

ГЕНЕРАЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ЗАДАННОЙ ДЛИНЫ ПРИ ПРЕПОСАДОЧНОМ МАНЕВРИРОВАНИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Е.Л. Кулида, В.Г. Лебедев

Предложен генетический алгоритм, позволяющий строить траекторию нужной длины с учетом сложного рельефа местности при маневрировании самолета на малых высотах и предназначенный для удовлетворения норм эшелонирования с другими летательными аппаратами в бортовой системе траекторной безопасности. Приведены примеры траекторий, формируемых с помощью предложенного алгоритма.

Ключевые слова: управление воздушным движением, генетический алгоритм, рельеф местности, генерации траекторий, нормы эшелонирования.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы совершенствования системы управления воздушным движением (УВД) остро стоят перед мировым сообществом в силу непрерывного роста интенсивности воздушного движения. Для решения этих вопросов ведутся исследования в двух основных направлениях. Особое внимание уделяется разработке инструментов повышения эффективности работы существующей системы УВД. Однако более долгосрочные научно-исследовательские работы ориентированы на развитие методов децентрализованного УВД.

В ведущих авиационных державах активно разрабатываются и внедряются интегрированные бортовые системы обеспечения безопасности полетов, а в рамках перспективной программы развития европейской системы организации воздушного движения SESAR (Single European Sky ATM Research) [1] и программы по развитию американской системы организации воздушного движения NextGen [2] широко исследуется возможность делегирования части ответственности за эшелонирование с диспетчера на борт. Европейский исследовательский центр, работающий в области управления воздушным движением, AT-One разрабатывает систему 4D-CARMA (4 Dimensional Cooperative Arrival Manager) [3], в которой предусматривается возможность генерации траекторий от текущего по-

ложения самолета до взлетно-посадочной полосы, с учетом погодных условий и летно-технических данных. Одной из перспективных бортовых процедур, направленных на выдерживание необходимых интервалов между воздушными судами при прибытии в аэропорт, является процедура FIM (Flight-Deck Interval Management) [4], которая применяется в комбинации с диспетчерским управлением в проекте NASA по развитию планирования и регулирования потоков воздушного движения в районе аэродрома — ATD-1 (ATM Technology Demonstration) [5]. К настоящему моменту проведено математическое и полунатурное моделирование новых технологий [6].

Современные схемы УВД направляют воздушное движение вдоль небольшого числа фиксированных маршрутов, что позволяет минимизировать конфликты. Перспективная концепция УВД — free flight — не предполагает централизованного управления [7]. В этом случае части воздушного пространства будут резервироваться динамически децентрализованным способом с помощью компьютерных коммуникаций, авиакомпаниям и пилотам будет предоставлена большая свобода при выборе траектории полета из одного аэропорта в другой. При отказе от фиксированных маршрутов и введении free flight прогнозируется сокращение операционных расходов авиакомпаний благодаря выбору более экономичных траекторий, сокращению времени полета и учету изменения метеословий.

Таким образом, free flight будет существенно увеличивать разнообразие траекторий и снижать их предсказуемость.

На практике переход к концепции free flight возможен лишь в отдаленной перспективе, после оснащения всех воздушных судов бортовыми передатчиками ADS-B IN и ADS-B OUT, которые позволяют получать информацию о положении, траекториях и намерениях окружающих воздушных судов, а также перспективными бортовыми процедурами [8]. В этих условиях бортовую процедуру FIM следует расширить для применения в непредвиденных обстоятельствах. С этой целью был разработан алгоритм построения кратчайших бесконфликтных траекторий предпосадочного маневрирования в условиях сложного рельефа местности [9]. Однако выдерживание необходимых временных интервалов между воздушными судами с помощью управления скоростью на кратчайшей траектории не всегда возможно в силу ограничений на скорость и ускорение [10]. Иногда для задержки воздушного судна требуется удлинить траекторию.

Публикации с описанием алгоритмов генерации траекторий заданной длины в условиях сложного рельефа местности авторам статьи не известны. Цель настоящей статьи заключается в попытке исследовать один из возможных подходов к решению этой проблемы — применение генетического алгоритма для генерации траектории предпосадочного маневрирования заданной длины в районе со сложным рельефом местности.

1. ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ЗАДАННОЙ ДЛИНЫ

Для применения генетического алгоритма решение задачи кодируется в виде вектора-хромосомы $e = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ таким образом, чтобы по хромосоме можно было восстановить решение исходной задачи, и определяется множество $E \subseteq R^n$ возможных хромосом. На этом множестве определяется целевая функция $f(e) = f(e_1, e_2, \dots, e_n)$. Требуется найти такой вектор $e^* \in E$, что $f(e^*) = \min_{e \in E} f(e)$.

В процессе решения используются конечные наборы векторов из множества E , называемые популяциями. Применение генетического алгоритма сводится к итерационному процессу, в котором путем применения генетических операторов происходит переход от одной популяции к другой [11].

Генетический алгоритм состоит из нескольких шагов.

1. Генерация случайной начальной популяции.
2. Оценка приспособленности хромосом в популяции на основе вычисления целевой функции.
3. Итерация цикла воспроизводства:
 - селекция — выбор пар родителей;

- скрещивание — получение детей от выбранных пар родителей;
- мутация детей;
- формирование новой популяции.

4. Проверка критерия останова алгоритма. Если критерий выполнен, переход к шагу 5, в противном случае — переход к шагу 3.

5. Выбор решения — хромосомы с наилучшим значением целевой функции из последней популяции.

Применение генетических алгоритмов для решения конкретной задачи связано с выбором генетических операторов и значений параметров из большого числа вариантов, так как при выборе одних значений операторов и параметров алгоритмы работают лучше, а при выборе других — хуже. Определяющим фактором выбора служит специфика решаемой задачи.

Представление решения (хромосомы). Первый вопрос, который надо решить для возможности применения генетического алгоритма, как представить решение проблемы в виде вектора-хромосомы.

Рассматривается прямоугольная область маневрирования в заданном диапазоне географической широты и долготы, для которой имеется матрица высот рельефа $(Lat1, Lon1)$ — широта и долгота нижнего левого угла рассматриваемого прямоугольника, $(Lat2, Lon2)$ — широта и долгота правого верхнего угла этого прямоугольника, для определенности будем считать, что $Lat1 < Lat2$ и $Lon1 < Lon2$. В этой области заданы начальная точка движения A и конечная точка движения B , между которыми нужно сгенерировать траекторию заданной длины, не имеющую конфликтов с рельефом.

Для области маневрирования известна матрица высот $H = \{h_{i,j}\}$, $i = \overline{0, I-1}$, $j = \overline{0, J-1}$, которая задает высоту точек с географическими координатами $(Lat1 + jdLat, Lon2 - idLon)$, где $dLat$ — смещение между соседними строками матрицы H по широте, $dLon$ — смещение между соседними столбцами матрицы H по долготе. Значения I и J определяются из условий:

$$Lat1 + JdLat \leq Lat2 \ \& \ Lat1 + (J + 1)dLat > Lat2, \\ Lon2 - IdLon \geq Lon1 \ \& \ Lon2 - (I + 1)dLon < Lon1.$$

Для решения проблемы генерации траекторий в районе маневрирования самолета задается равномерная сетка точек, которые целесообразно выбрать среди точек, для которых заданы высоты в матрице высот, т. е. точки будем задавать с помощью двух целочисленных координат (jdx, idz) , где i, j — индексы в матрице H , dx задает смещение между индексами j соседних точек в матрице H , а dz — смещение между индексами i соседних точек в матрице H . Пронумеруем точки следующим об-

разом: точке (jdx, idz) присвоим номер $iJ + j$. В зависимости от высоты полета h рассматриваются только такие точки построенной сетки, в которых расстояние до рельефа больше заданного безопасного расстояния Δh , т. е. рельеф не является препятствием для движения объекта.

Каждая хромосома в нашем генетическом алгоритме имеет вид: $e = (e_1, e_2, \dots, e_n)$. Это набор из n целых чисел, которые являются номерами точек в районе маневрирования. Длина хромосомы n является параметром алгоритма и подбирается для конкретной задачи.

Обозначим точку $A - e_0$, а точку $B - e_{n+1}$. Хромосоме соответствует кусочно-линейная траектория, проходящая через точки $[e_0, e_1, e_2, \dots, e_n, e_{n+1}]$.

Целевая функция. Существенное достоинство генетических алгоритмов состоит в том, что на вид оптимизируемой функции, называемой целевой функцией, не налагается никаких ограничений.

Целевая функция в генетическом алгоритме предназначена для оценки ценности хромосомы. В нашем генетическом алгоритме целевая функция будет минимизироваться, т. е. меньшее значение целевой функции будет соответствовать лучшей приспособленности хромосомы. Целевая функция будет складываться из штрафов за отклонение длины соответствующей траектории от заданной целевой длины D , за конфликты траектории с рельефом и за острые углы между последовательными отрезками кусочно-линейной траектории, соответствующей хромосоме.

Координаты точки e_i обозначим (x_i, y_i) . Введем обозначения:

$$d_{i-1, i} = (x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2,$$

$$d_{i, i+1} = (x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2,$$

$$d_{i-1, i+1} = (x_{i+1} - x_{i-1})^2 + (y_{i+1} - y_{i-1})^2.$$

Отклонение от заданной целевой длины

$$\Delta D = \left| D - \sum_{i=0}^n d_{i, i+1} \right|.$$

На основе матрицы высот рельефа H строится набор горизонтальных и вертикальных отрезков $\bar{E} = (\bar{e}_k)$, $k = \overline{1, K}$, таким образом, что траектория, не пересекающая эти отрезки, не имеет конфликтов с рельефом (рис. 1–4).

Каждый отрезок кусочно-линейной траектории, соответствующей хромосоме, проверяется на пересечение со всеми отрезками из множества \bar{E} .

Пересечение двух отрезков проверяется следующим образом. Обозначим координаты концов первого отрезка: $(otr1. x_1, otr1. y_1)$ и $(otr1. x_2, otr1. y_2)$,

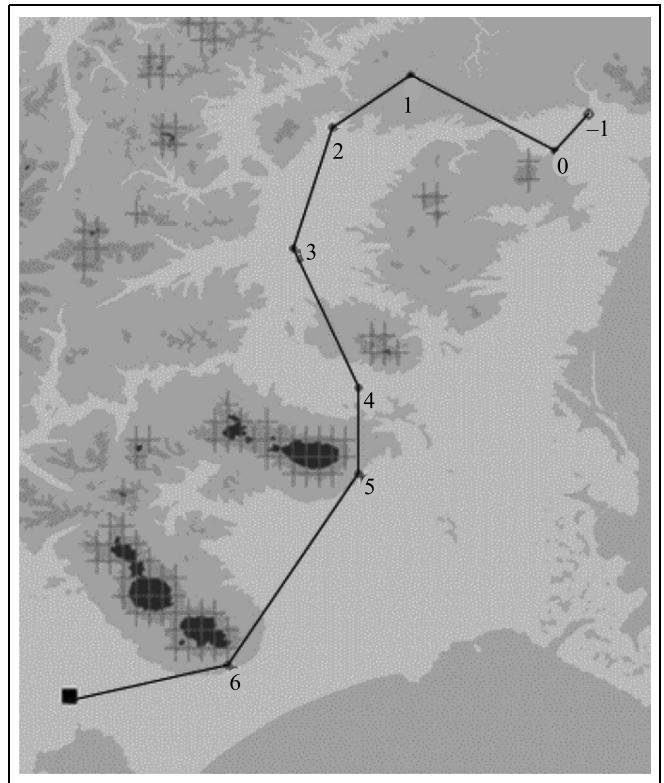


Рис. 1. Траектория, сгенерированная при длине хромосомы 6 и заданной длине ~200 км

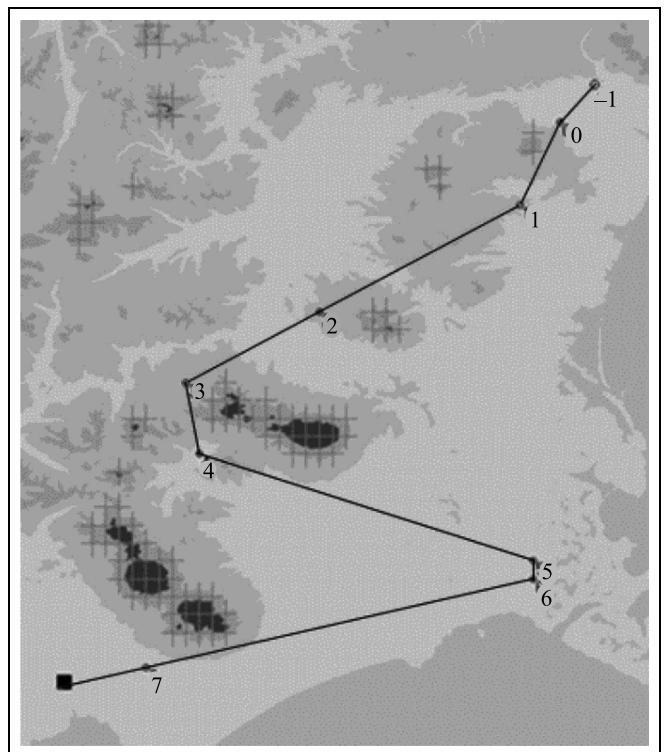


Рис. 2. Траектория, сгенерированная при длине хромосомы 7 и заданной длине ~250 км

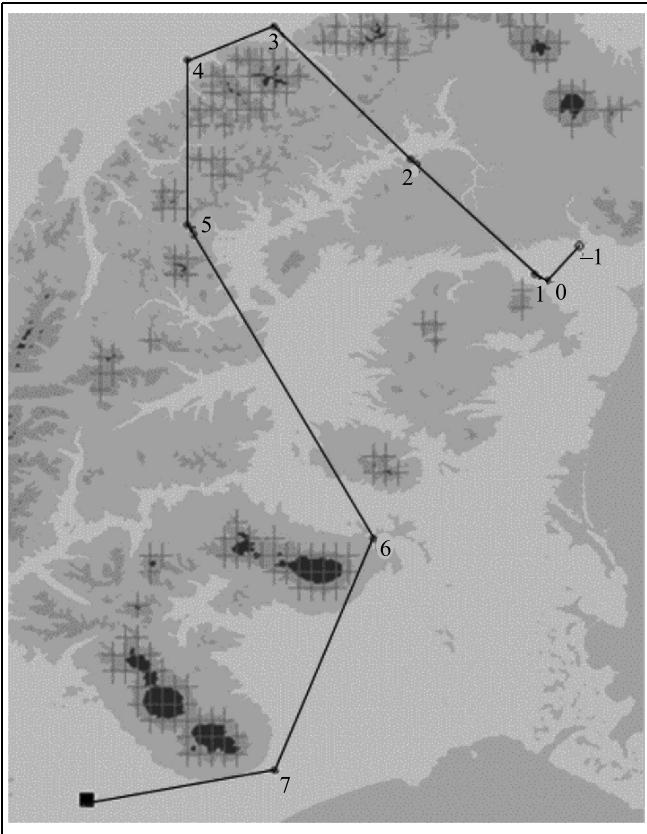


Рис. 3. Траектория, сгенерированная при длине хромосомы 7 и заданной длине ~300 км

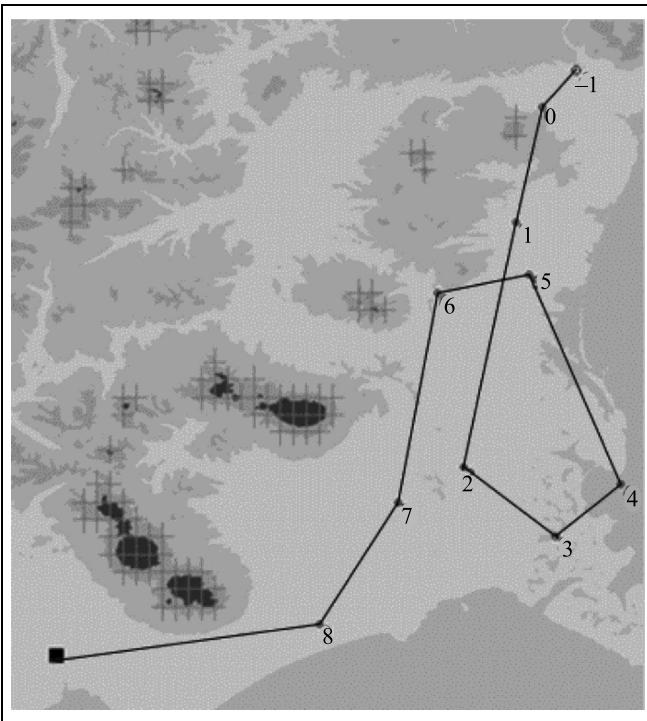


Рис. 4. Траектория, сгенерированная при длине хромосомы 8 и заданной длине ~300 км

координаты концов второго отрезка: $(otr2.x_1, otr2.y_1)$ и $(otr2.x_2, otr2.y_2)$.

Вычислим величины:

$$v1 = (otr2.x_2 - otr2.x_1)(otr1.y_1 - otr2.y_1) - (otr2.y_2 - otr2.y_1)(otr1.x_1 - otr2.x_1),$$

$$v2 = (otr2.x_2 - otr2.x_1)(otr1.y_2 - otr2.y_1) - (otr2.y_2 - otr2.y_1)(otr1.x_2 - otr2.x_1),$$

$$v3 = (otr1.x_2 - otr1.x_1)(otr2.y_1 - otr1.y_1) - (otr1.y_2 - otr1.y_1)(otr2.x_1 - otr1.x_1),$$

$$v4 = (otr1.x_2 - otr1.x_1)(otr2.y_2 - otr1.y_1) - (otr1.y_2 - otr1.y_1)(otr2.x_2 - otr1.x_1).$$

Если выполнено условие $(v1v2 < 0) \& (v3v4 < 0) = true$, то отрезки пересекаются, в противном случае — не пересекаются.

Обозначим число отрезков кусочно-линейной траектории, соответствующей хромосоме, пересекающихся с отрезками из множества \bar{E} , через N_1 .

Суммарное число острых углов между последовательными отрезками кусочно-линейной траектории, соответствующей хромосоме, обозначим N_2 :

$$N_2 = \sum_{i=1}^n n_i,$$

где $n_i = \begin{cases} 1, & \text{если } d_{i-1,i} + d_{i+1,i} - d_{i-1,i+1} \geq 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$

Тогда целевая функция

$$f(e) = \Delta D + F_1 N_1 + F_2 N_2,$$

где F_1 — штраф за пересечение с рельефом, F_2 — штраф за острый угол. Штрафы выбираются большими по сравнению с длиной траектории, например, $F_1 = F_2 = 4D$, в этом случае генетический алгоритм генерирует такие хромосомы, что соответствующие траектории не пересекаются с рельефом и не имеют острых углов.

Оператор селекции. В рассматриваемом алгоритме выбираются двое родителей, чтобы иметь двоих детей. Для выбора родителей используется бинарный турнирный отбор. Это реализуется следующим образом:

- в популяции выбираются две хромосомы случайным образом; из них первым родителем будет индивид с лучшим (минимальным) значением целевой функции;
- вторая хромосома выбирается аналогично.

Эта процедура может привести к тому, что оба родителя — одна и та же хромосома, но это происходит нечасто, если популяция большая.

Оператор скрещивания. Применяется одноточечное скрещивание, при котором из двух хромосом порождаются две новые хромосомы. Случайным образом выбирается точка разрыва, и обе ро-



дительские хромосомы разделяются на две части в этой точке, затем соответствующие части различных хромосом соединяются и образуются две новые хромосомы.

Оператор мутации с вероятностью, называемой вероятностью мутации, заменяет ген в хромосоме на другой случайный ген.

Критерий остановки алгоритма. В нашем алгоритме применяются несколько критериев остановки:

- решение найдено, если в популяции есть хромосома, значение целевой функции которой отличается от целевого значения D меньше, чем на заданное значение;

- реализовано заданное число популяций;

- популяция однородна, т. е. выполнено условие:

$$\text{avgFitness}/\text{maxFitness} > 0,98,$$

где avgFitness и maxFitness — среднее и максимальное значения целевой функции в популяции. Это означает, что произошла преждевременная сходимость к локальному экстремуму.

Если решение не было найдено, то следует перезапустить алгоритм.

2. ПРОТОТИП БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАЕКТОРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА

Разработанный генетический алгоритм для генерации траектории заданной длины был реализован [12] в рамках прототипа бортовой системы обеспечения траекторной безопасности полета [13], общая архитектура которого представлена на третьей странице обложки.

Упомянутый прототип разработан и реализован на стенде ИПУ РАН в целях моделирования и отработки алгоритмов, предназначенных для реализации перспективных бортовых процедур УВД. Его основные функции:

- имитация летной ситуации, при которой возникает конфликт предполагаемой траектории с рельефом и/или с окружающими воздушными судами;

- генерация вариантов разрешения конфликтов;

- оценка реализуемости и безопасности предлагаемых решений и их ранжирование на основе выполнения виртуальных полетов с помощью бортовой математической модели движения самолета [14, 15].

В основу генерации вариантов разрешения конфликтов положен алгоритм генерации кратчайших траекторий облета препятствий рельефа на различных высотах при заходе в точки стандартного маршрута прибытия по приборам (STAR) [9] и алгоритм управления скоростью вдоль траектории [10]. Однако при фиксированной (кратчайшей) траектории управление скоростью не всегда поз-

воляет обеспечить нужное время пролета заданной точки воздушного пространства, поскольку самое раннее и самое позднее возможное время определяются ограничениями на скорость и ускорение. Обеспечить более позднее время пролета точки воздушного пространства возможно, воспользовавшись траекторией большей длины, рассчитать которую несложно, зная время движения и предпочтительную скорость движения. С помощью предложенного генетического алгоритма строится кусочно-линейная траектория рассчитанной длины, затем углы между отрезками траектории скругляются с нужным радиусом разворота с помощью функции, имеющейся в прототипе.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель моделирования заключалась в проверке, позволит ли предложенный алгоритм для гористой окрестности аэропорта Елизово сгенерировать траектории, имеющие длину, близкую к заданной, не имеющие конфликтов с рельефом и острых углов между последовательными отрезками.

Одна из главных проблем генетических алгоритмов — преждевременная сходимость к локальному экстремуму. Она возникает, если большинство хромосом в популяции похожи. Важной причиной преждевременной сходимости может быть неправильный выбор размера популяции. Если популяция слишком мала, проблема возникает из-за недостаточного разнообразия хромосом в популяции, однако при увеличении популяции растут вычислительные затраты. Критерием достаточного размера популяции может служить отсутствие однородных популяций при многократных повторных запусках программы.

Число популяций, т. е. число итераций алгоритма, выбирается таким образом, чтобы итерации цикла воспроизводства не заканчивались до тех пор, пока при смене популяций наблюдается улучшение среднего значения целевой функции; ориентиром может служить среднее число итераций алгоритма до получения решения при многократных повторных запусках программы.

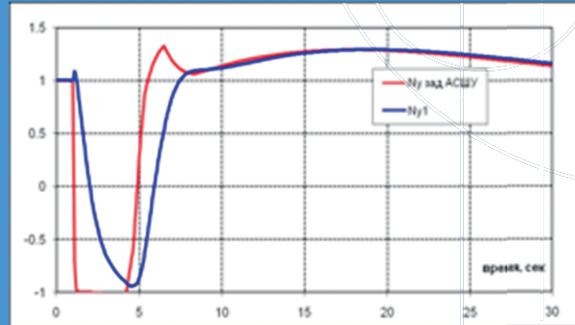
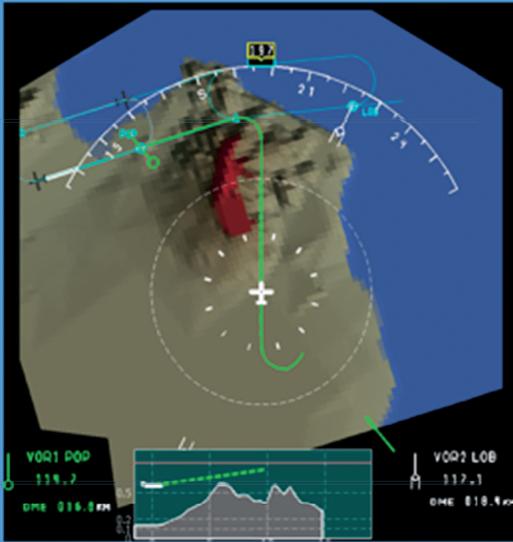
Вероятность операции мутации служит важным параметром алгоритма, он должен быть выбран таким образом, чтобы обеспечивать изменчивость хромосом, но при этом не терять полезную наследственную информацию от родителей.

Было выполнено моделирование при параметрах генетического алгоритма:

- число хромосом в популяции 500;
- число популяций 150;
- вероятность мутации 0,02.

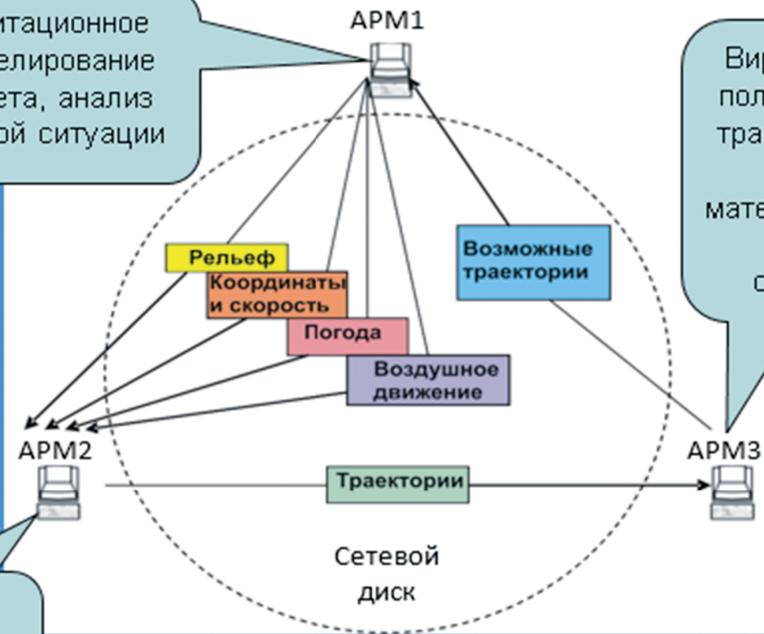
Оказалось, что оптимальная длина хромосомы, т. е. число генов в ней, зависит от заданной длины траектории, которую необходимо построить.

СТРУКТУРА СТЕНДА МОДЕЛИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАЕКТОРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА

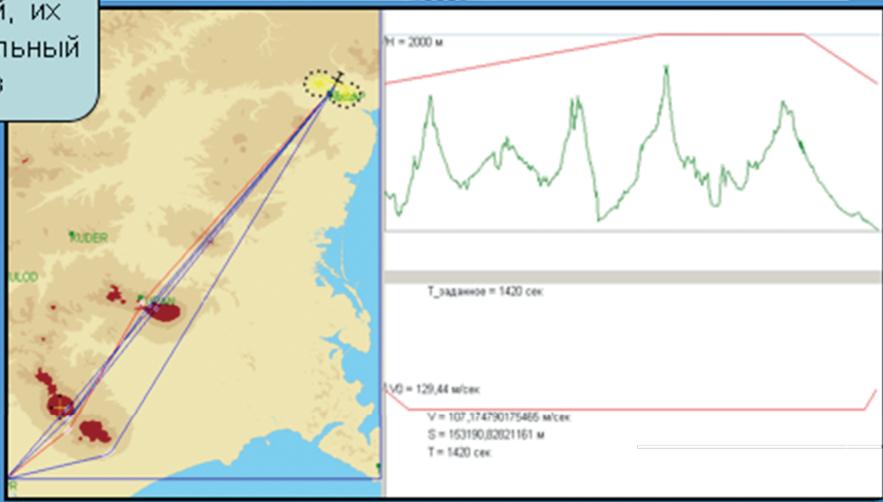


Имитационное моделирование полета, анализ летной ситуации

Виртуальные полеты вдоль траекторий на основе математической модели самолета



Генерация траекторий, их предварительный анализ



Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН

Лаборатория систем поддержки принятия решений

Профсоюзная ул., д. 65, Москва, 117997

✉ lebedev@ipu.ru, ☎ (495) 334-92-49

В результате моделирования было установлено, что с помощью разработанного генетического алгоритма удается эффективно и быстро (за 1–2 с) решать поставленную задачу для гористой местности вблизи аэропорта Елизаово. На рис. 1–4 приведены результаты генерации траекторий на высоте 1500 м. Более темный цвет рисунка соответствует большей высоте рельефа. Траектория, не пересекающая отрезки серого цвета, не имеет конфликтов с рельефом.

При построении траектории длиной ~200 км лучшие результаты были получены при длине хромосомы, равной 6 (см. рис. 1). Цифрами, начиная с 1, на рисунках помечены точки траектории, полученные на основе генетического алгоритма. Цифра 0 соответствует фиксированной начальной точке траектории, конечная точка траектории помечена черным квадратом, цифра –1 соответствует положению самолета. Длина траектории, представленной на рис. 1, равна 200,75 км. Полученное небольшое отклонение от заданной длины траектории вполне удовлетворительно, поскольку позволяет благодаря управлению скоростью точно реализовать заданное время пролета точки синхронизации.

На рис. 2 представлена траектория, полученная при длине хромосомы, равной 7, и заданной длине ~250 км. Длина полученной траектории 250,25 км. На рис. 3 — траектория, полученная при длине хромосомы, равной 7, и заданной длине ~300 км. Длина полученной траектории 300,001 км. На рис. 4 — траектория, полученная при длине хромосомы, равной 8, и заданной длине ~300 км. Длина полученной траектории 300,45 км.

Если между теми же начальной и конечной точками требуется построить траекторию большей длины, то лучшие результаты получаются при увеличении длины хромосомы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен генетический алгоритм, позволяющий построить траекторию нужной длины при полете на малой высоте в условиях сложного рельефа местности. Алгоритм не гарантирует получения решения, поскольку в отдельных случаях он может завершиться не в результате получения решения, а после реализации заданного числа популяций или получения однородной популяции. Можно повысить вероятность получения решения, запуская алгоритм неоднократно.

Тем не менее, алгоритм может оказаться полезным для расширения возможностей перспективной бортовой функции FIM, поскольку в процессе моделирования он позволил получить интересные и нестандартные решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *SESAR* web page: <http://www.sesarju.eu/> (дата обращения 21.04.2017).
2. *NextGen* web page: <http://www.faa.gov/NextGen/> (дата обращения 21.04.2017).
3. *4 Dimensional Cooperative Arrival Manager (4D-CARMA)*, AT-One, the ATM Research Alliance, http://www.dlr.de/Portaldata/14/Resources/dokumente/Veroeffentlichungen/AT-One3_-4D-CARMA.pdf (дата обращения 21.04.2017).
4. *RTCA DO-328A Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for Airborne Spacing — Flight Deck Interval Management (ASPA-FIM)*, September 22, 2015.
5. *Swenson H., Robinson III J.E., Winter S.* NASA's ATM Technology Demonstration-1: Moving NextGen Arrival Concepts from the Laboratory to the Operational NAS. — NASA Ames Research Center, USA, 2013.
6. *Thipphavong J., Jung J., Swenson H.N.*, et al. Evaluation of the Controller-Managed Spacing Tools, Flight-deck Interval Management and Terminal Area Metering Capabilities for the ATM Technology // 10th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2013).
7. *Nordwall B.D.* Free Flight: ATC model for the next 50 years // *Aviation Week and Space Technology*. — 1995. — Vol. 143, N 5. — P. 38–39.
8. *Skavinskaya D., Orlov V., Gabeydulin R.* The research of airborne ADS-B-based procedures using fast-time and real-time simulation // *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference*, Washington DC, 2015.
9. *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.
10. *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.
11. *Пантелеев А.В., Метлицкая Д.В., Алешина Е.А.* Методы глобальной оптимизации: метаэвристические стратегии и алгоритмы — М.: Вузовская книга, 2013.
12. *Свидетельство* о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663217 РФ. Инструментальное средство расчета бесконфликтных траекторий воздушного судна заданной длины / Е.Л. Кулида, Н.А. Егоров. — Зарег. 14.12.2015.
13. *Алешин Б.С., Баженов С.Г., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г.* Прототип системы обеспечения траекторной безопасности полета // XII Всерос. совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 / ИПУ РАН — М., 2014. — С. 3351–3361.
14. *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.
15. *Vazhenov S.G., Korolyov V.S., Kulida E.L., Lebedev V.G.* Simulation of on-board model of airliner to evaluate capability of trajectories and flight safety // 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2014.

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

Кулида Елена Львовна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник,
✉ lenak@ipu.ru,

Лебедев Валентин Григорьевич — д-р техн. наук, уч. секретарь,
✉ lebedev@ipu.ru,

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