

ФОРМИРОВАНИЕ БЕСКОНФЛИКТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ПРЕДПОСАДОЧНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА МАНЕВРЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ САМОЛЕТА

С.Г. Баженов, Е.Л. Кулида, В.Г. Лебедев

Разработаны принципы формирования траекторий безопасного захода на посадку для системы информационной поддержки экипажа самолета. Описана система, определяющая конфликтные ситуации, формирующая предупреждения и рекомендации пилотам, чтобы избежать опасного развития летной ситуации на этапе предпосадочного маневрирования и захода на посадку. Отмечено, что разработанный подход позволяет учесть ограничения на траекторию, маневренные характеристики самолета, возможности системы управления в условиях сложного рельефа местности.

Ключевые слова: безопасность, рельеф местности, CFIT, область режимов полета, ограничения на траекторию, система управления, рекомендуемая траектория.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность воздушного движения, как ожидается, возрастет в три раза в ближайшие 20 лет. При ныне существующих бортовых и наземных системах это может привести к росту авиационных происшествий в такой же или даже большей степени. Несмотря на то, что летные происшествия весьма редки, в общественном сознании рост их числа считается недопустимым, и должны быть найдены решения, чтобы уменьшить или, по крайней мере, не превысить текущий уровень летных происшествий. Поскольку безопасность полетов зависит в большой степени от действий экипажа, очень важно, чтобы члены экипажа были обеспечены надежной информацией. В странах, занимающих ведущее положение в авиастроении, разрабатываются средства обеспечения экипажа всеобъемлющей качественной информацией о погоде, воздушном движении и рельефе местности.

В центре внимания находятся, в частности, основные причины летных происшествий во всем мире, а именно: потеря управления, столкновение с землей и другими неподвижными препятствиями

при управляемом полете (CFIT — *controlled flight into terrain*), летные происшествия при заходе на посадку и посадке [1]. Последние катастрофы гражданских самолетов вследствие столкновения с поверхностью лишний раз подтвердили важность обеспечения безопасности полетов вблизи поверхности земли.

В качестве составной части интегрированной системы обеспечения безопасности полета нового поколения разрабатываются средства, повышающие осведомленность экипажа о рельефе местности и возможных препятствиях вдоль предполагаемого маршрута, и системы формирования рекомендаций, позволяющие экипажу избежать опасных ситуаций [2, 3]. Особое внимание уделяется трем основным факторам: плохим погодным условиям, воздушному движению и опасностям, связанным с рельефом местности. Для каждого из этих факторов разрабатываются системы, обеспечивающие лучшую осведомленность экипажа о летной ситуации, заблаговременное его предупреждение, формирование системы приоритетов, сигнализацию, улучшенный интерфейс «человек — машина» и в результате значительное снижение риска столкновения самолета с землей и препят-

Задача формирования кратчайшей траектории движения с обходом препятствий может быть решена на основе поиска кратчайшего пути в графе, например, с помощью известного алгоритма Дейкстры [4]. Для применения этого алгоритма необходимо построить граф, из множества путей которого выбирается искомая траектория.

Один из подходов заключается в построении графа в виде сетки: за вершины графа принимаются точки, равномерно расположенные в районе маневрирования (см. рис. 2). Множество вершин разбивается на *допустимые* вершины, через которые пролет возможен, и *недопустимые*, через которые пролет невозможен из-за рельефа местности (с учетом высоты полета H и минимального расстояния h от траектории до рельефа). Недопустимые вершины из рассмотрения исключаются. Будем называть *соседними* для вершины восемь вершин, расположенных вокруг нее. *Равномерной сеткой* назовем такой граф, вершины которого равномерно покрывают район движения, и все соседние вершины связаны ребрами.

Для того чтобы из пути, построенного на равномерной сетке и содержащего много изломов (см. рис. 2), получить искомую траекторию движения, необходимо применить алгоритмы сглаживания. Например, построить граф, вершинами которого являются все вершины, входящие в построенный путь, все пары вершин соединить ребрами, и в полученном графе построить кратчайший путь из начальной вершины в конечную. Однако полученное решение будет приближенным, поскольку вершины равномерной сетки могут не совпадать с точками изломов искомой кратчайшей траектории. Кроме того, в равномерной сетке содержится много «лишних» вершин и ребер, которые не нужны для построения искомой траектории, но увеличивают время вычислений при поиске кратчайшего пути.

Избежать этих недостатков позволяет другой алгоритм построения графа с учетом рельефа местности. Лежащая в его основе идея демонстрируется на рис. 3 и 4, где показаны начальная и конечная точки траектории и препятствия.

Утверждение 1. *Все точки излома кратчайшей траектории с обходом препятствий совпадают с точками излома границ препятствий.*

Доказательство этого утверждения может быть получено методом математической индукции по числу препятствий.

База индукции: в случае одного препятствия утверждение следует из того, что кратчайшим расстоянием между двумя точками является длина соединяющего эти точки отрезка прямой, и неравенства треугольника (см. рис. 3).

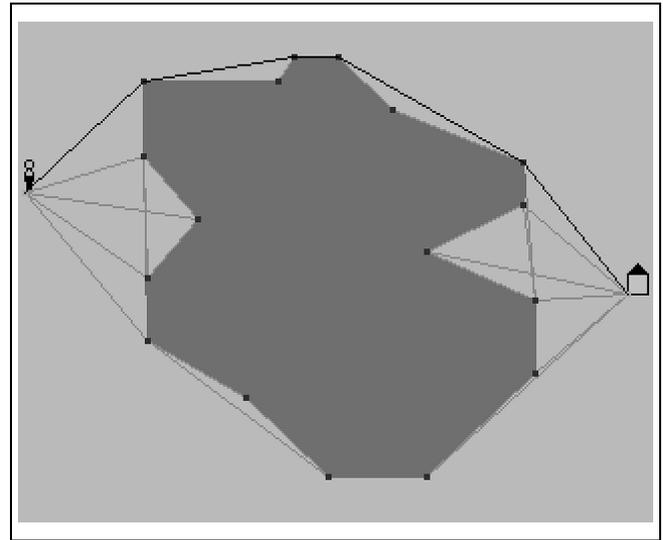


Рис. 3. Путь с обходом одного препятствия

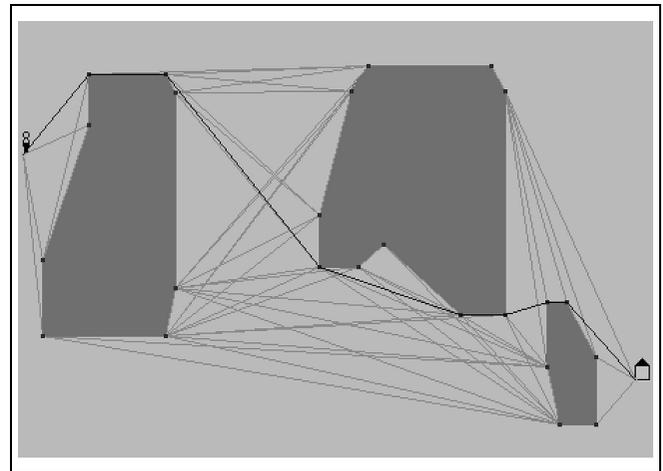


Рис. 4. Построение графа с учетом препятствий

Предположим, что утверждение справедливо, если препятствий меньше n (см. рис. 4).

Если появляется n -е препятствие, возможны два случая:

— кратчайшая траектория не имеет общих точек с границей нового препятствия, и утверждение выполняется по предположению индукции;

— кратчайшая траектория имеет общие точки с границей нового препятствия. В этом случае можно отдельно выделить участки траектории, имеющие общие точки с границей нового препятствия. Для других участков утверждение выполняется по индуктивному предположению. Для выделенных участков утверждение также выполняется и, следовательно, оно выполняется для всей кратчайшей траектории. ♦



Это утверждение позволяет существенно сократить число вершин графа, поскольку мы можем рассматривать граф, вершинами которого служат только точки излома границ препятствий, а также начальная и конечные точки траектории.

Две вершины графа назовем *видимыми* одна из другой, если отрезок, соединяющий эти вершины, не пересекает препятствия. Для определения, являются ли вершины видимыми одна из другой, проверяется, пересекается ли отрезок, соединяющий вершины, хотя бы с одним из отрезков границ препятствий.

Утверждение 2. Если множество вершин графа содержит точки излома границ препятствий, начальную и конечную точки, и все пары видимых вершин соединены ребрами, то кратчайшая траектория с обходом препятствий из начальной точки в конечную принадлежит множеству путей этого графа. ♦

Это утверждение следует из утверждения 1 и факта, что все пары видимых вершин соединены ребрами.

Из утверждения 2 следует, что кратчайший путь из начальной вершины в конечную в указанном графе является искомой кратчайшей траекторией с обходом препятствий.

3. АЛГОРИТМ ГЕНЕРАЦИИ ТРАЕКТОРИЙ

Шаг 1. Формирование кусочно-линейных границ препятствий. Строится равномерная сетка вершин. Расстояние между вершинами целесообразно выбрать не менее минимального радиуса разворота R , зависящего от скорости самолета V : $R = V^2 / g \gamma_{\max}$, где g — ускорение свободного падения, γ_{\max} — максимальный допустимый угол крена. Это позволит гарантировать возможность облета препятствия по границе.

Назовем вершину *граничной*, если среди ее соседних вершин есть как допустимые вершины, так и недопустимые. Соединив ребрами соседние граничные вершины, получим границы препятствий.

Шаг 2. Сглаживание границ препятствий. Границы препятствия, автоматически сформированные на шаге 1, могут содержать множество изломов. Для сглаживания границ можно воспользоваться алгоритмом поиска кратчайшего пути в графе. Рассмотрим граф, образованный всеми вершинами, сформированными на границе препятствия на шаге 1. Все пары видимых вершин в этом графе соединим ребрами. В полученном графе построим кратчайший путь для облета вокруг препятствия (рис. 5).



Рис. 5. Сглаживание границы вокруг препятствия

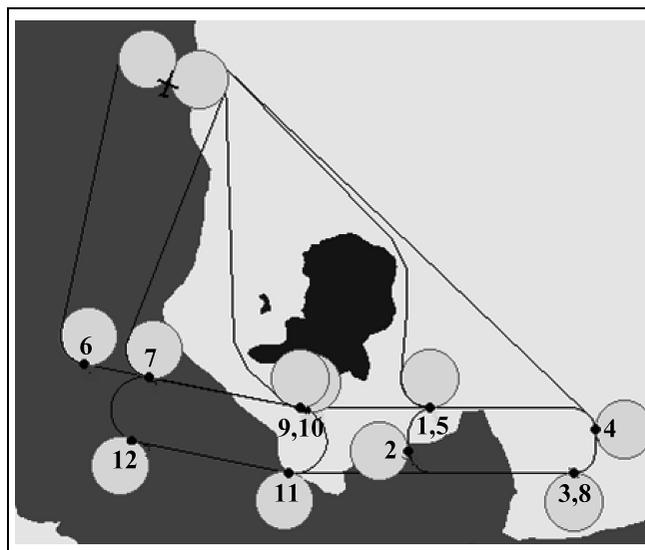


Рис. 6. Пример генерации траекторий

В множество вершин графа включим все точки изломов сглаженных границ вокруг препятствий, образованных рельефом.

Шаг 3. Учет дополнительных препятствий. Траектории (следовательно, дуги графа) не должны пересекать зону посадки.

Шаг 4. Учет маневренных возможностей самолета. При построении графа учитывается, что в начальной и конечной точках зона, недоступная для полета, представляется окружностями радиуса R , касающимися вектора направления движения (рис. 6). Для обеспечения выполнения разворота на нужный курс в начале и конце траектории в граф вводятся дополнительные вершины на этих окружностях в точках:

— касания окружности и касательных к ней, проведенных из вершин, лежащих на границах препятствий, если эти касательные не пересекают препятствий;

— касания общих касательных двух окружностей (в начале и конце траектории), если эти касательные не пересекают препятствий.

Шаг 5. Формирование ребер графа (см. рис. 4). Соединяются ребрами все пары видимых вершин.

В результате добавляются ребра, соединяющие:

- начальную вершину со всеми видимыми из нее вершинами;

- каждую из конечных вершин со всеми видимыми из нее вершинами;

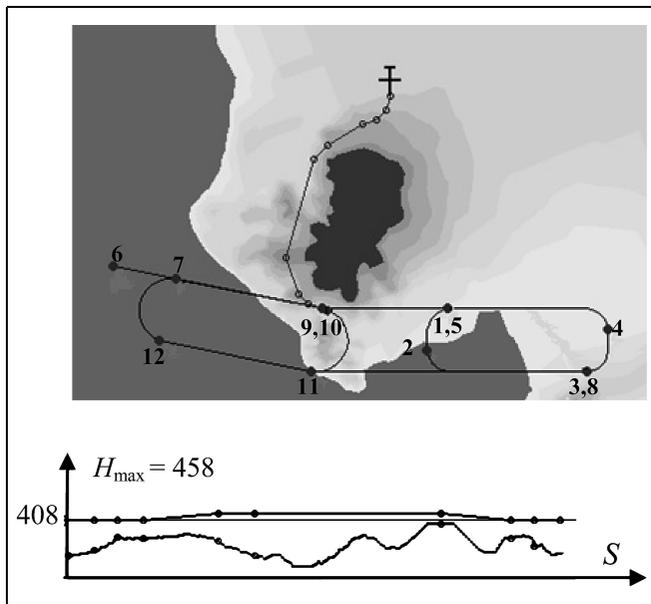


Рис. 7. Траектория и график высоты полета ($H_{\max} = 458$ м)

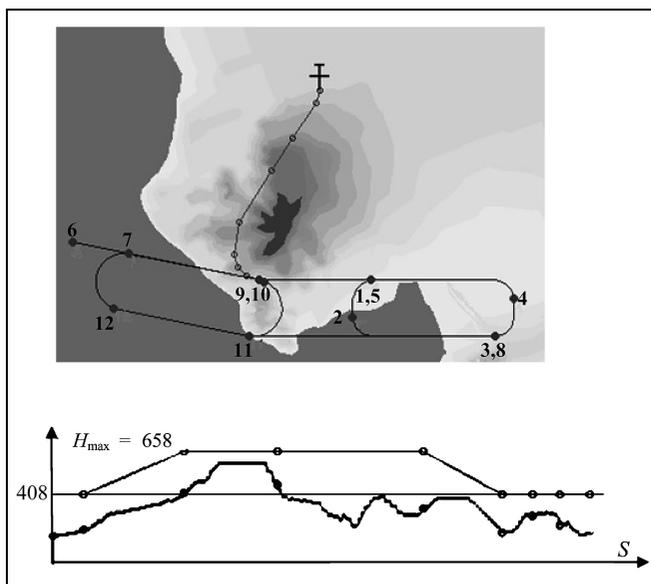


Рис. 8. Траектория и график высоты полета ($H_{\max} = 658$ м)

— все пары видимых вершин разных препятствий.

Шаг 6. Построение траекторий. Поиск кратчайших путей из начальной вершины в конечные в построенном графе (см. рис. 6). ♦

Представленный алгоритм применим для построения траекторий с облетом препятствий путем набора высоты. В этом случае на шаге 1 алгоритма границы препятствий строятся на выбранной высоте. На рис. 7 и 8 представлен результат работы алгоритма для построения траектории в точку 9 с максимальной высотой H_{\max} полета 458 и 658 м соответственно; показаны вид траектории в горизонтальной плоскости на фоне рельефа на указанной высоте и график высоты полета над рельефом в плоскости полета.

4. ОЦЕНКА РЕАЛИЗУЕМОСТИ ТРАЕКТОРИЙ

Для оценки реализуемости траекторий используется математическая модель самолета.

Вычисляются основные параметры полета вдоль анализируемой траектории: нормальная перегрузка, углы крена, тангажа и наклона траектории, углы атаки и скольжения, приборная и истинная скорости, число Маха, тяга, барометрическая высота [5]. По этим параметрам можно судить, в какой области — нормальной, эксплуатационной или предельной [6] — реализуется данная траектория. Если параметры полета вдоль траектории выходят за предельную область, траектория считается нереализуемой. Траектория, соответствующая нормальной области, более предпочтительна по сравнению с траекториями из эксплуатационной и, тем более, предельной областей.

Вычисляются основные параметры системы управления вдоль анализируемой траектории: отклонения органов управления и соответствующие шарнирные моменты, предельные параметры полета, допускаемые системой ограничений, располагаемые перегрузки и угловые скорости [7]. Если расходы рулей или шарнирные моменты превышают допустимые значения либо параметры траектории превышают значения, разрешенные системой ограничений, либо отсутствуют запасы по управляемости, то траектория считается нереализуемой.

Реализуемые траектории анализируются в смысле их возможной конфликтности с погодными факторами и воздушным движением. Наиболее приемлемая, свободная от конфликтов траектория предлагается пилоту для отработки. Информация по этой траектории представляется в соответствующем формате на навигационном дисплее.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья посвящена построению набора траекторий предпосадочного маневрирования в условиях сложного рельефа местности. За ее рамками остались вопросы многокритериального ранжирования траекторий по следующим критериям:

- область режимов полета (нормальная → эксплуатационная → предельная);
- близость к границе области;
- безопасность (близость к поверхности);
- сложность траектории (число и интенсивность управляющих воздействий).

Полученные результаты предназначены для использования в системе информационной поддержки экипажа самолета, функции которой состоят в:

- оценке летной ситуации и ее опасности в смысле возможности столкновения с землей, конфликтов с участниками воздушного движения и попадания в неблагоприятные атмосферные условия;
- ранжировании обнаруженных опасностей;
- определении путей разрешения зафиксированных конфликтов и определении наиболее подходящего решения;
- формировании рекомендаций экипажу по безопасным действиям в соответствии с проведенным анализом.

Отработка системы проводилась на стенде ЦАГИ. Моделировались полеты в гористой местности около морского побережья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумилов И.С. Авиационные происшествия. Причины возникновения и возможности предотвращения. — М.: МГТУ, 2006. — 384 с.
2. Баженов С.Г. Интеллектуальная система формирования и оценки траекторий самолета на этапе предпосадочного маневрирования // Искусственный интеллект. — 2005. — № 4. — С. 65—73.
3. Лебедев В.Г. Система-ассистент экипажа перспективного летательного аппарата // Тр. ИПУ РАН. — М., 2005. — Т. 26. — С. 39—46.
4. Алгоритмы: построение и анализ / Т.Х. Кормен и др. — М.: «Вильямс», 2006.
5. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Динамика продольного и бокового движения самолета. — М.: Машиностроение, 1979.
6. Advisory Circular 25-7A. Flight Test Guide for Certification of Transport Category Airplanes, FAA, 1998.
7. Аэродинамика и динамика полета магистральных самолетов // Под ред. Г.С. Бюшгенса. — М.; Пекин: Авиаиздательство КНР, 1995.

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,

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, ученый секретарь, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-92-31, ✉ lebedev@ipu.ru.



VI Международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2012

1—3 октября 2012 г.

Направления работы конференции

- Проблемы управления развитием крупномасштабных систем, включая ТНК, госхолдинги и госкорпорации
- Методы и инструментальные средства управления инвестиционными проектами и программами
- Имитация и оптимизация в задачах управления развитием крупномасштабных систем
- Управление топливно-энергетическими, экономическими и другими системами
- Управление транспортными системами
- Управление развитием крупномасштабных технических комплексов и систем в отраслях народного хозяйства
- Управление региональными, городскими, муниципальными системами
- Управление объектами атомной энергетики и другими объектами повышенной опасности
- Информационное и программное обеспечение систем управления крупномасштабными производствами
- Мониторинг в задачах управления крупномасштабными системами

Регистрация участников на сайте <http://mlsd.ipu.ru/2012/>

Справки: ✉ kuzn@ipu.ru, ☎ (495) 334-93-39, (495) 334-90-50