время прибытия с учетом неопределенности

$$t^r \in [t - t_E, t + t_E].$$

Потенциальный конфликт между траекториями α и β с учетом неопределенности может возникнуть, если в точках P с координатами (x_P, y_P, z_P, t_P) и Q с координатами (x_Q, y_Q, z_Q, t_Q) на этих траекториях выполнены три условия:

- $\sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2} < N_h^r,$
- $|z_P - z_Q| < N_v^r,$
- $|t_P - t_Q| < 2t_E.$

На рис. 3 представлено пересечение траекторий в горизонтальной плоскости.

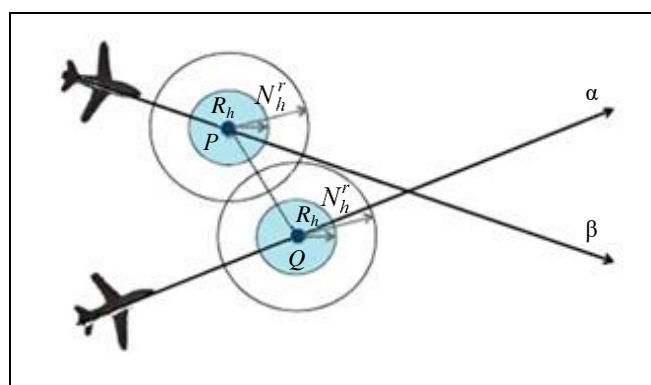


Рис. 3. Пересечение траекторий в горизонтальной плоскости

На рис. 4 представлены возможные сценарии пересечения траекторий самолетов α и β по времени. На верхней временной оси отражено время прибытия самолета α в точку P . Ниже представлено четыре возможных положения на временной оси времени прибытия самолета β в точку Q .

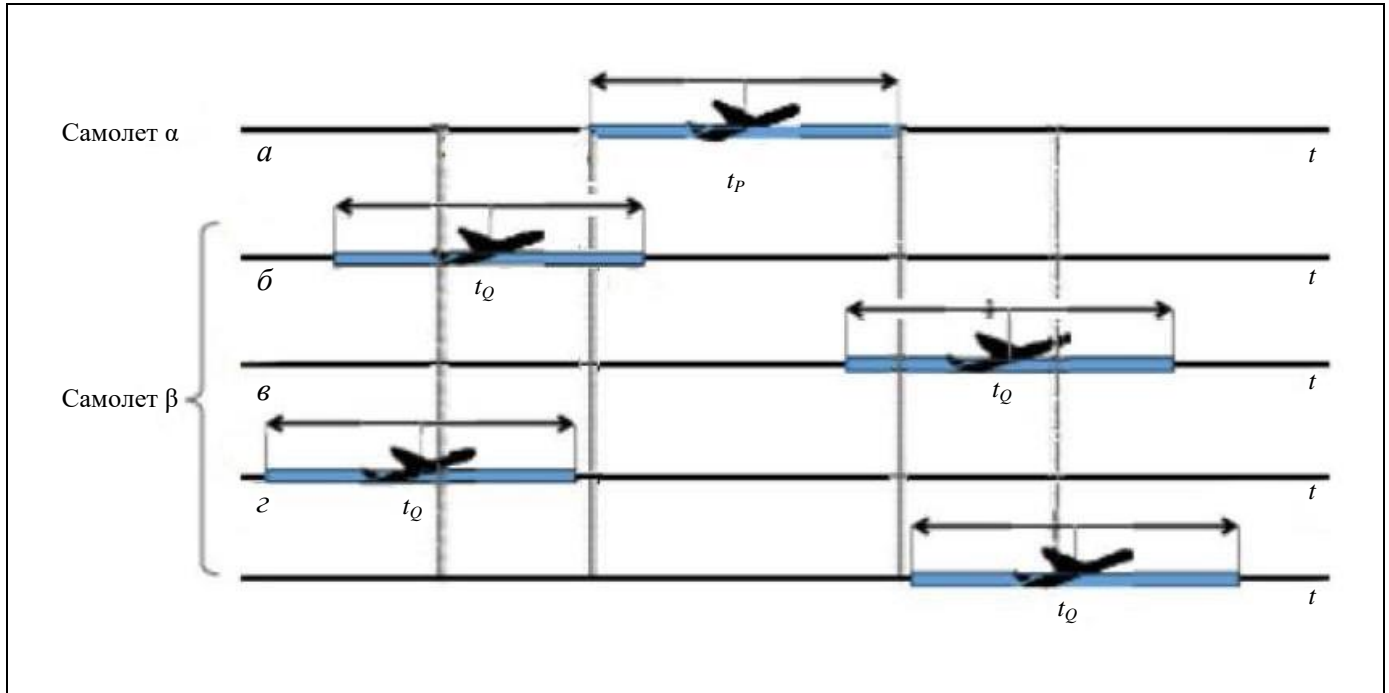


Рис. 4. Возможные сценарии пересечения траекторий по времени

В случаях *a*) и *б*) потенциальный конфликт возможен, в случаях *в*) и *г*) – нет.

Набор неопределенностей неявно описывает все возможные сценарии взаимодействия между ВС (подход наихудшего случая).

Задача минимизации числа потенциальных конфликтов при стратегическом планировании траекторий заключается в следующем: рассматривается набор всех четырехмерных траекторий полетов на определенный день в масштабах страны или континента. Для каждого полета предполагаются известными:

- набор возможных маршрутов в горизонтальной плоскости,
- набор возможных уровней высоты,
- набор возможных времен отправления,
- параметры неопределенности положения ВС и времени прибытия.

Потенциальные конфликты между ВС могут быть разрешены различными способами: с помощью изменения времен вылета, скоростей, высоты полетов или горизонтальных траекторий ВС, вовлеченных в конфликт, или комбинации этих способов.

Цель заключается в том, чтобы найти альтернативный набор четырехмерных траекторий с минимальным числом потенциальных конфликтов.

Предлагались формализации задачи минимизации числа потенциальных конфликтов в виде задачи смешанно-целочисленного линейного и нелинейного программирования. Однако высокие тре-

бования к памяти и времени вычислений из-за большого количества конфликтов, числа переменных и ограничений не позволяют получить оптимальные решения. Это породило большое количество различных подходов и эвристических методов приближенного решения задачи.

2.2. Минимизация числа потенциальных конфликтов в воздушном пространстве на основе изменения времени вылета

При организации воздушного движения должны удовлетворяться ограничения пропускной способности секторов воздушного пространства по маршруту – максимальное количество ВС, входящих в сектор за определенный период времени.

Одним из самых простых способов снижения нагрузки на систему УВД является отсрочка вылета рейсов, если превышены ограничения пропускной способности секторов воздушного пространства на маршруте. Однако отсрочки вылета могут привести к проблемам для авиакомпаний, поэтому их необходимо минимизировать.

В работе [19] предлагается подход к корректировке времен вылета на основе моделирования возможных конфликтных ситуаций между любыми двумя ВС и разрешения всех конфликтов вместо удовлетворения ограничений пропускной способности секторов. Однако необходимое разделение между ВС сохранится только в случае, если



ВС смогут точно следовать запланированным четырехмерным траекториям. При введении параметра неопределенности времени вылета и навигации количество необходимых задержек быстро возрастает, поэтому требуется дополнительно применять другие методы минимизации числа потенциальных конфликтов.

2.3. Минимизация числа потенциальных конфликтов регулированием скорости

В работе [20] исследуется возможность минимизации числа потенциальных конфликтов на основе регулирования скоростей в малом диапазоне (от -6% до $+3\%$ от первоначальной скорости) с сохранением исходных траекторий движения ВС. Предлагаются две модели смешанной целочисленной оптимизации для разрешения потенциальных конфликтов ВС на основе регулирования скорости, обсуждаются результаты решения при помощи решателя общего назначения COUENNE [21]. Однако для больших размерностей задачи высокие требования к памяти и времени не позволяют получить оптимальные решения. Предлагается эвристическая процедура для получения решения удовлетворительного качества, основанная на декомпозиции задачи на подзадачи, включающие небольшое количество самолетов, для которых может быть вычислено оптимальное решение. Понятие кластера, которое базируется на предположении, что в реальных ситуациях среди траекторий большого количества ВС лишь небольшие группы ВС с близкими траекториями потенциально попадают в конфликт, вводится в работе [22]. Затем полученные локальные решения объединяются.

2.4. Минимизация числа потенциальных конфликтов в воздушном пространстве на основе изменения запланированной траектории в горизонтальной плоскости

В работе [23] предлагается способ изменения первоначально запланированных траекторий в горизонтальной плоскости для решения задачи минимизации числа потенциальных конфликтов. Форма траектории ВС с номером $i = 1, \dots, N$ изменяется с помощью добавления дополнительных M равномерно расположенных вдоль первоначальной траектории путевых точек (рис. 5), в которых происходит боковое отклонение от первоначальной траектории:

$$w = \{w_i^j\}; j = 1, \dots, M.$$

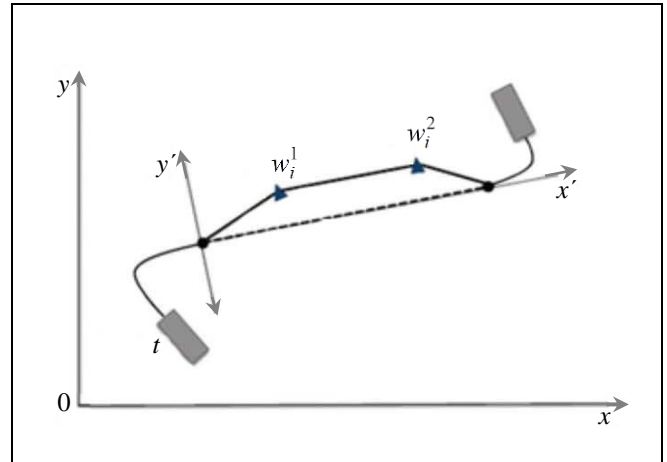


Рис. 5. Дополнительные путевые точки

Чтобы избежать резких поворотов, виртуальные путевые точки не должны располагаться слишком близко друг к другу.

Боковое отклонение ограничивается таким образом, чтобы длина маршрута не превысила заданные ограничения. Например, на рис. 6 при количестве виртуальных путевых точек $M = 2$ и количестве возможных отклонений $K = 7$ возникает $7^2 = 49$ возможных вариантов маршрута.

Максимальное допустимое боковое отклонение ограничивается таким образом, чтобы увеличение длины первоначальной траектории не превысило заданного пользователем значения, в пределах $w_{i,y}^j \in [-a_i, a_i]$, где $w_{i,y}^j$ – координата y j -й виртуальной путевой точки.

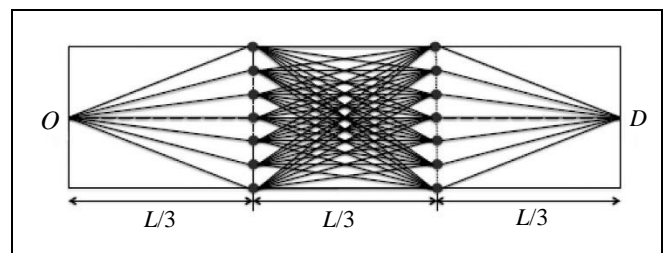


Рис. 6. Возможные варианты маршрута

2.5. Формулировка задачи смешанного целочисленного программирования

Задачу минимизации числа потенциальных конфликтов N дискретизированных четырехмерных траекторий для ВС можно сформулировать в виде задачи смешанного целочисленного программирования [18].

Переменные решения представляются в виде:

$$u = (\delta, \omega, l),$$

где $\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N)$, δ_i – сдвиг времени вылета, который выбирается из равномерно дискретизированного интервала $[\delta_{i,\min}, \delta_{i,\max}]$; $t_i = t_{i,0} + \delta_i$ – время вылета i -го ВС, где $t_{i,0}$ – запланированное время вылета; $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)$, ω_i – координаты дополнительных путевых точек; $l = (l_1, l_2, \dots, l_N)$, l_i – сдвиг высоты полета i -го ВС; $i = \overline{1, N}$.

Пусть $\Phi_i(u)$ – число потенциальных конфликтов, с которыми сталкивается i -е ВС. Задача минимизации числа потенциальных конфликтов заключается в минимизации функции

$$\sum_{i=1}^N \Phi_i(u).$$

Поскольку пространство решений не является непрерывным, время решения экспоненциально растет с ростом размерности задачи N . Кроме того, переменные решения не являются независимыми из-за взаимодействия между рейсами.

Эта задача комбинаторной оптимизации является NP -трудной.

Для оценки целевой функции необходима методика обнаружения потенциальных конфликтов между ВС. Обнаружение конфликтов между траекториями с допусками требует значительно больших вычислений, чем обнаружение конфликтов между траекториями без допусков. При ненулевых допусках в каждый момент времени каждая точка в ограничивающем объеме воздушного пространства для одного рейса должна быть достаточно удалена от каждой точки в ограничивающем объеме воздушного пространства для другого рейса. При этом требуются алгоритмы обнаружения конфликтов почти в реальном времени.

Для реализации эффективного алгоритма обнаружения конфликтов необходимо избегать ненужных вычислений, когда разделение между ВС значительно больше минимально необходимого либо

по вертикали, либо по горизонтали, либо по времени.

Предлагается схема обнаружения конфликта на основе дискретизации воздушного пространства с помощью четырехмерной пространственно-временной сетки, т. е. в виде ряда трехмерных сеток с шагом дискретизации по времени (рис. 7) [23].

Размер ячеек сетки определяется нормами разделения ВС по соответствующим измерениям. Положение самолета связывается с соответствующей ячейкой в четырехмерной сетке. Каждая ячейка в этой сетке имеет $3^3 = 27$ соседних ячеек, включая саму эту ячейку. Потенциальные конфликты могут быть обнаружены путем проверки 27 соседних клеток для каждой непустой клетки в сетке.

Потенциальный конфликт выявляется, если либо одна клетка занята разными ВС, либо соседние клетки заняты разными ВС.

В работе [24] предлагается реализация алгоритма обнаружения конфликтов на графическом процессоре (GPU). Утверждается, что по сравнению с реализацией на процессоре CPU предлагаемый алгоритм сокращает время вычислений на два порядка.

2.6. Оценка сложности воздушного движения

Альтернативный подход к оценке пропускной способности воздушного пространства может быть связан не с количеством ВС и подсчетом конфликтов между ними, а со сложностью воздушного движения, зависящей от структуры трафика и геометрии воздушного пространства [25].

Показатель сложности, основанный на линейной динамической системе, адаптирован для оценки загруженности трафика за полный временной горизонт. Вместо простого подсчета количества ВС сложность движения, связанная с полетной ситуацией, может быть измерена с использованием векторов положения ВС и скорости.

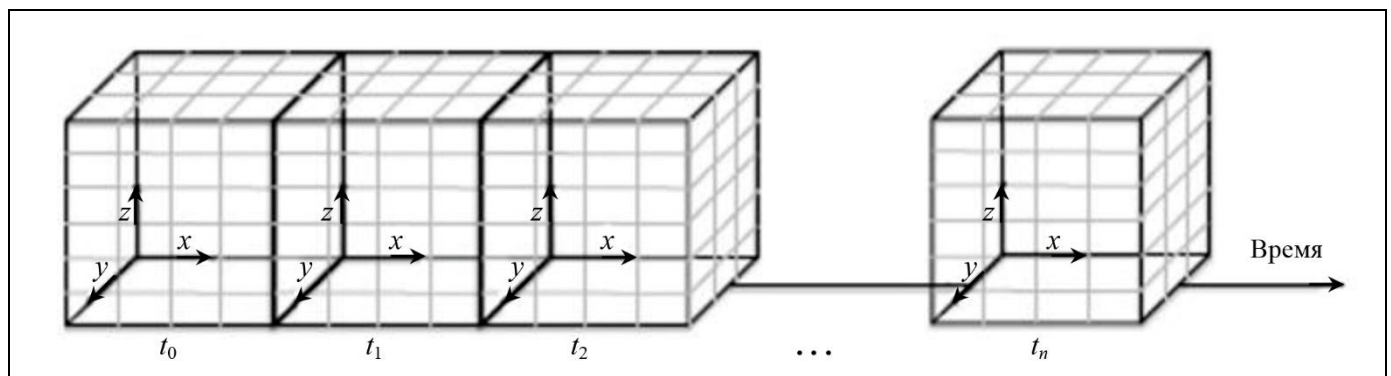


Рис. 7. Дискретизация воздушного пространства



Предположим, что в данный момент времени в данном районе присутствуют несколько ВС. Для каждого самолета мы рассматриваем два вектора наблюдения: измерение положения $X_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ и измерение скорости $V_i = [v_{x_i} \ v_{y_i} \ v_{z_i}]^T$.

Чтобы вычислить локальную сложность, связанную с данной полетной ситуацией, необходимо представить такую ситуацию в виде линейной динамической системы. Уравнение движения будет таким:

$$\dot{X}_i = AX_i + B,$$

где \dot{X}_i – оценочный вектор скорости, связанный с каждой точкой в пространстве состояний; X_i – вектор положения; матрица коэффициентов A – линейное отображение между \dot{X}_i и X_i , а вектор B представляет статическое поведение системы.

Чтобы определить точную модель динамической системы, наилучшим образом подходящую для наблюдений в пространстве состояний, необходимо найти матрицу A и вектор B , которые минимизируют ошибку между наблюдениями скорости и оцененными векторами скорости.

Расчет матрицы A и вектора B подробно описан в работе [26].

На основе матрицы A и ее собственных значений метрика локальной сложности определяется следующим образом:

- метрикой будет сумма в абсолютных значениях отрицательных действительных частей собственных значений;
- если ни одно из собственных значений не обладает отрицательной вещественной частью, метрика будет равна нулю.

С помощью этого определения измеряется интенсивность тенденции к сближению в полетной ситуации в данный момент времени.

Если метрика равна нулю, то сложность равна нулю, расходящиеся ВС не приведут к конфликтам в воздушном движении. Ненулевая метрика означает, что есть риск потенциальных конфликтов, более высокое значение показателя указывает на больший уровень риска.

Для получения метрики локальной сложности $\Psi_{i,k}$ для i -го ВС на k -й выборке траектории процесс начинается с определения дорожной ситуации вокруг i -го ВС путем рассмотрения соседних ВС в горизонтальном и вертикальном измерениях. Скорости и положения соседних ВС учитываются для вычисления метрики локальной сложности.

Обозначим набор собственных значений матрицы A i -го ВС на k -й выборке траектории

$$\Lambda_{i,k} = \{\lambda_{i,k}^{(1)}, \lambda_{i,k}^{(2)}, \dots, \lambda_{i,k}^{(N_e)}\},$$

$$\Psi_{i,k} = \sum_{n \in \mathcal{N}} |\operatorname{Re}\{\lambda_{i,k}^{(n)}\}|, \mathcal{N} = \{n: \operatorname{Re}\{\lambda_{i,k}^{(n)}\} < 0\}.$$

Локальная сложность вдоль траектории i -го ВС вычисляется следующим образом:

$$\Psi_i = \sum_{k=1}^{N_i} \Psi_{i,k},$$

где N_i – число выборок траектории i -го ВС.

Совокупная сложность для всех ВС в воздушном пространстве определяется следующим образом:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Psi_i = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{N_i} \Psi_{i,k}.$$

2.7. Гибридный метаэвристический подход к решению задачи

В работе [18] для решения задачи минимизации числа потенциальных конфликтов между ВС предложен алгоритм имитации отжига, но его применение требует большого количества оценок целевой функции, что приводит к очень большому количеству вычислений. Для ускорения сходимости в метод имитации отжига интегрирован метод локального эвристического поиска.

Гибридный метаэвристический подход основан на классическом алгоритме имитации отжига и двух различных модулях локального поиска. Локальный поиск позволяет активизировать поиск вокруг потенциального решения-кандидата, имитация отжига обеспечивает исследование пространства решений и позволяет системе избежать локальных минимумов, допуская случайные решения, которые ухудшают значение целевой функции. Предлагаемый гибридный алгоритм объединяет алгоритм имитации отжига и алгоритм локального поиска таким образом, что локальный поиск рассматривается как внутренний цикл алгоритма имитации отжига, который выполняется при определенных условиях.

Алгоритм имитации отжига заключается в следующем. Сначала оценивается целевая функция Φ_C для текущего решения. Затем случайным образом выбирается номер рейса для модификации и для него генерируется новое решение. Если это решение улучшает значение целевой функции, то оно принимается. В противном случае оно принимается с вероятностью $e^{-\Delta\Phi/T}$, где $\Delta\Phi = \Phi_N - \Phi_C$ – разность значений целевой функции для нового

состояния N и текущего состояния S . Когда достигается максимальное количество итераций n_T при заданной температуре T , температура снижается в соответствии с заданным пользователем расписанием, и процесс повторяется до тех пор, пока достигается заранее определенная конечная температура T_{final} .

В качестве модулей локального поиска выступают эвристические методы, новое решение принимается только в том случае, если оно приводит к уменьшению значения целевой функции. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет найдено никаких дальнейших улучшений или пока не будет достигнуто максимальное количество итераций $n_{T,loc}$.

Два модуля локального поиска соответствуют двум стратегиям:

- интенсификации поиска по одной конкретной траектории,
- интенсификации поиска по всем взаимодействующим с выбранной траекториям.

Для генерации нового решения определяется, следует ли изменять местоположение путевых точек или изменять время вылета. В целом, поиск решения с изменением времени вылета предпочтительнее, поскольку это не приводит к дополнительному расходу топлива. Однако эмпирические тесты показывают, что ограничение поиска только изменением времени вылета требует непомерно большого вычислительного времени. Поэтому вводится определяемый пользователем параметр P_w для управления вероятностью изменения местоположения путевых точек, а вероятность изменения времени вылета равна $1 - P_w$.

Ключевым фактором в настройке этого гибридного алгоритма является достижение хорошего компромисса между исследованием и эксплуатацией пространства решений, т. е. компромисса между тонкой сходимостью к локальным минимумам и временем вычислений, затрачиваемым на исследование всего пространства поиска.

2.8. Результаты моделирования

Предложенный алгоритм был протестирован с использованием данных о воздушном трафике в европейском воздушном пространстве [18]. Были исследованы и сопоставлены две стратегии локального поиска. Численные результаты показали, что последовательное использование обеих стратегий, сначала для одной конкретной траектории, а затем для всех взаимодействующих с ней траекто-

рий требует на 40% меньше времени вычислений, чем при использовании каждой стратегии в отдельности.

Исследовалось влияние количества виртуальных путевых точек на время разрешения. Несмотря на увеличение богатства пространства решений, использование большего количества виртуальных путевых точек приводит к увеличению количества вариантов в пространстве поиска, что приводит к увеличению времени вычислений и результирующие траектории включают нежелательные зигзаги.

Численные результаты показали также, что одного использования сдвигов времени вылета недостаточно для получения решений без потенциальных конфликтов. Аналогично, изменение только формы траектории также недостаточно и требует непомерно большого времени вычислений. Когда допускаются изменения как времени вылета, так и формы траектории, то увеличивается богатство пространства решений и оптимальное (без взаимодействия) решение может быть получено за значительно меньшее время вычислений.

Влияние ограничений оптимизации (максимальное смещение времени отправления и максимальное увеличение длины маршрута) было также изучено. Как и ожидалось, при ослаблении таких ограничений проблема может быть решена за меньшее время вычислений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение нескольких десятилетий проводились обширные исследования по проблеме автоматизации поддержки принятия решений в системах УВД. Математические модели, разработанные в связи с этой проблемой, основаны либо на минимизации числа потенциальных конфликтов между четырехмерными траекториями ВС, либо на перераспределении потоков ВС с целью уменьшения перегрузки воздушного пространства. Для уменьшения числа потенциальных конфликтов между ВС в основном используется одно или несколько из следующих действий: задержки вылета рейсов, регулирование скорости в воздухе, изменение траекторий полета, изменение уровня высоты полета.

Было показано, что задача минимизации числа потенциальных конфликтов между ВС является NP -трудной. Это привело к появлению различных метаэвристических алгоритмов для ее решения. Для стратегического планирования потока ВС с учетом неопределенности положения ВС был разработан гибридный метаэвристический подход на основе алгоритма имитации отжига, улучшенный методами локального поиска.



Сложность и масштабность задачи минимизации числа потенциальных конфликтов в воздушном пространстве требует поиска новых подходов к ее решению. В последние годы появились работы, посвященные применению методов глубокого обучения с подкреплением для решения задач, связанных с повышением безопасности и эффективности организации воздушного движения. Подробнее эти работы будут рассмотрены во второй части настоящего обзора.

ЛИТЕРАТУРА

1. *The Next Generation Air Transportation System (NextGen). Concept of Operations.* – Washington, DC: Joint Planning & Development Office, 2011.
2. *Sesar Joint Undertake. European ATM Master Plan.* – Brussels, Belgium: SESAR, 2020.
3. *Paielli, R.A. Trajectory Specification for High-Capacity Air Traffic Control // Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication.* – 2005. – Vol. 2, no. 9. – P. 361–385. – DOI: 10.2514/1.12335
4. *Paielli, R.A., Erzberger, H. Trajectory Specification for Terminal Airspace: Conflict Detection and Resolution // Journal of Air Transportation.* – 2019. – Vol. 27, no. 2.
5. *Paielli, R.A., Erzberger H. Conflict Probability Estimation for Free Flight // Journal of Guidance, Control, and Dynamics.* – 1997. – Vol. 20, no. 3. – P. 588–596.
6. *Paielli, R.A., Erzberger H. Conflict Probability Estimation Generalized to Non-level Flight // Air Traffic Control Quarterly.* – 1999. – Vol. 7, no. 3. – P. 195–222.
7. *Jacquemart, D., Morio, J. Adaptive Interacting Particle System Algorithm for Aircraft Conflict Probability Estimation // Aerospace Science and Technology.* – 2016. – Vol. 55. – P. 431–438.
8. *Jiang, X.R., Wen, X.X., Wu, M.G., et al. A SVM Approach of Aircraft Conflict Detection in Free Flight // Journal of Advanced Transportation.* – 2018. – No. 4. – P. 1–9.
9. *Ribeiro, M., Ellerbroek, J., Hoekstra, J. Review of Conflict Resolution Methods for Manned and Unmanned Aviation // Aerospace.* – 2020. – Vol. 7, no. 79. – DOI: 10.3390/aerospace7060079.
10. *Pallottino, L., Feron, E., Bicchi, A. Conflict Resolution Problems for Air Traffic Management Systems Solved with Mixed Integer Programming // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* – 2002. – No. 3. – P. 3–11.
11. *Cafieri, S., Omheni, R. Mixed-Integer Nonlinear Programming for Aircraft Conflict Avoidance by Sequentially Applying Velocity and Heading Angle Changes // European Journal of Operational Research.* – 2017. – Vol. 260. – P. 283–290.
12. *Pelegri, M., d'Ambrosio, C. Airspace Conflict Resolution: A Unifying Mathematical Framework and Review // HAL.* – 2021. – URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02902566/>.
13. *Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F., Martin-Campo, F.J., Mladenovic, N. A VNS Metaheuristic for Solving the Aircraft Conflict Detection and Resolution Problem by Performing Turn Changes // Journal of Global Optimization.* – 2014. – Vol. 63 – P. 583–596.
14. *Liu, H., Liu, F., Zhang, X., et al. Aircraft Conflict Resolution Method Based on Hybrid Ant Colony Optimization and Artificial Potential Field // Science China Information Sciences.* – 2018. – Vol. 61. – Art. no. 129103.
15. *Allignol, C., Barnier, N., Durand, N., Alliot, J.M. A New Framework for Solving En Route Conflicts // Air Traffic Control Quarterly.* – 2013. – Vol. 21, no. 3. – P. 233–253. – DOI: 10.2514/atcg.21.3.233
16. *Sislak, D., Volf, P., Pechoucek, M. Agent-Based Cooperative Decentralized Airplane-Collision Avoidance // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* – 2011. – Vol. 12. – P. 36–46.
17. *Chaimatanan, S., Delahaye, D., Mongeau, M. A Hybrid Metaheuristic Optimization Algorithm for Strategic Planning of 4D Aircraft Trajectories at the Continental Scale // IEEE Computational Intelligence Magazine.* – 2014. – Vol. 9, no. 4. – P. 46–61.
18. *Chaimatanan, S., Delahaye, D., Mongeau, M. Aircraft 4D Trajectories Planning under Uncertainties // Proceedings of 2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI 2015).* – Cape Town, South Africa. – 2015. – P. 51–58.
19. *Barnier, N., Allignol, C. 4D – Trajectory Deconfliction Through Departure Time Adjustment // 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. ATM 2009.* – Napa, USA, 2009.
20. *Cafieri, S., Durand, N. Aircraft Deconfliction with Speed Regulation: New Models from Mixed-Integer Optimization // Journal of Global Optimization.* – 2014. – Vol. 58, no. 4. – P. 613–629.
21. *Belotti, P., Lee, J., Liberti, L., et al. Branching and Bounds Tightening Techniques for Non-convex MINLP // Optimization Methods and Software.* – 2009. – Vol. 24(4). – P. 597–634.
22. *Granger, G., Durand, N. A Traffic Complexity Approach through Cluster Analysis // Proceedings of the 5th ATM Research and Development Seminar.* – Budapest, Hungary, 2003.
23. *Chaimatanan, S., Delahaye, D., Mongeau M. Strategic Deconfliction of Aircraft Trajectories // ISIATM 2013, 2nd International Conference on Interdisciplinary Science for Innovative Air Traffic Management.* – Toulouse, France, 2013.
24. *Alligier, R., Durand, N., Alligier, G. Efficient Conflict Detection for Conflict Resolution // ICRAT 2018, 8th International Conference on Research in Air Transportation.* – Castelldefels, Spain, 2018.
25. *Delahaye, D., Puechmorel, S. New Trends in Air Traffic Complexity // ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC).* – Tokyo, Japan, 2009. – P. 55–60.
26. *Delahaye, D., Paimblanc, P., Puechmorel, S. et al. A New Air Traffic Complexity Metric Based on Dynamical System Modelization // IEEE/AIAA 21st Digital Avionics Systems Conference – Vol. 1. – Inst. of Electrical and Electronics Engineers. – Irvine, USA, 2002.*

Статья представлена к публикации членом редколлегии
А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 10.11.2022,
после доработки 19.12.2022.
Принята к публикации 20.12.2022.

Кулида Елена Львовна – канд. техн. наук,
✉ elena-kulida@yandex.ru,

Лебедев Валентин Григорьевич – д-р техн. наук,
✉ lebedev-valentin@yandex.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

METHODS FOR SOLVING SOME PROBLEMS OF AIR TRAFFIC PLANNING AND REGULATION.

Part I: Strategic Planning of 4D Trajectories

E.L. Kulida¹ and V.G. Lebedev²

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹✉ elena-kulida@yandex.ru, ²✉ lebedev-valentin@yandex.ru

Abstract: This paper considers the problems of improving the safety and efficiency of air traffic flows. Particular attention is paid to promising methods for detecting and resolving aircraft conflicts. These methods are classified. We study the problem of minimizing the number of potential conflicts with a promising air traffic control technology, the strategic deconfliction of 4D trajectories. We present a mathematical model to consider uncertainty in the strategic deconfliction of 4D trajectories, a corresponding formal statement as a mixed integer programming problem, and some approaches to solve this problem. Estimating the objective function requires calculating the number of potential conflicts between aircraft. Under uncertainty, this estimation involves a large amount of computations. We discuss an alternative approach to airspace capacity estimation based on air traffic complexity depending on the traffic structure and geometry of the airspace.

Keywords: air traffic management, strategic deconfliction of 4D trajectories, detection and resolution of aircraft conflicts.