



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (РФФИ)
МЕЖДУНАРОДНОЙ ОБЩЕСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
«АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ» (АНУД)
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИТМО, РОССИЯ
АМЕРИКАНСКОГО ИНСТИТУТА АЭРОНАВТИКИ И АСТРОНАВТИКИ (AIAA)
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРОВ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ –
ОБЩЕСТВА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ (IEEE – AESS)
ФРАНЦУЗСКОГО ИНСТИТУТА НАВИГАЦИИ (IFN)
НЕМЕЦКОГО ИНСТИТУТА НАВИГАЦИИ (DGON)
ЖУРНАЛА «ГИРОСКОПИЯ И НАВИГАЦИЯ»



27-29
МАЯ 2019

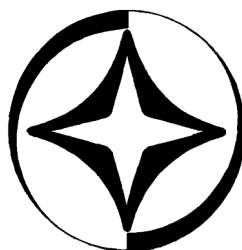
XXVI

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИНТЕГРИРОВАННЫМ
НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ



XXVI САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИНТЕГРИРОВАННЫМ НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ



27–29 мая 2019

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, РОССИЯ

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

- РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (РФФИ)
- МЕЖДУНАРОДНОЙ ОБЩЕСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ «АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ» (АНУД)
- НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИТМО, РОССИЯ
- АМЕРИКАНСКОГО ИНСТИТУТА АЭРОНАВТИКИ И АСТРОНАВТИКИ (AIAA)
- ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРОВ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ – ОБЩЕСТВА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ (IEEE – AESS)
- ФРАНЦУЗСКОГО ИНСТИТУТА НАВИГАЦИИ (IFN)
- НЕМЕЦКОГО ИНСТИТУТА НАВИГАЦИИ (DGON)
- ЖУРНАЛА «ГИРОСКОПИЯ И НАВИГАЦИЯ», РОССИЯ

В настоящем издании опубликованы на русском языке пленарные и стендовые доклады участников конференции из России и Украины.

*Стендовые доклады отмечены знаком *.*

Полностью все доклады представлены в материалах конференции на английском языке – «26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems».

Главный редактор
академик РАН В. Г. Пешехонов

Уважаемые авторы!

Убедительная просьба проверить тексты ваших докладов. Если вы обнаружите какие-либо ошибки или неточности, сообщите об этом в редакцию по e-mail: **editor@eprib.ru**.

Исправления принимаются до **10 июня 2019 г.**

Далее доклад будет загружен в базу цитирования в том варианте, которым располагает редакция.

Использование генетического алгоритма для определения параметров многогипотезного алгоритма восстановления траектории воздушного судна^{*}

Дмитрий Бедин
Отдел динамических систем
ИММ УрО РАН
Екатеринбург, Россия
bedin@imm.uran.ru

Алексей Иванов
Отдел динамических систем
ИММ УрО РАН
Екатеринбург, Россия
iagsoft@imm.uran.ru

Аннотация—Разработан многогипотезный алгоритм восстановления траектории воздушного судна, показавший неплохую производительность при обработке модельных и реальных данных. Работа алгоритма зависит от большого числа параметров. Отследить влияние многих из них на результаты достаточно сложно. В этой ситуации оправданным является применение генетического алгоритма для настройки параметров.

Index Terms—Генетические алгоритмы, Восстановление траектории

I. Введение

Ранее авторами был разработан многогипотезный алгоритм [1]–[3] восстановления траектории воздушного судна (ВС). Алгоритм тестировался на модельных и реальных данных и показал неплохую производительность. Однако работа алгоритма зависит от большого числа параметров, при этом влияние их изменения на результаты счёта весьма запутано. Изначально значения большинства параметров были выбраны исходя из эмпирических соображений. Для улучшения производительности алгоритма необходима настройка параметров, которую следует проводить в автоматическом режиме, тестируя работу алгоритма на данных наблюдения (машинное обучение).

Методы настройки параметров, использующие значения частных производных, не могут быть применены ко всем параметрам многогипотезного алгоритма: по одним параметрам вычисление производных является очень трудоемким как с точки зрения написания требуемого кода, так и с точки зрения вычислительных ресурсов; другие параметры являются целочисленными, поэтому производная по ним может существовать только в каком-то особом, обобщённом смысле.

Разумным является применение генетического алгоритма настройки параметров. Относительно простой в программировании, генетический алгоритм требует

больших вычислительных ресурсов. Но это требование не является критичным из-за наличия в ИММ УрО РАН вычислительного кластера [4].

II. Многогипотезный алгоритм восстановления траектории ВС

Основой многогипотезного алгоритма является построение и поддержание пучка траекторий, каждая из которых представляет собой вариант движения самолёта, совместный с имеющимися замерами, историей наблюдения и ограничениями на динамику [1].

После поступления очередного замера алгоритм производит развитие пучка (продолжение, ветвление и т.п.) в соответствии с координатами и моментом замера. Затем происходит построение оценки положения ВС на момент замера. Далее пучок прореживается и алгоритм ожидает поступления следующего замера.

Алгоритм показал себя достаточно хорошо, особенно в случаях присутствия в замерах выбросов — редких замеров с большим уровнем ошибки [2], [3].

Недостатком алгоритма является большое число (несколько десятков) настроечных параметров, влияние которых на работу алгоритма не всегда очевидно. Например, при подсчёте главного критерия соответствия траектории имеющимся замерам используется некоторая особая функция расстояния между замером и точкой на траектории. У этой функции есть два параметра «величина зоны нечувствительности» и «величина дальней зоны». Значение главного критерия соответствия используется, в частности, при прореживании пучка. Аналитически учесть влияние значений упомянутых параметров на работу алгоритма даже на этапе одного шага алгоритма представляется чрезмерно сложным.

III. Генетический алгоритм

Алгоритм основывается на моделировании процесса естественной эволюции [5] с включением элементов

направленного поиска.

Программа генетического алгоритма написана на языке MATLAB, счётная часть (многогипотезный алгоритм восстановления траектории ВС) написана на языке Free Pascal.

А. Структуры данных

Структуры оформлены как классы на языке MATLAB.

Класс «Параметр» («ген»). Ген описывает один из параметров счётной программы многогипотезного алгоритма восстановления траектории.

Класс «Особь» предназначен для хранения генотипа (массив элементов класса «Параметр») одной особи популяции. Кроме генотипа, класс «Особь» содержит свойства, относящиеся к качеству особи, флаг «бессмертность», показатель максимального возраста особи, текущий возраст особи, параметры, описывающие предков особи.

Класс «Популяция» хранит массив особей популяции и некоторые параметры, связанные с общим качеством популяции.

В. Разгон алгоритма

Разгон алгоритма осуществляется от одной особи. После формирования одной особи происходит образование популяции на основе мутации: образуется некоторое количество особей, значения параметров которых отличаются от параметров первой особи.

С. Просчет новых особей

Просчёт новых особей организован при помощи счётной программы многогипотезного восстановления траектории ВС [1]–[3].

Задается идеальная модельная траектория, представляющая некоторое истинное движение ВС, которое содержит участки различных типов движения, характерных для гражданских воздушных судов. На основе этой траектории строится пакет треков измерений с разной реализацией случайных ошибок.

Каждая особь отличается генотипом, т.е., с точки зрения программы восстановления траектории, набором параметров. Соответственно, оценки текущего положения ВС, которые программа будет формировать при использовании параметров, будут разными.

После просчёта пакета траекторий счётная программа записывает файл результатов (восстановленные траектории), на основе которого MATLAB-скрипт формирует несколько оценок качества (критериев) конкретной особи, в том числе: максимальное отклонение восстановленной оценки от истинного положения по всем замерам всех траекторий и среднее по траекториям от среднеквадратичного отклонения восстановленной траектории от истинной.

На базе значений критериев определяется основной критерий — функция приспособленности особи h —

средневзвешенное от частных критериев. Смысл функции приспособленности: обобщенное отклонение восстановленной траектории от истинной.

Для всех критериев меньшее значение является лучшим. Размерность всех критериев — метры.

Также на основании критериев происходит присвоение особям признака бессмертности — если на особи реализуется минимум какого-то критерия по популяции, то такая особь помечается флагом «бессмертность».

Заметим, что число бессмертных особей может быть как меньше числа показателей (одна особь реализует минимум нескольких критериев), так и больше числа критериев (несколько особей имеют критерий, равный минимальному по популяции).

Максимальный назначенный возраст для каждой особи вычисляется на основе основного критерия h

$$H_{\min} = \min_A h, \quad H_{\max} = \max_A h,$$

$$T_L(h) = 1 + M_A \frac{H_{\max} - h + 1}{H_{\max} - H_{\min}}.$$

Здесь A — множество всех особей популяции, константа M_A — нормальный максимальный возраст, являющийся параметром алгоритма.

Д. Селекция

При селекции происходит уничтожение «старых» особей (возраст особи больше, чем T_L), кроме тех, у которых выставлен флаг «бессмертность». Если после уничтожения «старых» особей, количество особей превышает назначенное максимальное количество, производится уничтожение «престарелых особей», для которых разница между текущим возрастом и максимальным назначенным возрастом мала.

Е. Кроссинговер

Кроссинговеру могут подвергнуться любые две особи возрастом больше 2. При помощи генератора случайных чисел составляются пары особей. Пара особей формирует новую особь: каждый ген новой особи наследуется либо от первого, либо от второго родителя, порядок наследования выбирается генератором случайных чисел. Если получающийся генотип потомка оказывается клоном одного из родителей, то особь на основе такого генотипа не образуется.

Ф. «Направленное размножение»

Данный вид наследования вносит элемент прямого поиска в генетический алгоритм. Осуществляется попытка направленного генерирования генотипа потомка с лучшим (по сравнению с родителями) значением функции приспособленности h . Используется пара особей с разным значением h .

Идея алгоритма проиллюстрирована на рис. 1. Здесь A — генотип особи с большим значением функции h , B — генотип особи с меньшим (лучшим) значением

функции h . Если предположить непрерывную зависимость функции h от генотипа, то весьма вероятны зависимости, близкие либо к сплошной кривой (минимум между A и B), либо к пунктирной кривой (минимум за B , со стороны противоположной A) на левом рисунке.

Точка C выбирается на середине отрезка AB . Точка $D = 3B - 2A$ (продолжение вектора AB в направлении «за B »). Генотип потомка G случайным образом выбирается на параллелоипе CD .

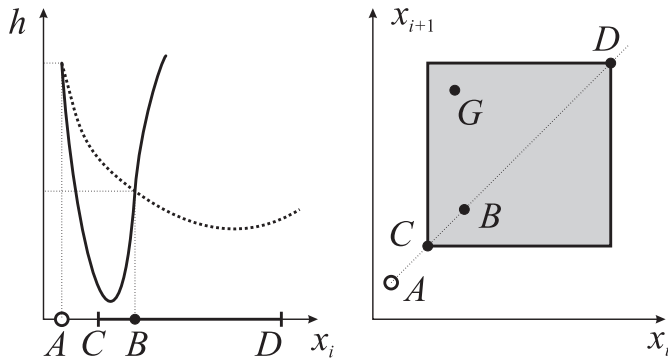


Рис. 1. Схематическая иллюстрация идеи метода «Направленное размножение»: слева — проекция на плоскость $x_i \times h$, справа — проекция на плоскость $x_i \times x_{i+1}$

Такое наследование хорошо работает в случае, когда генотип большинства особей в популяции находится достаточно далеко от локального минимума.

Г. Мутации

Бессмертные особи подвергаются мутации каждый жизненный цикл популяции, остальные особи подвергаются мутации с меньшей вероятностью.

Если назначенный срок жизни особи меньше, чем текущий возраст, то особь подвергается нормальной мутации: величина каждого гена случайным образом изменяется на величину не больше, чем текущий шаг варьирования этого гена.

Если возраст особи превышает назначенный срок жизни (такое возможно для бессмертных особей), то особь подвергается либо микромутации, либо макромутации.

Микромутацией называем мутацию, при которой величина каждого гена изменяется на случайную величину на два порядка меньшую, чем текущий шаг варьирования гена.

При макромутации происходит изменение величины только одного случайно выбранного гена, значение этого гена изменяется на случайную величину на два порядка большую, чем текущий шаг варьирования гена. В ряде случаев при макромутации мутируемый ген выбирается случайным образом по всей области возможных значений.

Такое поведение направлено на оживление генетического разнообразия в случае возможного «застоя» популяции.

IV. Результаты вычислений

Было проведено несколько вычислительных экспериментов по нахождению наилучших параметров много-гипотезного алгоритма. Приведем описание одного из них.

В качестве идеальной модельной траектории взята траектория продолжительностью 1100 с, состоящая из участков установившегося движения и переходных участков, максимальные ошибки восстановления для которых определены в нормативных материалах [6]. Пакет модельных траекторий состоял из 16 траекторий с СКО замеров 70 м, из них 10 траекторий не содержали выбросов, а 6 траекторий имели выбросы (в среднем каждое двадцатое измерение имело шум с повышающим коэффициентом 5).

Рассчитывался вариант с 19 варьируемыми параметрами (19 генов).

Вычисления велись на суперкомпьютере из состава СКЦ ИММ УрО РАН [4], одновременно использовалось до 40 вычислительных ядер, продолжительность вычислений составила немногим больше двух суток. За это время в генетическом алгоритме сменилось 419 поколений.

На рис. 2 показано как от поколения к поколению развивались значения функции приспособленности h . Каждая особь популяции представлена маркером (форма и цвет маркера зависит от способа образования особи). На рисунке представлена область с малыми значениями h .

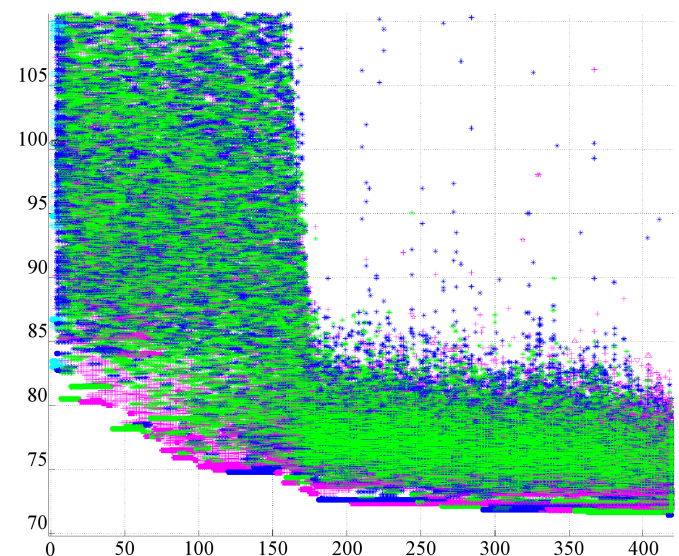


Рис. 2. График изменения значений функции приспособленности особи h в популяции в зависимости от поколения. Вертикальная ось — h («значение функции приспособленности»), м. Горизонтальная ось — номер поколения.

Рис. 3 иллюстрирует эволюцию популяции на примере гена `w0_penalty_cir`. Начальное значение гена было равно 0.01, в течение первых нескольких десятков

поколений большинство особей имело значение этого гена в районе $(0, 0.04)$. На участке между поколениями 100 и 150 значения гена были распределены по отрезку возможных значений более-менее равномерно. После поколения 150 большая часть особей стала иметь значения гена в диапазоне $(0.32, 0.36)$. В последнем поколении значение равное 0.3498 даёт наилучшее значение функции приспособленности h .

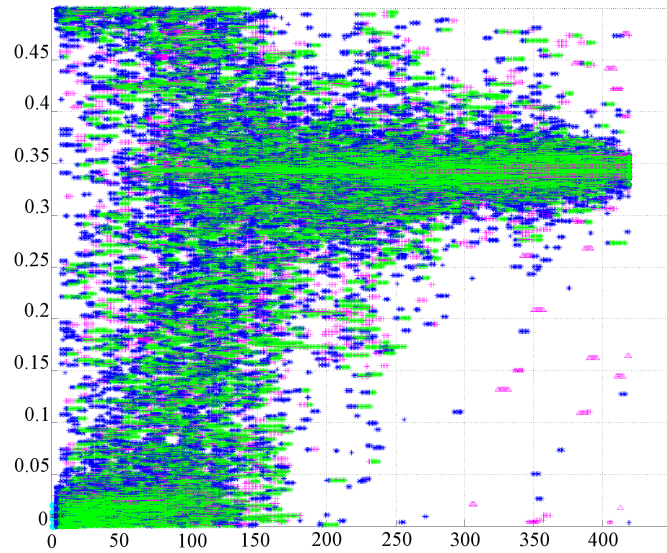


Рис. 3. Изменение распределения значений гена $w0_penalty_cir$ в популяции в зависимости от поколения

Рис. 4 показывает как улучшилась работа многогипотезного алгоритма при использовании вектора параметров, оптимизированного генетическим алгоритмом. Был взят пакет траекторий, полученный на основе той же идеальной модельной траектории, но состоящий из 100 траекторий с другой реализацией случайных ошибок, при этом 10 траекторий имели выбросы. Приведён график среднеквадратичного отклонения восстановленных точек от истинного движения по поперечному каналу. Результаты для оптимизированного вектора параметров показаны широкой сплошной линией. Результаты для исходного (неоптимизированного) вектора параметров представлены пунктирной линией. Тонкой сплошной линией показан график отклонения для треков замеров.

Благодарности

Авторы благодарят ООО «Фирма «НИТА» за постановку задачи и обсуждение полученных результатов.

При проведении работ был использован суперкомпьютер «Уран» ИММ УрО РАН.

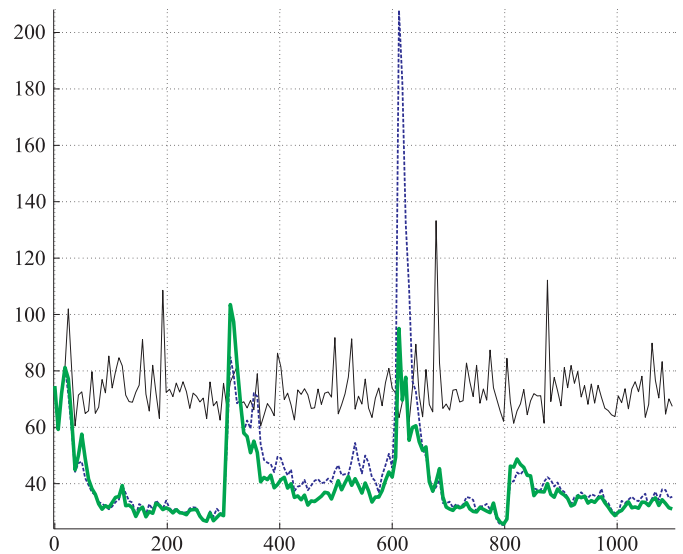


Рис. 4. Сравнение обработки модельных траекторий для исходных и улучшенных параметров. Использован пакет из 100 траекторий, не сопадающий по ошибкам с основным счетным пакетом, по которому работал генетический алгоритм

Список литературы

- [1] A. A. Fedotov and A. G. Ivanov, "Multi-hypothesis tracking algorithm for aircraft trajectory," Systems Analysis: Modeling and Control, abstracts of the International Conference in memory of Academician Arkady Kryazhimskiy, Ekaterinburg, IMM UB RAS, 2016, pp. 44–46.
- [2] D. A. Bedin, A. A. Fedotov, and A. G. Ivanov, "Recovering an aircraft trajectory by using the detection of the motion type," 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2018, St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2018, pp. 127–130.
- [3] A. G. Ivanov, D. A. Bedin, A. A. Fedotov, and S. A. Ganebnyi, "Fixed Types of Motion in Aircraft Trajectory Recovering," IFAC-PapersOnLine, 2018, vol. 51, iss. 32, pp. 889–894.
- [4] Центр коллективного пользования ИММ УрО РАН «Суперкомпьютерный центр ИММ УрО РАН» (СКЦ ИММ УрО РАН). <http://parallel.uran.ru/node/419>
- [5] M. Mitchell, An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, MA: MIT Press, 1996.
- [6] SUR.ET1.ST01.1000-STD-01-01: EuroControl standart document for radar surveillance in en-route airspace and major terminal areas. Edition 1.0, 1997. <https://www.eurocontrol.int/publications/eurocontrol-standard-radar-surveillance-en-route-airspace-and-major-terminal-areas>