

# АЛГОРИТМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ПРОДОЛЬНОГО ЭШЕЛОНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

**Е.Л. Кулида**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [lenak@ipu.ru](mailto:lenak@ipu.ru)

**В.Г. Лебедев**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [lebedev@ipu.ru](mailto:lebedev@ipu.ru)

**Н.А. Егоров**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [egorov@ipu.ru](mailto:egorov@ipu.ru)

**Ключевые слова:** управление воздушным движением, перспективные бортовые процедуры, расчет длины траектории, рельеф местности.

**Аннотация:** В докладе приводится методика расчета требуемой длины траектории, а также алгоритм функционирования перспективной расширенной бортовой процедуры FIM в условиях сложного рельефа местности.

## 1. Введение

Одной из перспективных бортовых процедур, направленных на выдерживание необходимых интервалов между воздушными судами (ВС) в районе аэродрома, является процедура обеспечения требуемого временного интервала от впереди идущего (опорного) ВС – Flight-Deck Interval Management (процедура FIM) [1]. Бортовое средство поддержки продольного эшелонирования FIM рассчитывает и выдает рекомендации по скорости для выдерживания заданного интервала относительно впереди идущего ВС или пролета точек воздушного пространства согласно плану полета. В частности, данная процедура используется в комбинации с диспетчерским управлением в перспективных проектах по развитию планирования и регулирования потоков воздушного движения в районе аэродрома [2].

ВС, оборудованное FIM-авионикой, получает команду на выполнение процедуры FIM с указанием опорного ВС и требуемого интервала и путем изменения скорости выполняет эшелонирование самостоятельно, снижая тем самым нагрузку на диспетчеров и пилотов и обеспечивая требования по безопасности.

Основу процедуры FIM составляет алгоритм управления скоростью ВС. В перспективе, при переходе к концепции free flight, процедуру нужно будет расширить. Трудности возникают в том случае, когда ВС даже при минимальной возможной скорости движения не может обеспечить нормы продольного эшелонирования на плановой траектории, в этом случае для решения задачи необходимо сгенерировать реализуемую траекторию большей длины, что особенно сложно в гористой местности. В докладе приводится методика расчета требуемой длины траектории, а также алгоритм функционирования перспективной расширенной бортовой процедуры FIM для управления траекторией и скоростью предпосадочного маневрирования в условиях сложного рельефа местности.

## 2. Расчет требуемой длины траектории, обеспечивающей продольное эшелонирование от опорного ВС

В работе [3] рассматривалась задача управления скоростью вдоль траектории для выполнения норм продольного эшелонирования ВС. Однако обеспечить это только за счет управления скоростью не всегда возможно. В случае, когда

$$L > \int_0^T v(t) dt,$$

где  $L$  – длина траектории,  $v(t)$  – скорость ВС вдоль траектории,  $t \in [0, T]$  при соблюдении начальных условий:

$$v(0) = v_0, v(T) = v_k$$

и ограничений:

$$v_{min} \leq v(t) \leq v_{max}, a_{min} \leq \dot{v}(t) \leq a_{max} \quad \forall t: 0 \leq t \leq T$$

решения задачи не существует.

В этом случае необходимо расширить бортовую процедуру FIM, дополнив ее генерацией траектории заданной длины [4], для которой будет существовать решение задачи выполнения норм продольного эшелонирования.

Расчет необходимой длины траектории выполняется на основе модификации алгоритма управления скоростью ВС, представленного в [3].

Для определенности будем рассматривать случай  $v_0 \geq v_k$ , случай  $v_0 < v_k$  полностью аналогичен.

Рассмотрим представленные на рисунках две граничные функции скорости.

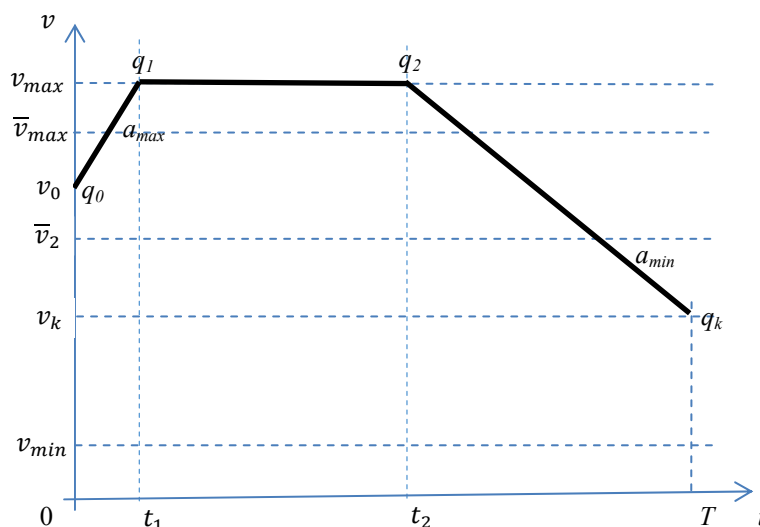


Рис. 1. График максимальной скорости движения вдоль траектории.

Представленная на рис. 1 функция скорости  $[q_0, q_1, q_2, q_k]$  определяет максимальную среднюю скорость  $\bar{v}_{max}$ , удовлетворяющую ограничениям и граничным условиям:

$$\bar{v}_{max} = v_{max} - \frac{1}{2T} \left[ \frac{(v_0 - v_{max})^2}{a_{max}} - \frac{(v_{max} - v_k)^2}{a_{min}} \right].$$

При известном времени движения  $T$  и известной скорости  $\bar{v}_{max}$  можно рассчитать максимальную длину траектории  $L_{max} = \bar{v}_{max}T$ , при которой возможно выполнения норм эшелонирования в условиях сложного рельефа местности при помощи управления скоростью.

Представленная на рис. 2 функция скорости  $[q_0, q_3, q_4, q_k]$  определяет минимальную среднюю скорость  $\bar{v}_{min}$ , удовлетворяющую ограничениям и граничным условиям:

$$\bar{v}_{min} = v_{min} + \frac{1}{2T} \left[ \frac{(v_k - v_{min})^2}{a_{max}} - \frac{(v_{min} - v_0)^2}{a_{min}} \right].$$

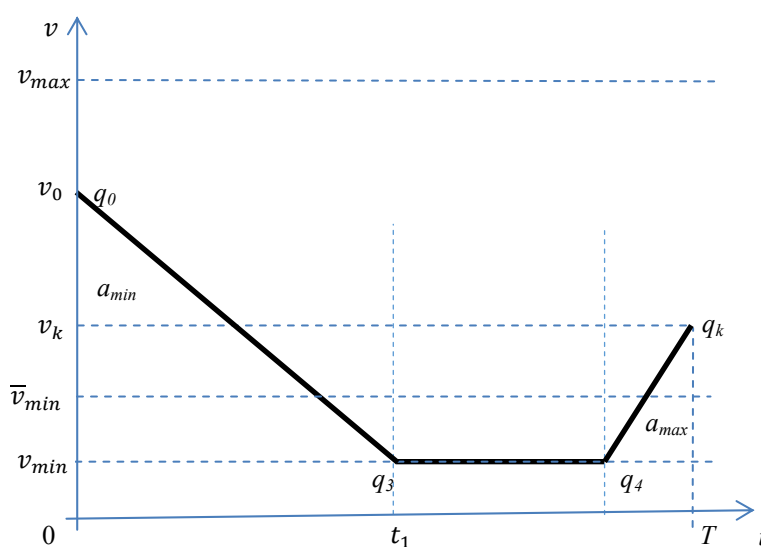


Рис. 2. График минимальной скорости движения вдоль траектории.

При известном времени движения  $T$  и известной скорости  $\bar{v}_{min}$  можно рассчитать минимальную длину траектории  $L_{min} = \bar{v}_{min}T$ , при которой возможно выполнение норм эшелонирования в условиях сложного рельефа местности при помощи управления скоростью.

Таким образом, прибытие в заданную точку синхронизации в заданное время на основе управления скоростью движения возможно только в том случае, если длина траектории удовлетворяет условию:  $\bar{v}_{min}T < L < \bar{v}_{max}T$ .

Однако при расчете длины траектории с целью выполнения норм эшелонирования на основе управления скоростью движения целесообразно более жестко ограничить длину траектории. Например, рассчитывать длину траектории, введя дополнительное ограничение на скорость движения:  $v_k \leq v \leq v_0$ .

Представленная на рис. 3 функция скорости  $[q_0, q_5, q_k]$  определяет максимальную среднюю скорость  $\bar{v}_2$ , удовлетворяющую дополнительному ограничению:

$$\bar{v}_2 = v_0 - \frac{(v_k - v_0)^2}{2Ta_{max}}$$

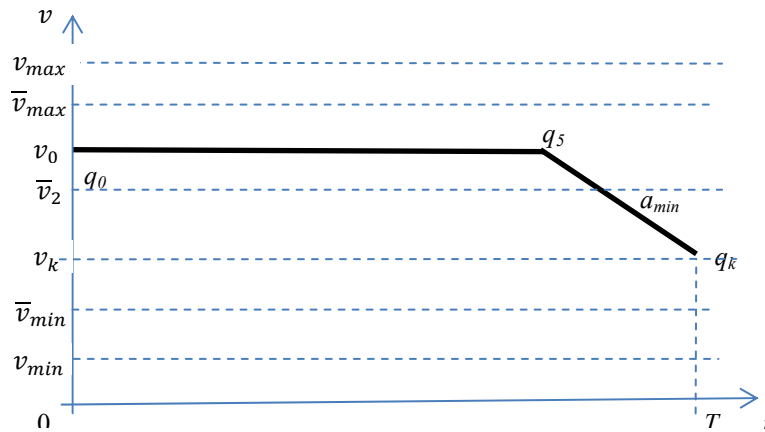


Рис. 3. График максимальной скорости при дополнительном ограничении.

Представленная на рис. 4 функция скорости  $[q_0, q_6, q_k]$  определяет минимальную среднюю скорость  $\bar{v}_1$ , удовлетворяющую дополнительному ограничению:

$$\bar{v}_1 = v_k - \frac{(v_k - v_0)^2}{2Ta_{\min}}$$

Таким образом, для обеспечения прибытия в заданную точку синхронизации через заданный интервал времени  $T$  на основе управления скоростью движения, целесообразно сгенерировать траекторию, длина которой удовлетворяет условию:

$$\bar{v}_1 T \leq L \leq \bar{v}_2 T.$$

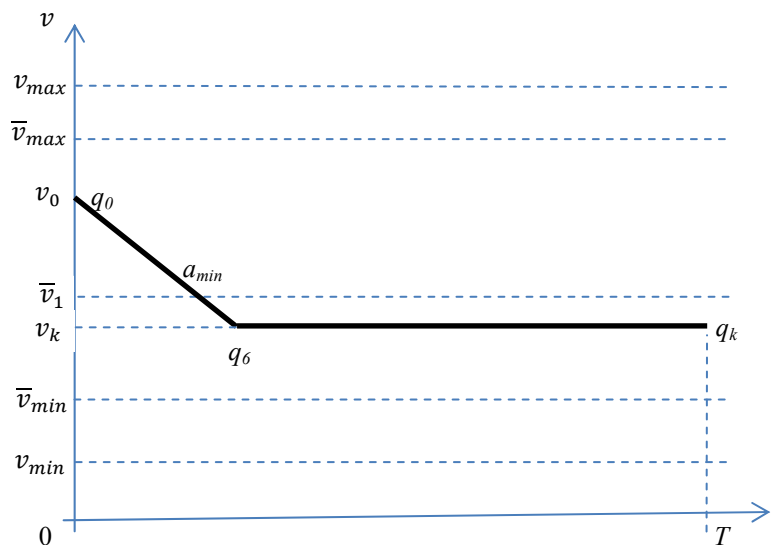


Рис. 4. График минимальной скорости при дополнительном ограничении.

### 3. Алгоритм функционирования перспективной расширенной бортовой процедуры FIM в условиях сложного рельефа местности

Алгоритм состоит из шагов, основанных на использовании алгоритмов, которые были разработаны и опубликованы ранее, приводятся соответствующие ссылки.

**Шаг 1.** Генерация множества кратчайших траекторий облета препятствий рельефа на различных высотах при заходе в заданную точку стандартного маршрута прибытия [5].

**Шаг 2.** Применение алгоритма управления скоростью вдоль каждой из сгенерированных траекторий [3]. Если за счет управления скоростью хотя бы на одной из построенных (кратчайших) траекторий возможно обеспечить нужное время пролета заданной точки воздушного пространства, то перейти к *шагу 5*. В противном случае перейти к следующему шагу.

**Шаг 3.** Расчет длины траектории, необходимой для выполнения норм эшелонирования в условиях сложного рельефа местности при помощи управления скоростью, как предложено в разделе 2.

**Шаг 4.** Генерация набора траекторий рассчитанной длины. Для того чтобы решить задачу синхронизации с впереди идущим ВС необходимо сгенерировать траектории полета рассчитанной длины при помощи алгоритма генерации траектории заданной длины, описанного в [4] и затем применить алгоритм управления скоростью вдоль каждой из сгенерированных траекторий.

**Шаг 5.** Проверка реализуемости построенных траекторий при рассчитанных скоростях движения по ним с помощью виртуальных полетов на основе математического моделирования [6,7].

## 6. Заключение

Работа завершает цикл работ по разработке алгоритмов, необходимых для автоматизации предпосадочного маневрирования с целью выполнения норм продольного эшелонирования в условиях гористой местности.

## Список литературы

1. RTCA DO-328A Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for Airborne Spacing – Flight Deck Interval Management (ASPA-FIM), September 22, 2015.
2. Paul A. Van Tulder, Flight Deck Interval Management Flight Test Final Report, NASA/CR-2017-219626, Seattle, Washington, June 2017. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20170007242>.
3. Баженов С.Г., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Управление траекторией и скоростью самолета при заходе на посадку в условиях пересеченной местности // Проблемы управления. 2015. № 2. С. 45-51.
4. Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Генерация траекторий заданной длины при предпосадочном маневрировании воздушного судна в условиях сложного рельефа местности // Проблемы управления. 2017. № 4. С. 59-64.
5. Кулида Е.Л. Формирование безопасных траекторий полета на малых высотах в условиях сложного рельефа местности // Материалы Пятой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2011). С. 143-152.
6. Алешин Б.С., Баженов С.Г., Лебедев В.Г., Кулида Е.Л. Оценка реализуемости и безопасности траекторий самолета с помощью бортовой математической модели // Проблемы управления. 2013. № 4. С. 64-71.
7. Алешин Б.С., Баженов С.Г., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Прототип системы обеспечения траекторной безопасности полета // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 3351–3361.