



Институт математики
и механики
им. Н.Н. Красовского

«Устойчивость, управление, дифференциальные игры» (SCDG2019)

Материалы Международной конференции, посвященной 95-летию со дня рождения академика Н.Н. Красовского

Екатеринбург, 16–20 сентября 2019 г.

“Stability, Control, Differential Games” (SCDG2019)

Proceedings of the International Conference
devoted to the 95th anniversary
of Academician N.N. Krasovskii

Yekaterinburg, Russia, 16–20 September 2019

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского
Уральского отделения Российской академии наук

**«Устойчивость, управление,
дифференциальные игры» (SCDG2019)**

Материалы Международной конференции,
посвященной 95-летию со дня рождения академика
Н.Н. Красовского

Екатеринбург, 16–20 сентября 2019 г.

**“Stability, Control, Differential Games”
(SCDG2019)**

Proceedings of the International Conference
devoted to the 95th anniversary of Academician
N.N. Krasovskii

Yekaterinburg, Russia, 16–20 September 2019

УДК 517.977

ББК 22.161.8

«Устойчивость, управление, дифференциальные игры» (SCDG2019): Материалы Международной конференции, посвященной 95-летию со дня рождения академика Н.Н. Красовского, (Екатеринбург, 16–20 сентября 2019 г.). — Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2019. — 466 с.

Редакторы: В.И. Максимов, А.М. Тарасьев, Т.Ф. Филиппова

Конференция проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-01-20057) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

UDC 517.977

LBC 22.161.8

“Stability, Control, Differential Games” (SCDG2019): Proceedings of the International Conference devoted to the 95th anniversary of Academician N.N. Krasovskii, Yekaterinburg, Russia, 16–20 September 2019.

Editors: T.F. Filippova, V.I. Maksimov, A.M. Tarasyev

Published by: Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMM UB RAS), Yekaterinburg, Russia

The conference is supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) under project 19-01-20057 and by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

ISBN 978-5-8295-0652-0

© ИММ УрО РАН / IMM UB RAS 2019

Lower Bound of Accuracy of Unbiased Estimates of the End of Trajectory for Motion with Switching

Dmitrii A. Bedin

IMM UB RAS, Ekaterinburg, Russia, bedin@imm.uran.ru

Abstract: The lower bound of the error of an unbiased estimate for the problem of resurrection of the end state of a trajectory is elaborated by means of Hammersley–Chapman–Robbins inequality.

УДК 528.088.6, 621.396.969.1

Применение генетического подхода для нахождения оптимальных параметров восстановления траектории воздушного судна

Д.А. Бедин¹, А.Г. Иванов²

¹ УрФУ, Екатеринбург, Россия, bedin@imm.uran.ru

² ИММ УрО РАН, Екатеринбург, Россия, iagsoft@imm.uran.ru

Аннотация: Ранее в ИММ УрО РАН был разработан многогипотезный алгоритм восстановления траектории воздушного судна (ВС), показывающий хорошую точность в условиях выбросов замеров. Для нахождения оптимальных значений многочисленных параметров алгоритма использован генетический алгоритм. В критерии качества включены требования стандартов ГОСТ. Оптимизированные параметры позволили улучшить точность восстановления траектории.

Ключевые слова: генетический алгоритм, подбор параметров, восстановление траектории.

1. Многогипотезный алгоритм

Многогипотезный алгоритм восстановления траектории [1, 2] позволяет получить оценку положения ВС в реальном времени. Его работа основывается на поддержании некоторого пучка возможных траекторий ВС. Эти траектории совместны с общими ограничениями на динамику ВС, с историей наблюдений и возможными ошибками измерений. Итоговая оценка положения получается путём взвешенного усреднения конечных положений для каждой траектории из пучка.

Вес траектории выбирается исходя из качества приближения измерений.

Алгоритм показал хорошие результаты обработки модельных и реальных данных, включая данные с выбросами. Реальные данные были предоставлены фирмой «НИТА» (Санкт-Петербург).

Особенностью алгоритма является наличие большого количества настроечных параметров, от которых зависит его работа: выбор весов, инициация ответвлений от возможных траекторий, прореживание пучка траекторий. Для всех этих параметров необходимо установить значения, дающие хорошую производительность алгоритма в целом.

2. Генетический алгоритм подбора параметров

Для подбора оптимальных параметров алгоритма восстановления траектории был создан генетический алгоритм с элементами многокритериальности, который подробно описан в [3].

Обучение генетического алгоритма происходило по пакету модельных треков (последовательностей измерений во времени), сформированных на основе одной идеальной траектории. При этом идеальная траектория содержит участки с различными типами движения, характерные для движущегося ВС как на трассах, так и на подходе к аэродрому. Модельные треки из пакета отличаются друг от друга величиной случайной ошибки, шагом поступления замеров, наличием или отсутствием выбросов.

В качестве критериев качества работы алгоритма восстановления траектории было использовано несколько показателей, зависящих от невязок в моменты замеров. Два наиболее важных показателя — среднее и максимальное отклонения:

$$\rho_{\text{mean}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \frac{r_j(t_{j,i})}{w_{j,i}}, \quad (1)$$

$$\rho_{\text{max}} = \max_{j=1,m} \max_{i=1,n_j} \frac{r_j(t_{j,i})}{w_{j,i}}. \quad (2)$$

Здесь $r_j(t_{j,i})$ — невязка, то есть расстояние между восстановленной траекторией (для модельного трека j) и идеальной траекторией в момент замера $t_{j,i}$; n_j — количество замеров в модельной траектории j ;

m — количество модельных траекторий в пакете; $w_{j,i}$ — вес, соответствующий i -му замеру на траектории j .

Оптимизируемая алгоритмом функция (функция фитнеса) является суммой показателей типа (1), (2), взятых с постоянными коэффициентами.

3. Учёт стандартов качества в восстановлении траектории

Применение генетического алгоритма позволило улучшить точность восстановления траектории ВС по сравнению с точностью алгоритма с параметрами по умолчанию (см. [3]). При этом в критериях (1), (2) использовались единичные веса $w_{j,i}$, что соответствует простым геометрическим среднему и максимальному оптимизируемым расстояниям.

Однако из инженерной практики известно, что различные участки траектории ВС не могут быть восстановлены одинаково: во время поворота или ускоренного движения качество восстановления хуже, чем во время прямолинейного равномерного движения, а резкое изменение типа движения (с прямой на поворот, например) всегда вызывает характерный «всплеск» ошибки. Такое знание нашло отражение в стандартах качества, которые требуют органы контроля за воздушным движением от алгоритмов восстановления [4, 5].

Было решено изменить веса $w_{j,i}$ в формулах (1), (2) так, чтобы они отражали требуемое по стандарту качество восстановления. В частности, более строго оценивали прямолинейные равномерные участки и менее строго переходы между режимами движения. Алгоритм был изменён, была написана подпрограмма автоматического вычисления весов $w_{j,i}$ в соответствии с ГОСТ [4], позволяющая не задавать веса вручную при изменении опорной истинной траектории. Внесенные изменения позволили улучшить качество восстановления траектории и привести поведение алгоритма к более «стандартному» с точки зрения диспетчеров, наблюдающих за ВС.

На рис. 1 показан график показателя $\rho_{\text{mean}}(t) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{r_j(t)}{w(t)}$ для тестовой траектории ВС (отличается от той, на которой проходило обучение). Толстая красная линия, расположенная на уровне 1, приведена для сравнения: если некоторый алгоритм даёт качество ниже её, это означает, что на данном участке движения восстановление

идёт лучше ГОСТа, если выше — то, наоборот, хуже. Зелёной линией показана производительность многогипотезного алгоритма в случае, когда в формулах (1), (2) выбирались единичные веса (соответствует работе [3]). Синяя линия изображает график качества работы текущего алгоритма с весами, соответствующими ГОСТу [4]. Красной тонкой линией показана производительность популярного алгоритма IMM (Interacting Multiple Model), ставшего де-факто стандартом в восстановлении траекторий для ВС. Чёрным цветом для сравнения изображена линия, соответствующая «сырым» измерениям, когда само измерение используется как оценка положения ВС.

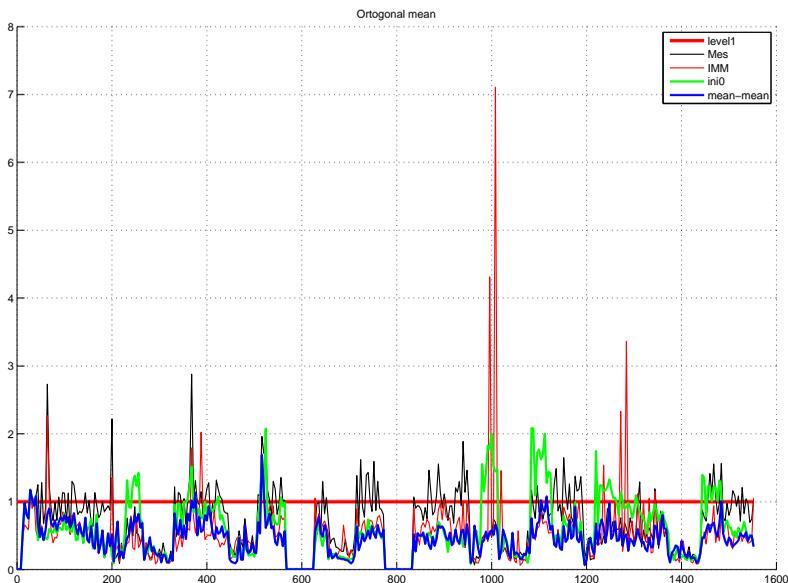


Рис. 1. Средняя относительная точность $\rho_{\text{mean}}(t)$ для поперечного канала. Тестовая траектория

Работа выполнена в рамках проекта «Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники» по проведению фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым президиумом Российской академии наук.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bedin D.A., Fedotov A.A., Ivanov A.G.* Recovering an aircraft trajectory by using the detection of the motion type // 25th St.-Petersburg Int. Conf. on In-

- egrated Navigation Systems, ICINS 2018. Proceedings. Ed. V.G. Peshekhonov. SPb.: State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2018. P. 127–130.
2. *Ivanov A.G., Bedin D.A., Fedotov A.A., Ganebnyi S.A.* Fixed types of motion in aircraft trajectory recovering // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, no. 32. P. 889–894.
 3. *Бедин Д.А., Иванов А.Г.* Использование генетического алгоритма для определения параметров многогипотезного алгоритма восстановления траектории воздушного судна // Сб. материалов XXVI Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. Ред. В.Г. Пешехонов. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2019. С. 87–90.
 4. Проект стандарта «Обработка информации наблюдения в средствах автоматизации управления воздушным движением единой системы организации воздушного движения Российской Федерации. Технические требования» (первая редакция). Филиал «НИИ Аэронавигации». М.: ФГУП ГосНИИ ГА, 2014. 24 с. http://www.atminst.ru/up_files/proekt%201-red_standart.pdf
 5. 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. <http://www.eurocontrol.int/publications/eurocontrol-standard-radar-surveillance-en-route-airspace-and-major-terminal-areas>

Using a Genetic Approach to Find the Optimal Parameters of the Aircraft Tracking

Dmitrii A. Bedin¹, Alexey G. Ivanov²

¹ UrFU, Ekaterinburg, Russia, bedin@imm.uran.ru

² IMM UB RAS, Ekaterinburg, Russia, iagsoft@imm.uran.ru

Abstract: A multi-hypothetical algorithm for aircraft tracking was previously developed at the Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The algorithm gives good accuracy in the presence of outliers. To find the optimal values of the numerous parameters of the algorithm, a genetic algorithm was used. The quality standards of the government regulatory agencies were included in the performance criterion. Optimized parameters allowed to improve accuracy of the trajectory tracking.
