

Перспективные рельефометрические корреляционно-экстремальные навигационные системы беспилотного летательного аппарата

Микрюков А. Ю., Косяченко С. А., Наумов А. И.

Введение

Применение рельефометрических корреляционно-экстремальных навигационных систем (РКЭНС) является эффективной альтернативой спутниковой навигационной системе при выполнении коррекции навигационных параметров основной навигационной системы (ОНС) [1,2].

К настоящему времени разработано большое число алгоритмов РКЭНС[3]. В случае возможных больших координатных ошибок к моменту коррекции применяются т.н. поисковые алгоритмы КЭНС. Поисковые алгоритмы имеют существенный недостаток: высокие требования к бортовому вычислителю, особенно это становится заметно в случае реализации одновременного оценивания координатных и скоростных ошибок ОНС ЛА.

К автономной навигации современных беспилотных ЛА предъявляются высокие требования, по точности навигационного решения[9,10]. В связи с этим представляется перспективным исследование координатно-скоростных алгоритмов оценивания, которые потенциально имеют более высокую точность в сравнении с алгоритмами только координатного оценивания. Из-за недостаточной структурированности и большей размерности пространства решений в задаче координатно-скоростного оценивания представляется перспективным применение алгоритмов основанных на теории генетических алгоритмов (ТГА), которые имеют высокую производительность и потенциально очень высокую точность.

Данная работа продолжает цикл работ [3,4,8] направленных на синтез экономичного алгоритма РКЭНС способного оценивать координатно-скоростные ошибки ОНС ЛА и посвящена проблеме применения генетических алгоритмов в задачах РКЭНС. В данной статье мы подробно рассмотрим проблему выбора способа мутации для ГА рассмотренного подробно в [8].

Модель ошибок ОНС ЛА

В качестве модели ошибок ОНС летательного аппарата (ЛА) рассмотрим модель следующего вида:

$$\dot{\delta \vec{x}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \delta \vec{x} + \xi, \quad (1)$$

где $\delta\bar{x} = [\delta x \ \delta z \ \delta V_x \ \delta V_z \ \delta h]^T$ – вектор ошибок по координатам, скоростям и высоте; $\xi = [0 \ 0 \ \delta a_x \ \delta a_z \ 0]^T$ – шумы процесса, $\delta a_x, \delta a_z$ – ошибки измерения акселерометров по осям x и z ; Δt – временной интервал.

КЭНС на основе ТГА

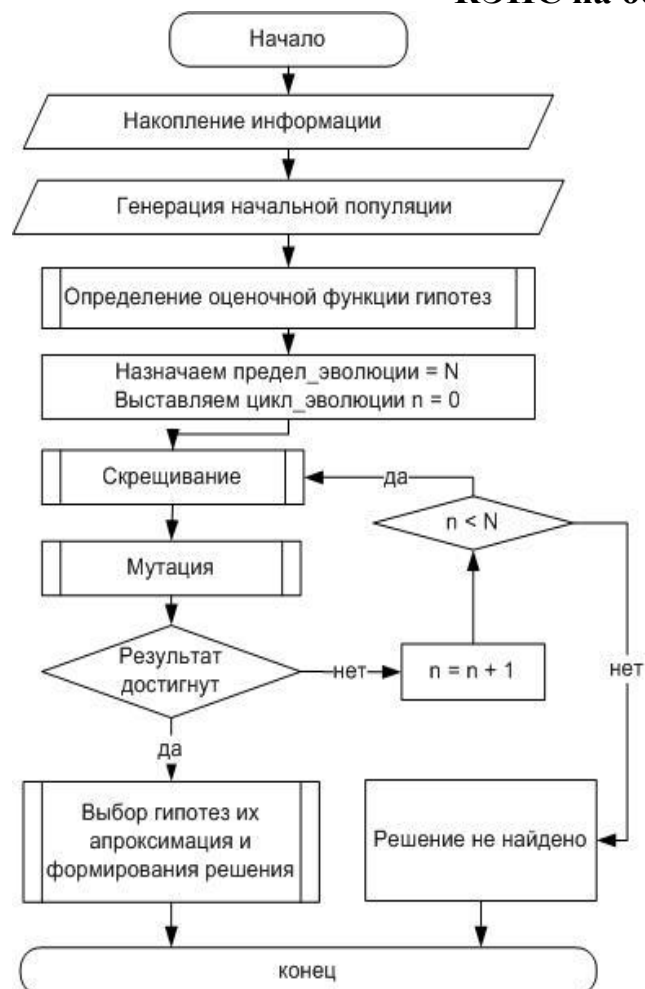


Рис. 1 Общий алгоритм КЭНС

Генетический алгоритм - это эвристический алгоритм поиска, реализованный с помощью последовательного подбора, комбинирования и вариации искоемых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию[6,7]. Реализация алгоритма КЭНС на основе генетического подхода, в общем виде представлена на рисунке 1. Подробно данный алгоритм рассмотрен в [8].

В РКЭНС наблюдением является точечное косвенное измерение высоты рельефа местности, формируемое как разность измерений абсолютной и истинной высот полета ЛА [1,2]. В качестве накопленной информации в алгоритме РКЭНС будем использовать множество последовательных во времени измерений высоты рельефа

местности: $[h_p(x(t_1), z(t_1)), h_p(x(t_2), z(t_2)), \dots, h_p(x(t_n), z(t_n))]$, где $h_p(x(t_i), z(t_i))$ - измеренное значение высоты рельефа, в момент времени t_i .

Для оценки координатных ошибок $\delta x, \delta z$ ОНС ЛА на траектории $[(x(t_1), z(t_1)), (x(t_2), z(t_2)), \dots, (x(t_n), z(t_n))]$, задаем начальное множество гипотез об ошибках ОНС ЛА, которое может быть записано так: $[(\Delta x^1, \Delta z^1), (\Delta x^2, \Delta z^2), \dots, (\Delta x^n, \Delta z^n)]$, где $\Delta x^i, \Delta z^i$ - предположение о координатной ошибке НС ЛА, вдоль осей Ox, Oz соответственно.

Для оценки гипотез введем оценочную функцию J , которая представляет собой квадрат суммы невязок, измеренных и эталонных данных вдоль оцениваемой траектории $[(x(t_1) + \Delta x^j, z(t_1) + \Delta z^j), \dots, (x(t_n) + \Delta x^j, z(t_n) + \Delta z^j)]$:

$$J = \sum_{c=0}^n (h_p(x(t_c), z(t_c)) - h_p^3(x(t_c) + \Delta x^j, z(t_c) + \Delta z^j))^2, \quad (2)$$

где $h_p(x(t_c), z(t_c))$ - измеренное значение высоты рельефа в момент времени t_c ; $h_p^3(x(t_c) + \Delta x^j, z(t_c) + \Delta z^j)$ - восстановленное с помощью карты значение высоты

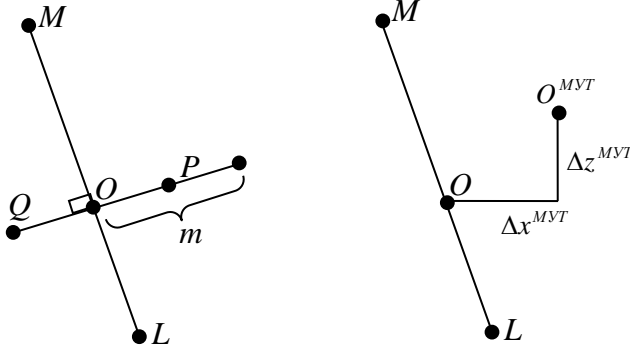


Рис. 2 Способы мутации. Слева мутация с использованием идей метода градиентного спуска, справа классическая мутация

рельефа в точке $(x(t_c) + \Delta x^j, z(t_c) + \Delta z^j)$. Функцию J можно считать $J = J(\Delta x^j, \Delta z^j)$ т.к. остальные параметры не меняются. Координатное оценивание ОНС ЛА сводиться к поиску такой гипотезы $(\Delta x^j, \Delta z^j)$, в которой J принимает минимальное значение. Для нахождения такой гипотезы перейдем к процессу эволюции начального множества гипотез. Процесс выбора гипотез для

скрещивания и процесс скрещивания гипотез был подробно рассмотрен [8]. В данной работе мы подробно остановимся на проблеме выбора функции мутации для данного алгоритма КЭНС.

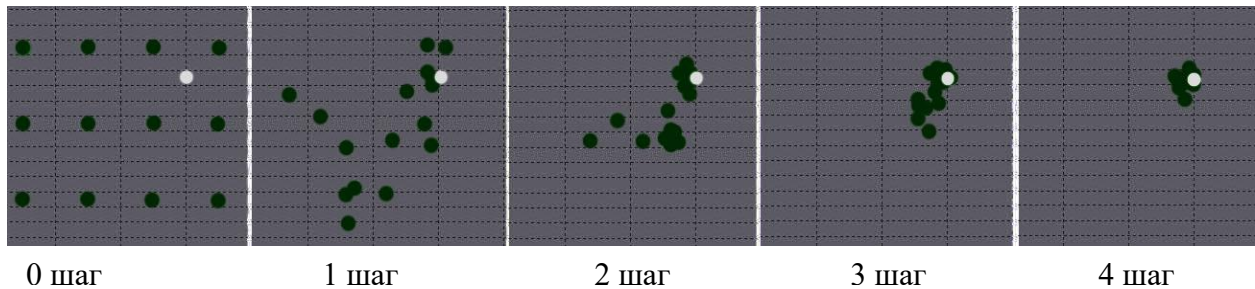


Рис. 3 Процесс эволюции пошагово в задаче КЭНС

Мутация в алгоритме РКЭНС

Допустим, что мы имеем гипотезы $M = (\Delta x^M, \Delta z^M)$ и $L = (\Delta x^L, \Delta z^L)$, которые в процессе скрещивания дают потомка $O = (\Delta x^O, \Delta z^O)$. Рассмотрим возможные процедуры мутации этого решения.

1. Классическая мутация.

Данный вид мутации рассматривается в качестве основного в ТГА и носит случайный характер[7]: $O^{MUT} = f^{MUT}(O) = (\Delta x^O + \Delta x^{MUT}, \Delta z^O + \Delta z^{MUT})$, где

$\Delta x^{MYT} = \Delta z^{MYT} = N(0, \delta^{MYT})$. Отклонения по оси OX и OZ являются случайными, нормально распределенными величинами (рис. 2 справа).

2. Мутация с использованием идей метода градиентного спуска.

Данный вид мутации можно считать некой адаптацией метода градиентного спуска для задачи КЭНС. В данном случае $O^{MYT} = f^{MYT}(O, M, L)$. В окрестности гипотезы O , принадлежащей отрезку ML , вычисляется градиент функционала J . Это легко сделать численно с помощью контрольных точек P , Q . Далее в направлении градиента, откладывается отрезок длиной m :

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(\Delta x^i - \Delta x^{i-1})^2 + (\Delta z^i - \Delta z^{i-1})^2}}{n^2}, \quad (3)$$

где, $\Delta x^i, \Delta z^i$ – гипотезы об ошибке ОНС ЛА. В ходе решения, когда гипотезы будут сходиться к единому решению (рис. 3), мутация так же будет сходиться к нулю, подобно тому как это реализовано алгоритме Митчелла[7].

Численные исследования

Для определения зависимости точности и ресурсоемкости рассматриваемых вариаций алгоритма КЭНС от способа мутации был проведен ряд численных экспериментов. В качестве эталона использовалась цифровая карта рельефа местности формата SRTM [5] на район среднерусской возвышенности. Модельные реализации полетов ЛА представляли собой прямолинейные участки траектории длиной до 70 км. Ошибки ОНС вдоль оси OX моделировались в соответствии с (1) следующим образом: $-1500 \leq \delta x \leq 1500$ метров; $-5 \leq \delta V_x \leq 5$ метров в секунду; $\delta a_x = N(\mu, \sigma^2)$; $0 \leq \mu \leq 0.002$; $0 \leq \sigma^2 \leq 0.01$ (для ошибок по оси OZ аналогично). Ошибка измерения высоты моделировались с частотой 1 Гц: $\delta h = N(0, 0.015 \cdot (h_{ABC} - h_{PB})) + \delta h_{PB}$, где h_{ABC} – абсолютная высота полета; h_{PB} – показания радиовысотомера; δh_{PB} – ошибка, вызванная нелинейностью рельефа в точке измерения.

Были проведены 160 модельных полетов. Каждая реализация длинной 14 километров. Размер начальной области поиска ГА = 4000 метров, всего рассматривалось 25 гипотез (5x5). Результат точности работы исследуемых алгоритмов представлен в таблице 1. Результаты скорости работы исследуемых алгоритмов представлены в таблице 2.

Таблица 1. Точность алгоритмов КЭНС.

Классическая мутация	Мутация градиентным спуском
231.3 метра	173.4 метра

Таблица 2. Время работы алгоритмов КЭНС.

Классическая мутация	Мутация градиентным спуском
21.4 секунды	22.2 секунды

Заключение

Рассмотренная в данной работе вариация перспективного алгоритмического обеспечения РКЭНС, строго говоря, нельзя считать ГА, т.к. процедура мутации не носит случайных характер. Тем не менее, данный алгоритм имеет более высокую точность определения координатной ошибки ОНС ЛС в сравнении с классическим ГА РКЭНС, при незначительных потерях в скорости обработки навигационной информации.

Список литературы

1. Красовский А. А., Белоглазов И. Н., Чигин Г. П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем, Москва, «Наука» 1979.
2. Paul D. Groves, Robin J. Handley. Optimising the integration of terrain-referenced navigation with INS and GPS. In Proceedings of Institute of Navigation National GNSS2004, September 2004. Long Beach, California, USA.
3. Косяченко С.А., Наумов А.И. Экономичный поисковый алгоритм корреляционно-экстремальной навигационной системы для совместного оценивания координатных и скоростных ошибок, Материалы IX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением».
4. Косяченко С. А., Наумов А. И. Алгоритмы поиска глобального экстремума функционала поискового алгоритма корреляционно-экстремальной навигационной системы при одновременном оценивании координатных и скоростных ошибок, Материалы X конференции молодых ученых «Навигация и управление движением».
5. <ftp://eosrpoln.ecs.nasa.gov/SRTM/versbon2>.
6. Вороновский Г. К. Генетические алгоритмы искусственные НС и проблемы виртуальной реальности, Харьков, «Основа», 1997
7. Митчелл М. Точные математические модели ГА. 2003.
8. Косяченко С. А., Наумов А. И. Генетический алгоритм корреляционно-экстремальной обработки навигационной информации, Труды конференции...2009
9. Оснащение вооруженных сил ведущих иностранных государств беспилотными летательными аппаратами и опыт их боевого применения, Москва, ГШВ сил РФ, 2008
10. Перспективы развития беспилотных летательных аппаратов вооруженных сил ведущих иностранных государств, Москва, ГРУ, 2004.