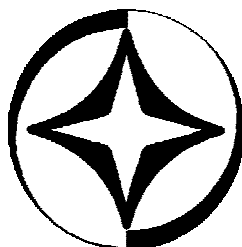


ЮБИЛЕЙНАЯ
XXV САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ИНТЕГРИРОВАННЫМ
НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ



28 – 30 мая 2018

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**

Восстановление траектории воздушного судна с использованием детектирования типа движения*

Дмитрий Бедин, Алексей Иванов, Андрей Федотов

Отдел динамических систем

ИММ УрО РАН

Екатеринбург, Россия

Email: {bedin, iagsoft}@imm.uran.ru, andreyfedotov@mail.ru

Аннотация—Описывается алгоритм восстановления траектории воздушного судна, основанный на построении пучка траекторий, представляющих собой наиболее возможные варианты истинной траектории движения. Особенностью алгоритма является процедура детектирования текущего типа движения, которая позволяет улучшить точность определения координат на участках установившегося движения. Приведены результаты работы алгоритма на модельных данных.

Ключевые слова—восстановление траектории; многогипотезный алгоритм

Рассматривается задача восстановления траектории воздушного судна (ВС) по поступающим радиолокационным замерам в режиме «он-лайн»: после поступления очередного замера алгоритм должен как можно быстрее выдать оценку текущего положения ВС. Основную трудность в задаче составляет то, что объект движется нестационарно — совершает манёвры, характеристики и продолжительность которых неизвестны для наблюдателя. При этом возможны длительные участки постоянства движения, на которых траектория ВС хорошо приближается какой-то одной простой моделью. На таких участках важно, чтобы алгоритм восстановления давал точность, близкую к точности алгоритмов, специально рассчитанных на этот конкретный тип движения. Кроме того, для работы в реальных условиях важна устойчивость к «выбросам» в измерениях — в реальных данных имеется большое количество сбоев, которые могут привести к «потере траектории» алгоритмом восстановления.

Несмотря на уже имеющиеся решения [1], [2], постоянно появляются работы, посвященные различным аспектам описываемой задачи, см., например [3]. В них рассматривается траекторная обработка не только движения ВС, но и других объектов, применяются различные математические методы, в том числе связанные с использованием нескольких моделей движения (см., например, [4]). Эффективность последнего подхода в первую очередь обусловлена своевременным детектированием типа движения (участка манёвра).

В данной работе рассматривается один из возможных вариантов решения задачи восстановления траектории. Приведены результаты обработки типовых модельных данных.

Работа выполнена в рамках сотрудничества ИММ УрО РАН с компанией ООО «Фирма “Новые информационные технологии в авиации”» (Фирма «НИТА», Санкт-Петербург).

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Основной конструкцией алгоритма является набор (пучок) «наиболее вероятных» траекторий ВС, который строится с учетом динамики ВС и возможных выбросов измерений. Концы траекторий пучка используются для построения оценки положения ВС, выдаваемой как результат работы алгоритма для текущего времени.

Считается, что движение воздушного судна происходит в горизонтальной плоскости. При описании движения ВС использовалась стандартная модель простейшего движения самолета [5], [6] (x, z — координаты на плоскости, φ — путевой угол, v — величина скорости):

$$\dot{x} = v \cos \varphi, \quad \dot{z} = v \sin \varphi, \quad \dot{\varphi} = u/v, \quad \dot{v} = w.$$

Уравнения динамики в случае постоянных продольного w и поперечного u управлений интегрируются аналитически [7]. Каждая траектория пучка соответствует динамике и кусочно-постоянным управлениям u, w . При этом предполагается, что участки постоянства не могут быть по продолжительности меньше, чем некоторое заданное ограничение.

В начале работы происходит «разгонка» пучка по нескольким первым замерам. Затем происходит выполнение основного цикла, каждая итерация которого начинается при поступлении нового замера.

Пучок треков пересчитывается с использованием измерений из бегущего по времени окна фиксированной длительности, оканчивающегося на последнем замере. Пересчет запускается при каждом вновь поступившем измерении. Формирование пучка траекторий производится с целью обеспечения максимальной представительности различных вариантов движения.

Для каждой траектории пучка вычисляется показатель соответствия измерениям, учитывающий расстояние

между траекторией и замерами, а также дополнительные штрафы.

Используется несколько показателей с различными свойствами. Общие для всех свойства:

- чем «ближе» траектория к замерам, тем меньше значение показателя;
- если траектория точно проходит по замерам, значение показателя равно нулю.

Дополнительно начисляются штрафы:

- за выход из ограничения по максимальному абсолютному значению поперечного и продольного управлений;
- если длительность промежутка постоянного управления меньше заданного значения;
- если длительность двух смежных промежутков постоянного управления меньше заданного значения;
- если значение модуля скорости ВС мало или велико;
- если движение не соответствует типу, определенному детектором движения.

II. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ АЛГОРИТМА

Продление треков при поступлении нового замера, подрезка треков на длину окна. На этом этапе происходит расчет прогнозного положения всех треков на момент вновь поступившего замера. Последний промежуток постоянного управления продлевается до момента текущего замера. С другой стороны, треки укорачиваются по времени со стороны старых измерений, чтобы общая продолжительность трека не превышала заданного значения.

Ветвление при поступлении нового замера. Ветвление — это процедура, в которой для каждой траектории строятся возможные варианты ее продолжения с измененными (по отношению к исходной траектории) управлениями. При этом есть непрерывная «склейка» ответвления с базовой траекторией в промежуточной точке. Выбирая на исходной траектории разные точки ответвления и различные значения управления на участке после ответвления, получаем различные варианты траектории. Из всех возможных вариантов далее в пучке будет оставлено лишь несколько. Критерий выбора — наилучшее значение показателя для ответвившейся траектории.

Один из вариантов ответвления — траектория, приходящая точно в точку последнего замера. Для её построения используется решение вспомогательной задачи о переводе в точку, изложенное в [7]. Используются и другие варианты: ответвление с нулевым управлением и ответвления на случайные точки рядом с последним замером. Ответвление с нулевыми значениями управлений призвано улучшить приближение замеров на участках, где

ВС заканчивает маневр и начинает двигаться равномерно и прямолинейно.

На этом же этапе формируются специальные траектории «прямая по МНК» и «окружность по МНК», которые вычисляются без использования какой-либо траектории пучка как базовой. При этом минимизируется среднеквадратичное отклонение конструируемой траектории от замеров. «Прямая по МНК» предполагает постоянное продольное ускорение и нулевое поперечное ускорение. «Окружность по МНК» строится при нулевом продольном ускорении и постоянном поперечном ускорении.

Предварительное прореживание треков пучка. На этом этапе удаляются траектории, которые плохо согласуются с имеющимися замерами и с физическими ограничениями на траектории пучка.

Выборочная оптимизация траекторий. Под оптимизацией понимается варьирование значений управлений и моментов переклечения между участками постоянного управления. Применяется процедура прямого поиска минимума многомерной функции. Процедура оптимизации, будучи примененной ко всем траекториям, приводит к не очень хорошим результатам в связи с «утончением» пучка и потерей многогипотезности. Поэтому оптимизация проводится только по небольшому числу траекторий с наилучшим значением показателя соответствия.

Расчет оценки текущего положения ВС. В каждый момент, когда поступает замер, алгоритм в качестве выхода должен выдавать оценку положения ВС. С этой целью используется усреднение положений на этот момент для траекторий, составляющих пучок.

Формирование оценки текущего положения при помощи показателя соответствия, использованного для основных процедур развития пучка, дает не всегда хорошие результаты. В описываемой версии оценка текущего положения генерируется с использованием весов, полученных на основе других показателей качества.

В формировании оценки участвуют не все наличные траектории пучка, а только те, для которых значение основного критерия соответствия мало. Для каждой траектории вычисляется ее вес. В зависимости от детектированного типа текущего движения вес траекторий «по МНК» может быть принудительно увеличен.

Группировка и прореживание треков. Задача этого алгоритма — уменьшить количество треков в пучке при одновременном сохранении представительности разных гипотез о движении ВС. В матрице взаимных расстояний между треками пучка определяется пара траекторий с минимальным расстоянием, траектория с худшим показателем соответствия из этой пары удаляется из пучка. Затем снова ищется пара траекторий с минимальным расстоянием и т.д. Процедура продолжается до тех пор, пока количество траекторий не станет меньше заданного числа.

III. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТИПА ДВИЖЕНИЯ

Для детектирования типа движения разработана следующая схема. Основной алгоритм формирует оценку ускорений: продольного и поперечного. Каждое из них анализируется отдельно особым алгоритмом, который в дальнейшем будем называть «детектором». Цель детектора — обнаружить, что сигнал, подаваемый ему на вход, близок к постоянному, либо наоборот, обнаружить его резкое изменение после периода постоянства.

Рассмотрим детектор более подробно. Пусть в дискретные моменты времени t_i измеряется некоторая функция $u(t)$, ее значение в момент t_i будем обозначать u_i . Обозначим через t_f текущее время, для которого проводится анализ, индекс f для других величин будет означать, что они соответствуют этому времени.

У детектора есть два режима: режим поиска постоянства $u(t)$ и режим поиска ухода от постоянства $u(t)$.

A. Поиск участка постоянства

Цель работы в этом режиме — определить, что функция $u(t)$ близка к постоянной на участке начиная с некоторого времени t_c до текущего момента t_f . Работа идет на основе построения средних значений по системе отрезков от текущего времени t_f на определенную глубину. А именно, $\bar{u}_i = \sum_{j=i}^f u_j / (f - i + 1)$ — среднее значение на отрезке $[t_i, t_f]$ от момента времени t_i до момента t_f . Далее рассматривается система вложенных отрезков $[t_f]$, $[t_{f-1}, t_f]$, ..., $[t_{f-N}, t_f]$ на максимальную глубину N (длина окна в основном алгоритме). Обозначим через $[\cdot]$ операцию «индикатор», которая возвращает 1, если выражение внутри скобок истинно, и 0, если ложно.

В алгоритме предусмотрен анализ величины $\xi_i = \sum_{j=i}^f [|u_j - \bar{u}_j| \leq \delta_u]$. Величина имеет следующий смысл: сколько раз, начиная с момента t_i , до момента t_f значение функции u_i хорошо «предсказывалось» средним значением по моментам справа от t_j (критерий «хорошего предсказания» — нахождение в коридоре ширины δ_u).

Рассматривается последовательность величин ξ_i на некоторую заданную глубину n от текущего времени: ξ_f , ξ_{f-1} , ..., ξ_{f-n} ($n < N$). В случае, если $\xi_{f-n} > m$, где m — наперед заданное число, принимается решение, что наблюдаемая функция $u(t)$ обладает постоянным

участком, заканчивающимся в текущей точке t_f . Оценка t_c времени начала постоянного участка принимается исходя из условия $c = \max \{i : \xi_i = m\}$.

Работа алгоритма полностью определяется константами: δ_u — ширина коридора; n — глубина просмотра назад для формирования признаков ξ_i ; m — количество «хороших предсказаний», достаточное для принятия решения. Алгоритм на настоящий момент не имеет полного теоретического обоснования, но показал хорошие результаты на тестах.

B. Поиск момента выхода из участка постоянства

Реальные траектории ВС состоят из участков постоянства управлений. Каждый такой участок является ограниченным. Если детектор определил, что функция $u(t)$ находится на участке постоянства, запускается алгоритм, следящий за возможным его окончанием. Алгоритм основан на сравнении текущего значения u_f со средним значением $\hat{u}_f$, посчитанным по моментам времени слева от t_f на глубину $c' = \max \{c, f - N\}$:

$$\hat{u}_f = \frac{1}{f - c'} \sum_{j=c'}^{f-1} u_j.$$

Здесь c — индекс момента времени t_c , определенного как начало постоянного участка.

По значению $\hat{u}_f$ производится вычисление признака «выход из коридора»: $\zeta_f = \sum_{j=i}^f [|u_f - \hat{u}_f| > \delta_u]$. Если признак не выполнен, то есть $\zeta_f = 0$, делается вывод, что в момент t_f участок постоянства продолжается.

Если $\zeta_f = 1$, то это может быть по разным причинам:

- участок постоянства функции $u(t)$ на самом деле закончился;
- произошел выброс в данных — значение u_f содержит большую ошибку.

Для того, чтобы исключить влияние выбросов, было принято следующее правило. В случае, если $\zeta_f = 1$, запоминается среднее значение $\hat{u}$ функции $u(t)$ слева от t_f , то есть выполняем присваивание $\hat{u} = \hat{u}_f$.

Затем, при поступлении последующих значений u_{f+1} , u_{f+2} , ... функции $u(t)$, они сравниваются не с $\hat{u}_{f+1}$, $\hat{u}_{f+2}$, ..., соответственно, а с «замороженным» значением $\hat{u}$. Делается это для того, чтобы исключить

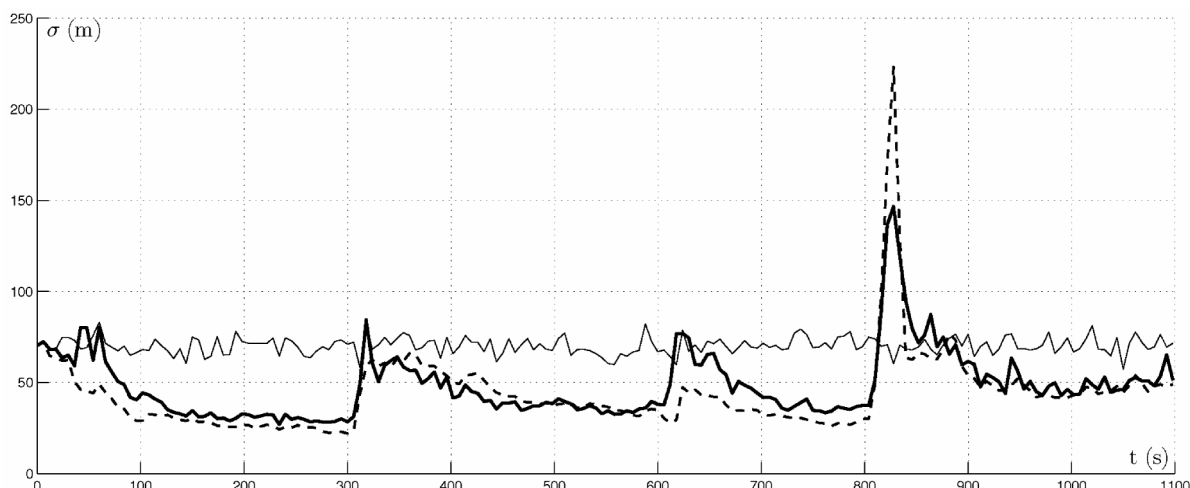


Fig. 1. График среднеквадратичного продольного отклонения σ в зависимости от времени. Широкая сплошная линия — описываемый алгоритм. Толстая пунктирная линия — метод IMM. Тонкая сплошная линия — трек замеров.

влияние выбросов или резкого изменения на $\hat{u}$, которое должно отражать значение функции на последнем участке постоянства. По правилу $\zeta_i(\hat{u}) = [|u_i - \hat{u}| > \delta_u]$ вычисляются признаки $\zeta_{f+1}(\hat{u})$, $\zeta_{f+2}(\hat{u})$, ..., $\zeta_{f+k}(\hat{u})$ на глубину k . Вычисления обрываются, если $\zeta_{f+i}(\hat{u}) = 0$, то есть функция вернулась к своему нормальному значению. Если все значения $\zeta_{f+1}(\hat{u})$, $\zeta_{f+2}(\hat{u})$, ..., $\zeta_{f+k}(\hat{u})$ подряд равны 1, принимается решение, что участок постоянства закончился. Время t_f при этом запоминается.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сформирована идеальная модельная траектория, состоящая из участков установившегося движения и переходных участков, максимальные ошибки восстановления для которых определены в нормативных материалах [8]. Для этой траектории было сформировано 100 модельных траекторий замеров со среднеквадратическим отклонением 70 м. По каждой из них было произведено восстановление траектории при помощи описанного алгоритма. Построены графики среднеквадратичного отклонения восстановленных точек от истинного движения. График зависимости продольного отклонения от времени приведен на Fig. 1 (сплошная широкая линия). Также приведен аналогичный график для алгоритма взаимодействующих моделей [1], [2] (Interacting Multiple Model — IMM) (пунктирная линия). Тонкой сплошной линией показан график отклонения для треков замеров.

В случае обработки траекторий с выбросами (редкими большими отклонениями, не укладывающимися в рамки исходного распределения) преимущество предлагаемого алгоритма оказывается более заметным.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа подготовлена при поддержке программы президиума РАН №30 «Теория и технологии многоуровневого децентрализованного группового управления в условиях конфликта и кооперации».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Bar-Shalom, Y. Estimation with applications to tracking and navigation: Theory Algorithms and Software / Y. Bar-Shalom, X.R. Li, T. Kirubarajan. John Wiley & Sons, 2004. P. 584.
- [2] Коновалов, А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации // Известия ТулГУ. Технические науки, 2014. Ч. 2. 180 с.
- [3] Бортников, А.А. Алгоритм совместной траекторной обработки радиолокационной информации // Известия ТулГУ. Технические науки, 2014, вып. 12. Ч. 2. С. 182–189.
- [4] Гуторов, А.С. Алгоритмы траекторной фильтрации сигналов многопозиционных радиолокационных комплексов: дис. канд. техн. наук: Ульяновский государственный технический университет. Ульяновск, 2017, 143 с.
- [5] ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. Издание официальное. М.: Госкомстандарт, 1980.
- [6] Ахмедов, Р.М. Автоматизированные системы управления воздушным движением / Р.М. Ахмедов, А.А. Бибутов, А.В. Васильев [и др.]; под ред. С.Г. Пятко, А.И. Красова. СПб: Политехника, 2004. 446 с.
- [7] Бедин, Д.А. Восстановление траектории самолета по неточным измерениям / Д.А. Бедин, В.С. Пацко, А.А. Федотов, А.В. Беляков, К.В. Строков // Автоматика и телемеханика, 2010, № 2, С. 17–30.
- [8] SURET1.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>