



УПРАВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЕЙ И СКОРОСТЬЮ САМОЛЕТА ПРИ ЗАХОДЕ НА ПОСАДКУ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ

С.Г. Баженов, Н.А. Егоров, Е.Л. Кулида, В.Г. Лебедев

Представлен алгоритм генерации набора бесконфликтных траекторий облета препятствий рельефа из произвольного начального положения в заданную точку синхронизации с впереди идущим воздушным судном. Приведен алгоритм расчета скорости движения вдоль сгенерированных траекторий, позволяющий обеспечить в точке синхронизации выполнение заданных норм продольного эшелонирования.

Ключевые слова: безопасность полета, рельеф местности, бесконфликтная траектория, точка синхронизации полетов, продольное эшелонирование.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно прогнозам ведущих авиаперевозчиков, к 2025 г. ожидается увеличение интенсивности воздушного движения в мире примерно в 2—3 раза. В связи с этим разрабатывается новая технология организации воздушного движения, которая позволит пилотам и диспетчерам видеть одну и ту же картину происходящего, улучшит взаимопонимание между всеми участниками движения, повысит тем самым безопасность и гибкость управления воздушным движением. В перспективе, при переходе к концепции «Free Flight», бортовые системы будут играть основную роль в планировании полета и обеспечении траекторной безопасности.

Разработка перспективных бортовых систем мониторинга летной ситуации и обеспечения траекторной безопасности полета позволит повысить автономность воздушных судов (ВС), передать значительную часть функций по планированию полета, оперативной коррекции плана полета и разрешения потенциальных конфликтов бортовым системам.

В рамках реализации прототипа системы траекторной безопасности полета [1] разрабатываются алгоритмы генерации траекторий предпосадочного маневрирования с учетом увязки планов полета различных ВС для обеспечения безопасного временного интервала от впереди идущего ВС в промежуточных точках маршрута в условиях сложного рельефа местности.

Задача решается в три этапа:

- генерация набора траекторий облета препятствий рельефа;
- управление скоростью на сгенерированных траекториях для синхронизации по времени с впереди идущим ВС;
- оценка реализуемости и безопасности траекторий и их ранжирование на основе выполнения виртуальных полетов с помощью бортовой математической модели движения самолета.

Исходной информацией для алгоритма генерации траекторий служит трехмерная карта рельефа местности.

1. АЛГОРИТМ ГЕНЕРАЦИИ ТРАЕКТОРИЙ ОБЛЕТА ПРЕПЯТСТВИЙ РЕЛЬЕФА

В работах [2, 3] решена задача формирования набора траекторий предпосадочного маневрирования с учетом рельефа местности из произвольного начального положения (заданы координаты самолета в пространстве и вектор скорости движения) в точки стандартной схемы посадки (STAR — Standard Terminal Arrival Route).

В настоящей работе представлен алгоритм генерации набора траекторий облета препятствий рельефа из заданного начального положения в заданную точку синхронизации с впереди идущим ВС.

Шаг 1. Выбирается прямоугольный участок рельефа для построения траекторий в соответствии с положением самолета (начальная точка генериру-

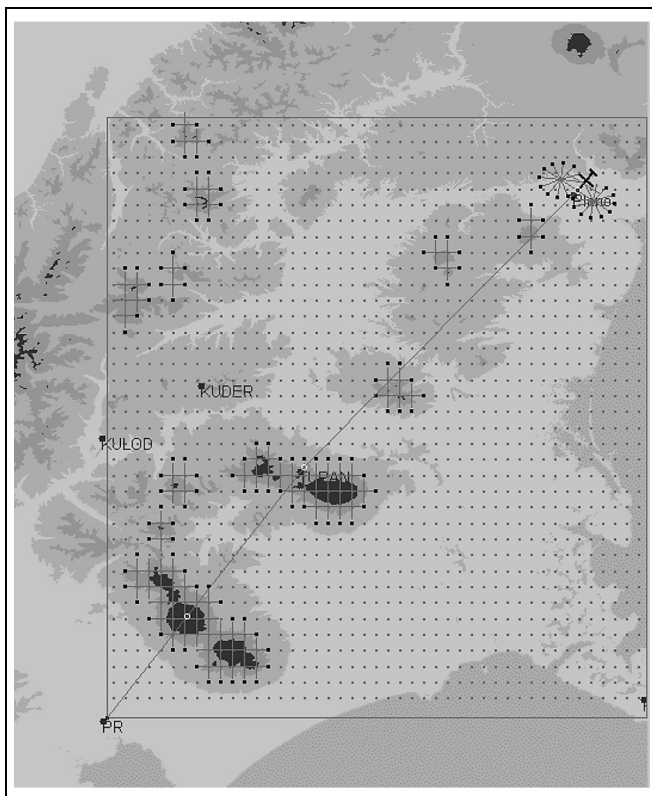


Рис. 1. Зоны, запрещенные для полетов на высоте 1500 м, и вершины на границе этих зон

емых траекторий) и заданной точкой синхронизации (конечная точка генерируемых траекторий) и составляется матрица значений высот выделенного участка рельефа.

Шаг 2. Облет препятствий рельефа реализуется в плоскости на некоторой фиксированной высоте $H_{\max}$. Выбирается высота облета препятствий рельефа, равная текущей высоте полета самолета $H_{\max} = H_{pl}$.

Шаг 3. Анализируется рельеф под траекторией по прямой (или по заданному плану полета) при высоте облета препятствий рельефа $H_{\max}$. Если обнаруживается возможность столкновения с рельефом, то переход к следующему шагу, в противном случае переход к шагу 10.

Шаг 4. Для построения границ запретных зон строится равномерная сетка вершин в выбранном прямоугольном участке с заданным шагом по широте и долготе. При фиксированной высоте облета препятствия $H_{\max}$ вершины подразделяются на два типа:

— вершины, высота которых меньше $H_{\max} - \Delta h$, где Δh — безопасное расстояние до рельефа при полете;

— вершины, высота в которых больше или равна $H_{\max} - \Delta h$.

Формируются зоны, запрещенные для полетов на высоте $H_{\max}$. Затем определяются граничные вершины, т. е. вершины, у которых среди восьми соседних вершин есть как вершины первого, так и вершины второго типа.

На рис. 1 выделен прямоугольный участок рельефа в районе аэропорта Елизово, выделенные темным цветом участки имеют высоту больше 1500 м. Построена равномерная сетка вершин, черными точками обозначены граничные вершины зон, недопустимых для полета на высоте 1500 м. Видно, что траектория полета по точкам заданного плана полета при высоте полета 1500 м привела бы к столкновению с рельефом на четырех участках, поэтому для данного примера необходимо генерировать траектории облета препятствий.

Шаг 5. Строится граф, пути которого соответствуют траекториям облета препятствий. Во множество вершин графа включаются граничные вершины, построенные на шаге 4, конечная и начальная точки. Множество ребер графа содержит все ребра между видимыми вершинами. Вершины называются видимыми, если отрезок, их соединяющий, не пересекает запретных зон, построенных на шаге 4. Помимо препятствий рельефа выделяются также круговые зоны, полету в которых препятствуют маневренные возможности самолета.

Шаг 6. К построенному графу применяется алгоритм Дейкстры, который позволяет рассчитать длины кратчайших путей из начальной вершины во все остальные вершины построенного графа.

Шаг 7. На основе рассчитанных на предыдущем шаге значений строится кратчайший путь из начальной точки в конечную (рис. 2).

Шаг 8. Из рис. 2 видно, что кратчайший путь в графе представляет собой ломаную линию. Для построения траектории полета эта ломаная скругляется в точках изгиба, минимальный радиус R разворота зависит от скорости самолета V : $R = V^2 / g \tan \gamma_{\max}$, где g — ускорение свободного падения, $\gamma_{\max}$ — максимальный допустимый угол крена.

После скругления траектория дополнительно проверяется на столкновения с рельефом и при необходимости корректируется высота полета, затем траектория добавляется в список сгенерированных траекторий.

Шаг 9. Выбранная высота облета препятствий рельефа увеличивается на заданный размер шага $H_{\max} = H_{\max} + h$. Переход к шагу 3.

Шаг 10. Строится траектория полета по прямой (или по плану полета) с облетом препятствий ре-

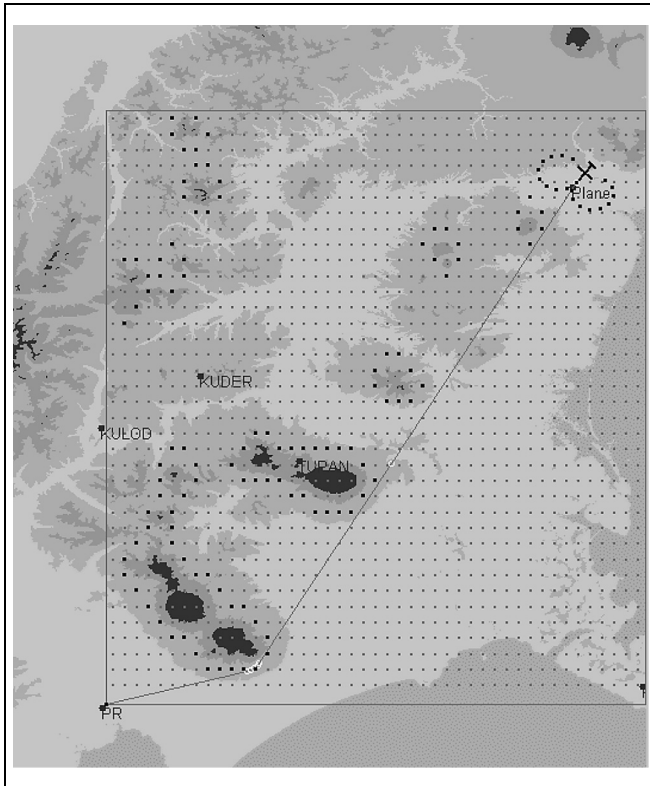


Рис. 2. Кратчайший путь в графе

льефа путем набора высоты. Для этого вдоль траектории ищется точка с максимальной высотой рельефа $R_{\max}$. Траектория предполагает полет по прямой (или по плану полета) с равномерным увеличением высоты от начальной H_{pl} до $H_{\max}$ в найденной точке, и затем равномерное снижение высоты до H_{pl} к конечной точке (рис. 3). На рис. 3 внизу представлен график высоты полета над графиком высоты рельефа. Траектория дополнительно проверяется на столкновения с рельефом и при необходимости корректируется, затем добавляется в список сгенерированных траекторий. *Конец алгоритма.*

В результате применения алгоритма генерируется набор траекторий облета препятствий. Число сгенерированных траекторий определяется высотой рельефа, первоначальной высотой H_{pl} полета и заданным параметром h — шагом увеличения максимальной высоты облета препятствия. При фиксированной высоте $H_{\max}$ облета препятствия генерируется кратчайшая бесконфликтная траектория, гарантирующая облет препятствий рельефа.

На рис. 4 представлен сгенерированный набор траекторий полета в заданную точку синхронизации «PR» при начальной высоте полета

$H_{pl} = 1500$ м, шаг увеличения высоты полета $h = 500$ м, максимальная высота рельефа вдоль траектории $R_{\max} \sim 3000$ м. Построено пять траекторий с максимальным подъемом вдоль траектории до высоты $H_{\max} = \{1500, 2000, 2500, 3000, 3500\}$ м со-

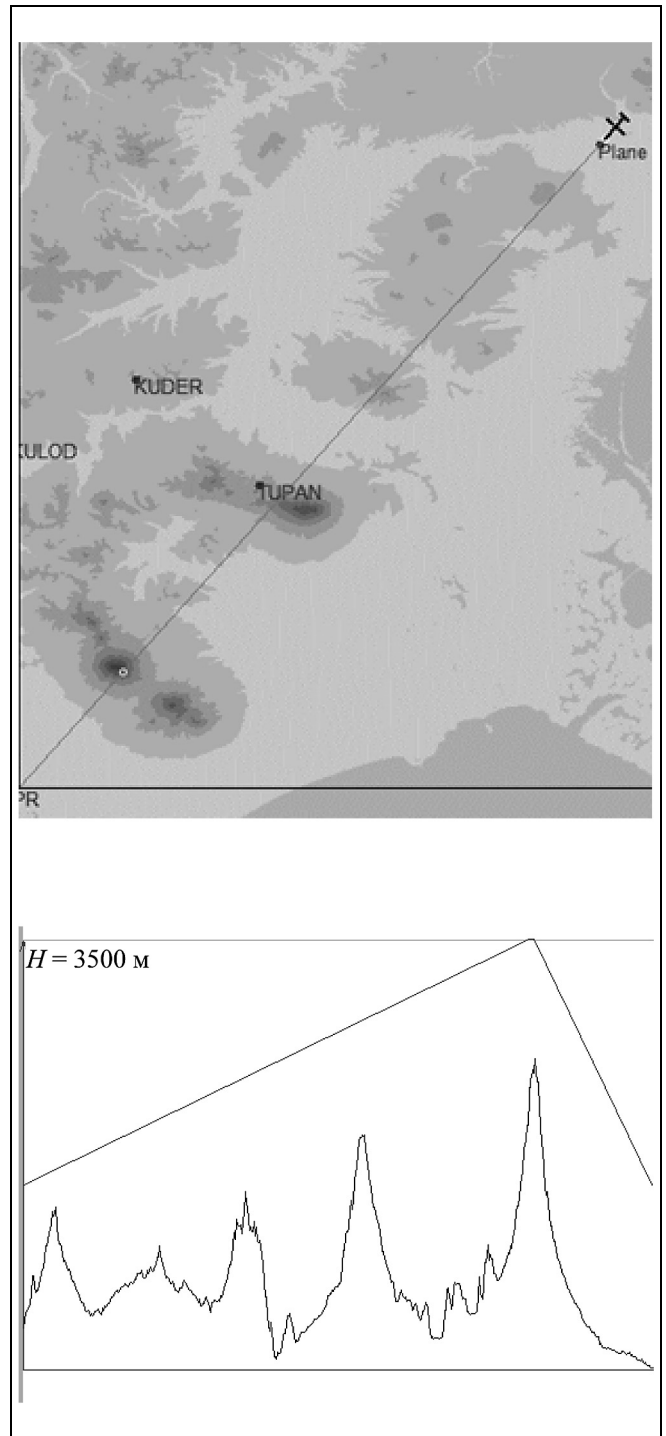


Рис. 3. Траектория полета по прямой

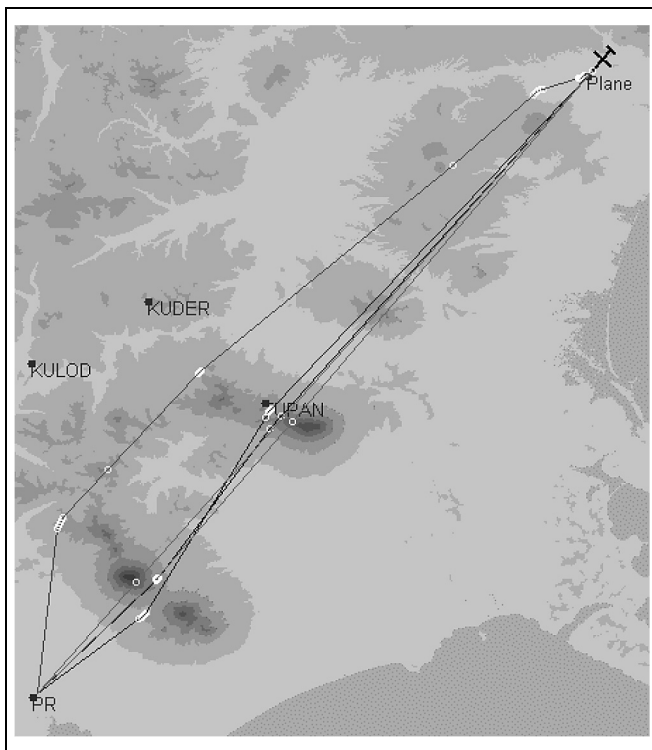


Рис. 4. Пять траекторий полета в заданную точку синхронизации PR

ответственно. Реализуемость построенных траекторий проверяется при выполнении виртуальных полетов с помощью математической модели [4, 5].

2. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ

Для обеспечения продольного эшелонирования (выдерживания временного интервала не меньшего заданного Δt в контрольной точке маршрута между опорным ВС и своим ВС) требуется некоторым образом варьировать скорость своего ВС.

Задача управления скоростью вдоль заданной траектории длины L ставится следующим образом: для заданной траектории длины L и заданного времени движения T найти такую функцию изменения скорости $v(t)$, что

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

удовлетворяющую граничным условиям $v(0) = v_0$, $v(T) = v_k$; и ограничениям $v_{\min} \leq v(t) \leq v_{\max}$, $a_{\min} \leq \dot{v}(t) \leq a_{\max} \forall t: 0 \leq t \leq T$.

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

Решение $v(t)$ ищется в виде кусочно-линейной трехинтервальной функции, проходящей через точки $\{(0, v_0), (t_1, v_x), (t_2, v_x), (T, v_k)\}$:

первый интервал — равноускоренное движение: $\dot{v}(t) = \text{const}$; $a_{\min} \leq \dot{v}(t) \leq a_{\max}$ от начальной точки $(0, v_0)$ до точки пересечения функции $v(t)$ с прямой $v = v_x$ в момент времени $t = t_1$, $v_{\min} \leq v_x \leq v_{\max}$;

второй интервал — равномерное движение: $\dot{v}(t) = 0$; $v(t) = v_x$, $t \in [t_1, t_2]$;

третий интервал — равноускоренное движение: $\dot{v}(t) = \text{const}$; $a_{\min} \leq \dot{v}(t) \leq a_{\max}$ до точки (T, v_k) .

Любой из этих интервалов может быть нулевой длины.

Для построения функции $v(t)$ нужно найти две точки: $\{(t_1, v_x), (t_2, v_x)\}$.

Вычисление значений t_1 , t_2 и v_x различается при разных значениях средней скорости $\bar{v} = L/T$. Имеется пять непересекающихся подобластей значений $\bar{v}$: $\{(-\infty, \bar{v}_{\min}), [\bar{v}_{\min}, \bar{v}_1], [\bar{v}_1, \bar{v}_2], (\bar{v}_2, \bar{v}_{\max}], (\bar{v}_{\max}, \infty)\}$, в которых значения t_1 , t_2 и v_x вычисляются по-разному либо решения задачи не существует.

Для определения этих подобластей рассмотрим представленные на рис. 5 четыре граничные функции скорости, на основе которых вычисляются значения $\bar{v}_{\min}$, $\bar{v}_1$, $\bar{v}_2$ и $\bar{v}_{\max}$.

- Функция скорости $[q_0, q_5, q_6, q_k]$ позволяет пройти заданную траекторию за максимальное время. Она определяет минимальную среднюю скорость $\bar{v}_{\min}$, удовлетворяющую ограничениям и граничным условиям:

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

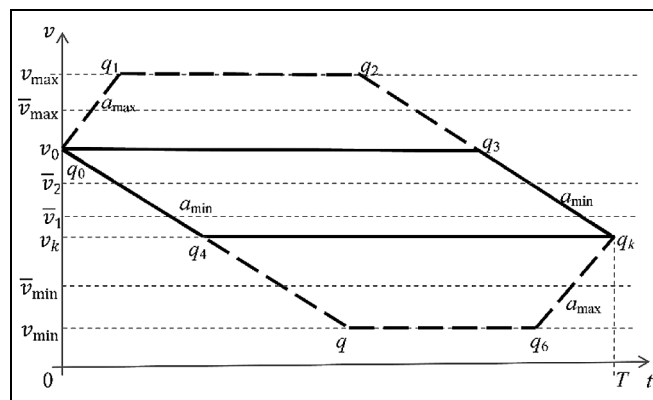


Рис. 5. Графики скоростей

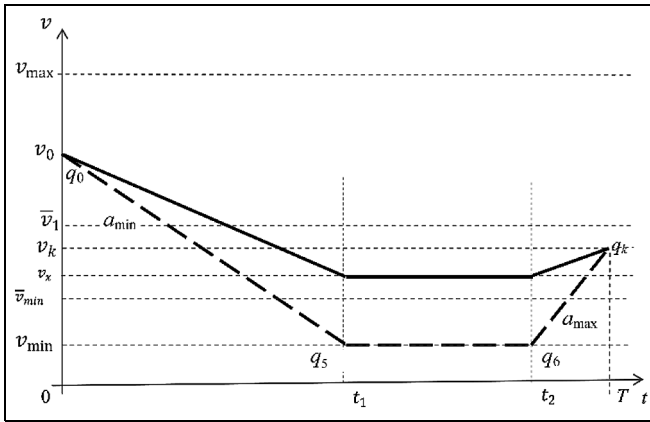


Рис. 6. График скорости для случая 2

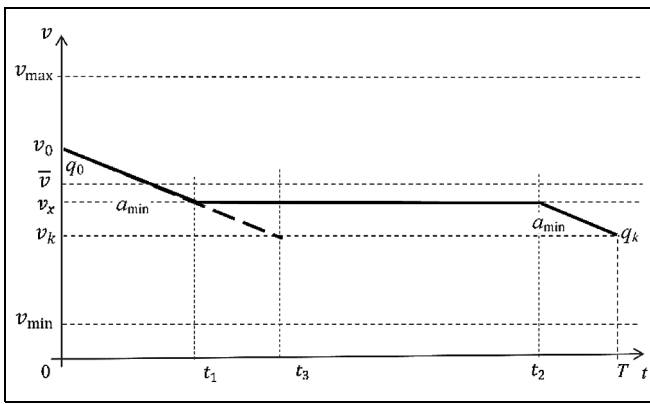


Рис. 7. График скорости для случая 3

- Функция скорости $[q_0, q_4, q_k]$ соответствует средней скорости

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

- Функция скорости $[q_0, q_3, q_k]$ соответствует средней скорости

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

- Функция скорости $[q_0, q_1, q_2, q_k]$ позволяет пройти заданную траекторию за минимальное время. Эта функция определяет максимальную среднюю скорость $\bar{v}_{\max}$, удовлетворяющую ограничениям и граничным условиям:

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

Рассмотрим теперь пять непересекающихся подобластей значений $\bar{v}$.

1. Подобласть $\bar{v} \in (-\infty, \bar{v}_{\max}]$. Очевидно, что в этом случае при соблюдении ограничений $\forall v(t)$

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

т. е. решений нет. Для решения задачи необходимо выбрать траекторию большей длины.

2. Подобласть $\bar{v} \in (\bar{v}_{\min}, \bar{v}_1]$. В этом случае функция скорости $v(t)$, являющаяся решением задачи, имеет вид, представленный сплошной линией на рис. 6. Значение v_x определяется по формуле

$$v_x = \frac{2L - v_0 t_1 - v_k (T - t_2)}{T + t_2 - t_1},$$

где $t_1 = \frac{v_{\min} - v_0}{a_{\min}}$, $t_2 = T + \frac{v_{\min} - v_k}{a_{\max}}$.

3. Подобласть $\bar{v} \in [\bar{v}_1, \bar{v}_2]$. В этом случае функция скорости $v(t)$, являющаяся решением задачи, имеет вид, представленный сплошной линией на рис. 7. Значение v_x определяется по формуле

$$v_x = \frac{2L - (v_0 + v_k)t_3}{T - t_3},$$

где $t_3 = \frac{v_k - v_0}{a_{\min}}$; $t_1 = \frac{v_x - v_0}{a_{\min}}$, $t_2 = T + \frac{v_x - v_k}{a_{\min}}$.

4. Подобласть $\bar{v} \in (\bar{v}_2, \bar{v}_{\max}]$. Функция скорости $v(t)$, являющаяся решением задачи, имеет вид, представленный сплошной линией на рис. 8.

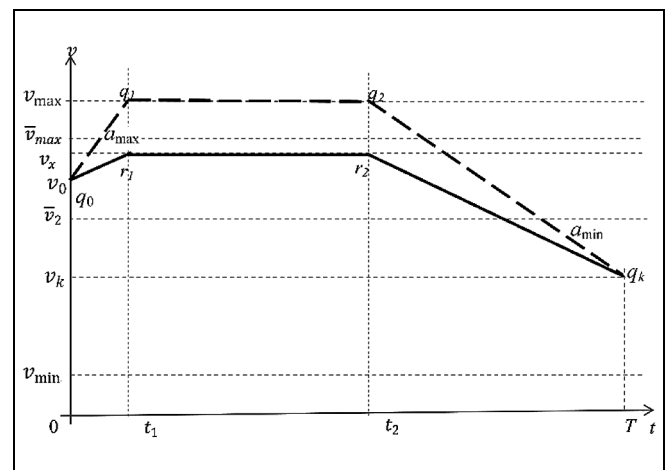


Рис. 8. График скорости для случая 4

Значение v_x определяется по формуле

$$v_x = \frac{2L - v_0 t_1 - v_k(T - t_2)}{T + t_2 - t_1},$$

где $t_1 = \frac{v_{\max} - v_0}{a_{\max}}$, $t_2 = T + \frac{v_{\max} - v_k}{a_{\max}}$.

В случаях 2–4 по построению очевидно, что функция $v(t)$ удовлетворяет начальным условиям и ограничениям. Кроме того,

$$\begin{aligned} \int_0^T v(t) dt &= \int_0^{t_1} v(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt + \int_{t_2}^T v(t) dt = \\ &= \frac{v_0 + v_x}{2} t_1 + v_x(t_2 - t_1) + \frac{v_x + v_k}{2} (T - t_2) = \\ &= v_x \frac{T + t_2 - t_1}{2} + \frac{v_0 t_1 + v_k(T - t_2)}{2} = L. \end{aligned}$$

Таким образом, функция $v(t)$ является решением задачи.

5. Подобласть $\bar{v} \in (\bar{v}_{\max}, \infty)$. При соблюдении начальных условий и заданных ограничений $\forall v(t)$

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

и, таким образом, решения задачи не существует.

3. ПРОТОТИП СИСТЕМЫ ТРАЕКТОРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА

Разработанные алгоритмы реализованы в рамках прототипа системы обеспечения траекторной безопасности полета [1], который позволяет:

- моделировать летную ситуацию, формировать информацию об окружающих ВС и указаниях диспетчера по выполнению эшелонирования;

- генерировать набор траекторий полета, обеспечивающих безопасный обход естественных препятствий;

- рассчитывать скорости движения по сгенерированным траекториям для реализации заданной нормы продольного эшелонирования от впереди идущего ВС с учетом ограничений на скорость и ускорение;

- оценивать реализуемость и безопасность траекторий и ранжировать их на основе виртуальных полетов вдоль сгенерированных траекторий с рассчитанными с помощью бортовой математической модели скоростями [4, 5].

На рис. 9 представлены результаты генерации траекторий и управления скоростью. В верхней части рисунка представлена сгенерированная траектория на фоне рельефа местности при высоте облета препятствия, равной 2000 м. Под ней — график высоты полета вдоль траектории и график высоты рельефа под траекторией. На графике отмечена максимальная высота траектории H . Внизу — график путевой скорости вдоль траектории, обеспечивающей выполнение заданных норм продольно-

ектория на фоне рельефа местности при высоте облета препятствия, равной 2000 м. Под ней — график высоты полета вдоль траектории и график высоты рельефа под траекторией. На графике отмечена максимальная высота траектории H . Внизу — график путевой скорости вдоль траектории, обеспечивающей выполнение заданных норм продольно-

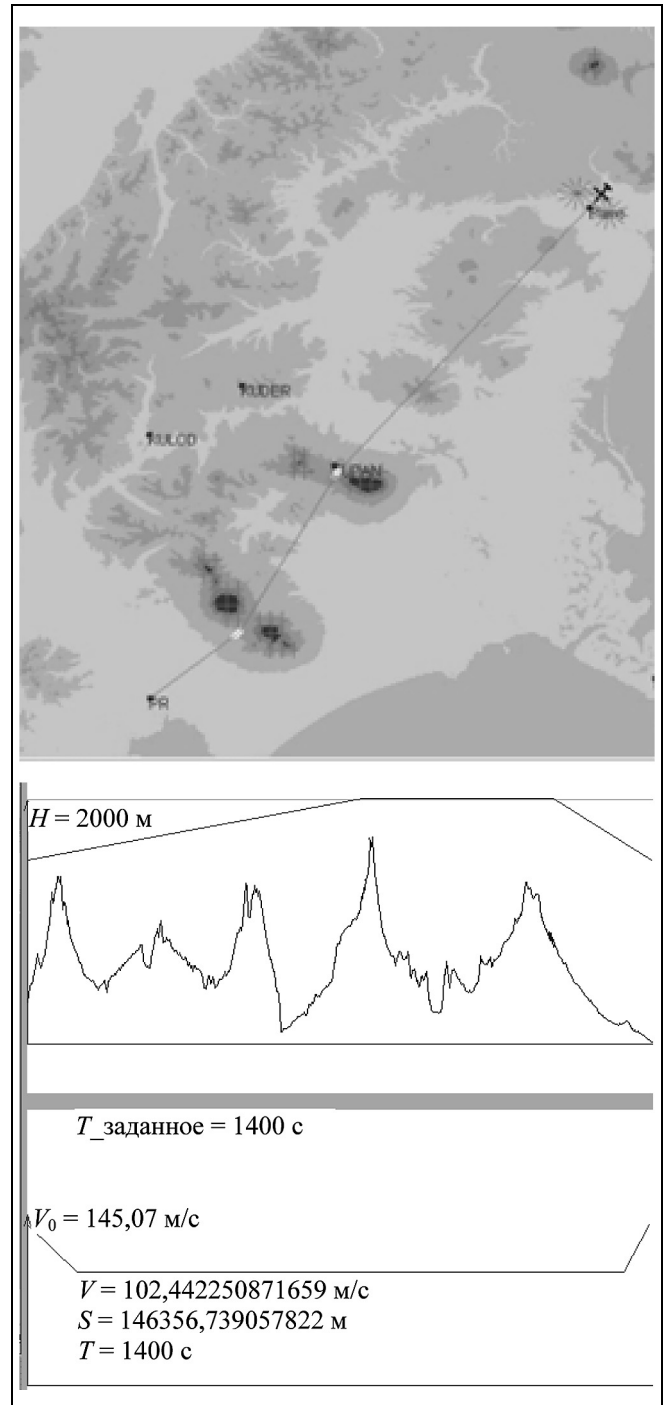


Рис. 9. Результат моделирования траектории и скорости полета



го эшелонирования. На графике отображено заданное время полета $T_{\text{заданное}}$, скорость V_0 полета в начальной точке, рассчитанная скорость полета $V = v_x$, длина траектории S , рассчитанное время полета T .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика генерации бесконфликтных траекторий и применения бортовой математической модели в составе интегрированной системы обеспечения траекторной безопасности полета [6], которая позволяет:

- оценить летную ситуацию при маневрировании на малых высотах в аспекте возможных столкновений с поверхностью земли и сформировать набор траекторий облета препятствий рельефа;
- рассчитать скорость движения вдоль траектории для синхронизации плана полета с впереди идущим воздушным судном в контрольной точке;
- проверить реализуемость сформированных траекторий;
- выполнить виртуальные полеты по сгенерированным траекториям;
- отсортировать траектории в соответствии с выбранной системой приоритетов;
- лучшую из реализуемых траекторий рекомендовать экипажу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин Б.С., Баженов С.Г., Лебедев В.Г., Кулида Е.Л. Прототип системы обеспечения траекторной безопасности полета // XII Всеросс. совещание по проблемам управления ВСПУ—2014 / ИПУ РАН. — М., 2014. — С. 3351—3361.

2. Кулида Е.Л. Формирование безопасных траекторий полета на малых высотах в условиях сложного рельефа местности // Материалы пятой междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2011 / ИПУ РАН. — М., 2011. — С. 143—152.
3. Баженов С.Г., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Формирование бесконфликтных траекторий предпосадочного маневрирования с учетом ограничений на маневренные возможности самолета // Проблемы управления. — 2012. — № 2. — С. 70—75.
4. Алешин Б.С., Баженов С.Г., Лебедев В.Г., Кулида Е.Л. Использование бортовой математической модели для оценки реализуемости и безопасности траекторий самолета // Проблемы управления. — 2013. — № 4. — С. 64—71.
5. Алешин Б.С., Баженов С.Г., Лебедев В.Г., Кулида Е.Л. Обеспечение траекторной безопасности магистрального самолета с использованием бортовой математической модели // Материалы Всеросс. науч.-техн. конф. «Моделирование авиационных систем» / Москва, ГосНИИАС. — М., — 2013. — С. 3—4.
6. Алешин Б.С., Баженов С.Г., Лебедев В.Г., Кулида Е.Л. Использование параллельных процессов для оценки реализуемости и безопасности траекторий магистрального самолета с помощью его бортовой математической модели в интегрированной системе обеспечения безопасности полета // Параллельные вычисления и задачи управления РАСО—2012. Шестая междунар. конф. / ИПУ РАН. — М., — 2012. — Т. 3. — С. 122—137.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Баженов Сергей Георгиевич — канд. техн. наук, нач. отдела, Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, ☎ (495) 556-31-04, ✉ flight15@tsagi.ru,

Егоров Николай Александрович — канд. техн. наук, вед. инженер, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, г. Москва, ☎ (495) 334-92-31, ✉ egorov@ipu.ru,

Кулида Елена Львовна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-92-49, ✉ lenak@ipu.ru,

Лебедев Валентин Григорьевич — д-р техн. наук, уч. секретарь, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-92-31, ✉ lebedev@ipu.ru,

Новая книга

Цыкунов А.М. Робастное управление объектами с последствием. — М.: Физматлит, 2014. — 264 с. — ISBN 978-5-9221-1576-6.

Рассмотрены задачи робастного управления для объектов, описываемых различными математическими моделями с последствием. Исследованы принципы построения систем управления для подобных объектов. Приведены результаты применения робастных систем управления для сингулярно-возмущенных объектов с последствием. Сформулированы критерии выбора параметров управления, обеспечивающие компенсацию возмущений с требуемой точностью.

Предложен принцип построения робастных систем управления для объектов с последствием, структура математических моделей которых неизвестна. Показана возможность компенсации неопределенностей, связанных со знаком высокочастотного коэффициента усиления. Результаты моделирования подкреплены числовыми примерами.

Для научных работников, инженеров, преподавателей, аспирантов и студентов, специализирующихся в области автоматического управления и прикладной математики.