

9-я РОССИЙСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ



4–6 октября 2016 г.
ГНЦ РФ АО "КОНЦЕРН "ЦНИИ "ЭЛЕКТРОПРИБОР"
Санкт-Петербург

**МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ВКЛЮЧАЕТ В СЕБЯ ТРИ КОНФЕРЕНЦИИ,
ОБЪЕДИНЕННЫЕ ОБЩЕЙ ИДЕЕЙ:**

**XXX КОНФЕРЕНЦИЯ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ КОНСТРУКТОРА
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ Н. Н. ОСТЯКОВА**

9-я КОНФЕРЕНЦИЯ "ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ"
(ИТУ-2016)

КОНФЕРЕНЦИЯ "УПРАВЛЕНИЕ В МОРСКИХ И АЭРОКОСМИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ" (УМАС-2016)

МАТЕРИАЛЫ

**XXX КОНФЕРЕНЦИИ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ КОНСТРУКТОРА
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ Н. Н. ОСТЯКОВА**

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ (ИТМО)
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»
ИМЕНИ В. И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
ФГБОУ ВО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Э. БАУМАНА»
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ) (МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА)
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИПМАШ РАН)
ВУНЦ ВМФ «ВОЕННО-МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ ИМ. АДМИРАЛА ФЛОТА СОВЕТСКОГО СОЮЗА Н. Г. КУЗНЕЦОВА»

9-я РОССИЙСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРЕЗИДИУМА МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИИ
АКАДЕМИК РАН В. Г. ПЕШЕХОНОВ**



**4 – 6 октября 2016 г.
ГНЦ РФ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
Санкт-Петербург**

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

- РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (РФФИ)
- ОТДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РАН
- ОТДЕЛЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАН
- МЕЖДУНАРОДНОЙ ОБЩЕСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
«АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ»
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ГРУППЫ РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА
ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ
- ЖУРНАЛА «ГИРОСКОПИЯ И НАВИГАЦИЯ»

**МАТЕРИАЛЫ XXX КОНФЕРЕНЦИИ
ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ КОНСТРУКТОРА
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ Н.Н.ОСТРЯКОВА**

Санкт-Петербург
2016

УДК 531.383+621.396.98+527+629.196.3+531.5

Материалы XXX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – 506 с.

В настоящем сборнике опубликованы доклады, включенные в программу XXX конференции памяти Н.Н.Острякова, проводимой в рамках 9-й Российской мультikonференции по проблемам управления.

В докладах представлен круг вопросов, связанных с гироскопическими чувствительными элементами систем навигации и управления, гироскопическими и интегрированными инерциально-спутниковыми системами, обработкой навигационной информации и управлением движением, электроникой, автоматикой и вычислительной техникой бортовых систем управления и навигационных комплексов.

В секции 3 работает подсекция, доклады которой посвящены проблеме измерения геофизических полей и их применения в задачах навигации.

Тексты докладов публикуются в авторской редакции.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ
ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА XXX КОНФЕРЕНЦИИ ПАМЯТИ Н. Н. ОСТРЯКОВА
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
АКАДЕМИК РАН **В. Г. ПЕШЕХОНОВ**

ЧЛЕНЫ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА КОНФЕРЕНЦИИ:

Г. И. Емельянцев	Ю. А. Литманович
В. М. Зиненко	Н. А. Лукин
Д. М. Климов	А. В. Соколов
Н. В. Колесов	А. И. Соколов
С. Ф. Коновалов	О. А. Степанов
Д. А. Кошаев	Ю. В. Филатов
Б. Е. Ландау	Б. Л. Шарыгин

АЛГОРИТМ МНОГОГИПОТЕЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА

А. Г. Иванов¹, А. А. Федотов²

ФГБУН Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург.
E-mail: iagsoft@imm.uran.ru

Ключевые слова: восстановление траектории, задача наблюдения, пучок пробных траекторий, выбросы замеров

Описывается алгоритм восстановления траектории воздушного судна, основанный на построении пучка траекторий, представляющих собой наиболее возможные варианты истинной траектории движения. При поступлении очередного замера запускаются процедуры ветвления пучка, генерации оценки текущего положения, процедуры прореживания пучка и т.д. Предложены варианты задания расстояния между траекториями и последовательностью замеров. Приведены результаты работы алгоритма на модельных и реальных данных.

Введение

Рассматривается задача восстановления траектории воздушного судна (ВС) по поступающим радиолокационным замерам в режиме «онлайн»: после поступления очередного радиолокационного замера алгоритм должен «мгновенно» выдать оценку положения ВС. Несмотря на уже имеющиеся решения [1, 2], постоянно появляются работы, посвященные различным аспектам этой задачи, см. например [3].

В предлагаемом алгоритме производится построение пучка траекторий, которые представляют собой наиболее возможные варианты траекторного движения ВС. При пересчёте в бегущем по времени окне совокупность замеров РЛС аппроксимируется траекториями пучка. Для каждой траектории это делается слегка отличающимся способом с целью представления различных вариантов движения ВС, совместимых с его динамическими возможностями. При поступлении очередного замера операция по пересчёту пучка треков заключается в последовательном запуске нескольких процедур: ветвление пучка, генерация оценки текущего положения ВС, группировка-прореживание пучка и т.д.

Предложены различные варианты задания расстояния между траекториями пучка и последовательностью замеров, при этом обеспечивается устойчивость к возможным «выбросам» радиолокационных замеров. Критерий качества траектории складывается из расстояния между ней и последовательностью замеров и может включать штрафы за использование управлений, не соответствующих ограничениям, а также штрафы за частое изменение значений управления. Показатель соответствия определяет «выживаемость» траектории пучка: траектории с хорошим показателем остаются в пучке, траектории с плохим показателем удаляются из пучка.

Проанализирована точность работы алгоритма на модельных данных. Приводятся результаты работы на реальных треках РЛС.

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

Общее описание алгоритма

Считается, что движение воздушного судна (ВС) происходит в горизонтальной плоскости. Наблюдение за движением производится радиолокатором (РЛС). Рассчитывается набор (пучок) «наиболее вероятных» траекторий ВС (с учётом динамических параметров ВС и возможных выбросов измерений).

В начале работы происходит «разгонка» пучка по нескольким первым замерам. При этом в качестве текущих оценок траектории, выдаваемой потребителю, используются сами замеры. Затем происходит выполнение основного цикла, каждая итерация которого начинается при поступлении нового замера. Выполнение цикла прекращается по окончании замеров.

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

При описании движения ВС по траектории авторы использовали стандартные модели [4, 5].

¹ Главный программист.

² Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник.

Динамика задаётся следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cos \varphi, \\ \dot{z} &= v \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} &= \frac{u}{v}, \\ \dot{v} &= w.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь x, z — координаты положения на плоскости; путевой угол φ — угол на плоскости между вектором скорости и осью x ; v — величина скорости ($v > 0$); u — боковое ускорение; w — продольное ускорение.

Уравнения динамики в случае постоянных управлений u и w интегрируются аналитически [6].

Каждая траектория из пучка удовлетворяет уравнениям динамики (1) и однозначно определяется начальными параметрами (начальное время, начальные координаты в плоскости движения ВС, вектор начальной скорости) и параметрами одного или нескольких участков постоянного управления, ассоциированных с траекторией. Участок постоянного управления характеризуется временами начала и конца управления, а также значениями продольного и поперечного управлений на этом участке.

Обобщённая блок-схема алгоритма приведена на рис. 1. Состояние пучка или установка параметров алгоритма могут приводить к пропуску некоторых пунктов блок-схемы.

Критерии соответствия траектории пучка имеющимся замерам

Для оценки соответствия траектории из пучка имеющимся замерам для каждой траектории пучка вычисляется критерий соответствия (далее — «показатель»), учитывающий расстояние между траекторией и группой замеров, а также дополнительные штрафы.

Сконструировано несколько показателей с различными свойствами. Общие свойства всех показателей (без учёта штрафов):

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

Далее в этом разделе нижний индекс z относится к замеру, нижний индекс t ставится у точки траектории пучка, соответствующей времени замера. Суммирование происходит по всем замерам внутри расчётного окна (n — число замеров в окне). Расстояние r между замером и траекторией — Евклидово

расстояние в плоскости: $r = \sqrt{(x_t - x_z)^2 + (z_t - z_z)^2}$.

В а р и а н т 1 задания расстояния состоит из суммы поточечных расстояний между замерами и соответствующими точками траектории: $I_1 = \frac{1}{n} \sum_z r$

Показатель 2 суммирует квадраты расстояния между замерами и соответствующими точками траектории:

$$I_2 = \frac{1}{n} \sum_z r^2$$

Показатель 3 не учитывает малые расстояния между замерами и соответствующими точками траектории (r_d — зона нечувствительности):

$$f_3(r) = \begin{cases} 0, & r \leq r_d \\ (r - r_d)^2, & r \geq r_d \end{cases},$$

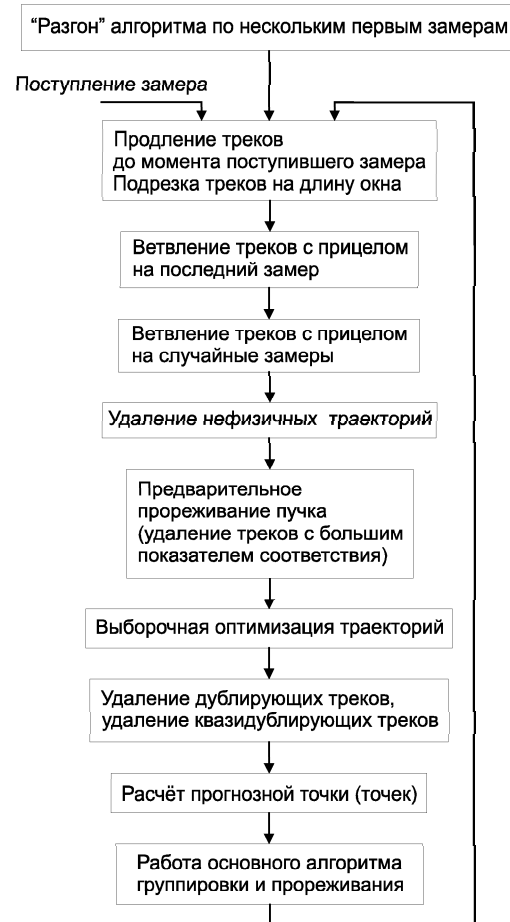


Рис.1. Обобщённая блок-схема алгоритма

$$I_3 = \frac{1}{n} \sum_z f_3(r).$$

Показатель 5 суммирует индивидуальные для каждого замера расстояния, выполненные в виде «ямки» глубиной 2 и асимптотическим подъемом от краёв ямки к значению 3 для расстояний, стремящихся к бесконечности:

$$f_5(r) = \begin{cases} 0, & r \leq r_d \\ 2 \frac{r - r_d}{r_p - r_d}, & r_d \leq r \leq r_p \\ 3 - \frac{r_p - r_d}{2r - r_p - r_d}, & r_p \leq r \end{cases},$$

$$I_5 = \frac{1}{n} \sum_z f_5(r).$$

Здесь r_d — зона нечувствительности, r_p — радиус «лунки». Для наглядности график функции $f_5(r)$ приведён на рис. 2. Именно показатель 5 используется в алгоритме, в качестве основного критерия формирования пучка.

Дополнительно к показателю на основе расстояний между замерами и траекторией, каждая траектория может быть оштрафована по критерию «нефизичности». Штрафы являются «заградительными» — имеют минимальное значение 10^{10} , которое используется в алгоритме для отличия физической и нефизичной траекторий.

Общий вид штрафа:

$$P_n = \begin{cases} 0, & p \leq p_b \\ 10^{10} + k_p(p - p_b), & p > p_b \end{cases},$$

где p — контролируемый параметр, p_b — предельное значение параметра, k_p — коэффициент штрафа.

Алгоритмически в программе при вычислении показателя в первую очередь осуществляется вычисление именно штрафов. Переход к вычислению основных показателей происходит, если штрафы по критерию нефизичности оказываются нулевыми.

Штрафы начисляются:

- за выход из ограничения по максимальному абсолютному значению поперечного управления;
- за выход из ограничения по максимальному абсолютному значению продольного управления;
- если длительность промежутка постоянного управления меньше заданного значения;
- если длительность двух смежных промежутков постоянного управления меньше заданного значения (отметим, что этот штраф делает показатель соответствия неаддитивным);
- если значение модуля скорости ВС мало или велико.

Также дополнительно используются штрафы по критерию предпочтительной траектории. Штрафы учитывают, что предпочтительным является прямолинейное и равномерное движение ВС.

Штрафуется существенное значение поперечного управления на участке постоянного управления (приведена формула для одного промежутка постоянного управления):

$$P_{u0} = \begin{cases} 0, & |u_i| \leq u_{0b} \\ k_{pu0}|u_i|(t_{k,i} - t_{n,i}), & |u_i| > u_{0b} \end{cases}.$$

Здесь u_i — значение поперечного управления на шаге i , u_{0b} — зона нечувствительности, $t_{n,i}$ — момент начала шага i , $t_{k,i}$ — момент конца шага i , k_{pu0} — коэффициент штрафа.

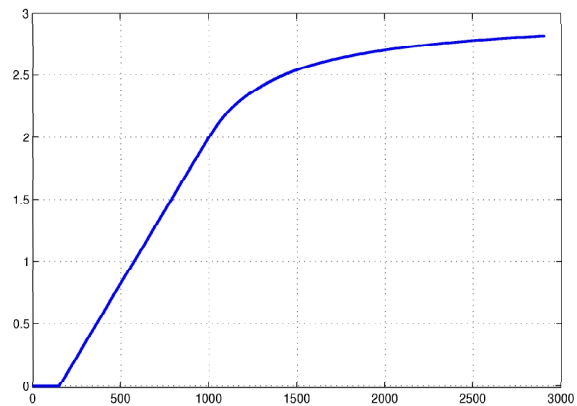


Рис. 2. График функции $f_5(r)$

Штрафуется существенное изменение значения поперечного управления между двумя участками постоянного управления (приведена формула для одной пары соседних участков постоянного управления; пара, содержащая первый участок, не штрафуется):

$$P_u = \begin{cases} 0, & |u_i - u_{i+1}| \leq u_b \\ k_{pu} \frac{|u_i - u_{i+1}|}{t_{k,i+1} - t_{n,i}}, & |u_i - u_{i+1}| > u_b \end{cases}.$$

В этой формуле u_i — значение поперечного управления на шаге i , u_{i+1} — значение поперечного управления на шаге $i+1$, u_b — зона нечувствительности, $t_{n,i}$ — момент начала шага i , $t_{k,i+1}$ — момент конца шага $i+1$, k_{pu} — коэффициент штрафа. Таким образом, в знаменателе дроби оказывается суммарная продолжительность промежутков постоянного управления i и $i+1$.

Для продольного управления в настоящей версии алгоритма штрафуется только отличие управления от нуля (приведена формула для одного промежутка постоянного управления):

$$P_{w0} = \begin{cases} 0, & |w_i| \leq w_{0b} \\ k_{pw0} |w_i| (t_{k,i} - t_{n,i}), & |w_i| > w_{0b} \end{cases}.$$

Здесь w_i — значение продольного управления на шаге i , w_{0b} — зона нечувствительности, $t_{n,i}$ — момент начала шага i , $t_{k,i}$ — момент конца шага i , k_{pw0} — коэффициент штрафа.

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. Для последнего промежутка постоянного управления момент окончания продлевается до момента текущего замера.

После продолжения трека до времени текущего замера треки укорачиваются по времени со стороны старых измерений, чтобы общая продолжительность трека не превышала заданного значения.

Ветвление при поступлении нового замера. Ветвление представляет собой процедуру, в которой для каждой траектории строятся возможные варианты её продолжения от промежуточных точек с изменёнными (по отношению к исходной траектории) управлениями. Для задачи ветвления используется решение вспомогательной задачи о переводе в точку, изложенное в [6]. Данный алгоритм по заданным начальным условиям (координаты, вектор скорости) и конечным условиям (координаты, приращение времени) позволяет получить приближенные значения пары управлений (продольного и поперечного), необходимые для перемещения из начальной точки в конечную за заданное время согласно динамике (1) при постоянных управлениях. Выбирая на исходной траектории разные точки ответвления и различные значения управления на участке после ответвления, получаем различные ответвляющиеся траектории. Из возможных вариантов ответвления в пучке остаётся несколько траекторий, критерием выбора может быть наилучшее значение показателя 5 для ответвившейся траектории, или траектория с максимально продолжительным участком постоянного управления после ветвления и т.п.

Ответвившиеся траектории отличаются выбором управления на участке после точки ответвления. Один из вариантов — это управление, приводящее траекторию точно в точку последнего замера. 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 манёвр и начинает двигаться равномерно и прямолинейно. Ответвления на случайные точки рядом с замером позволяют увеличить количество существенно различных вариантов движения в пучке.

Предварительное прореживание треков пучка. На этом этапе удаляются траектории, которые плохо согласуются с имеющимися замерами и с физическими ограничениями на траектории пучка. Если в пучке есть хотя бы одна физическая траектория, то все нефизические траектории исключаются из пучка. Физичность определяется при помощи штрафных членов в критерии 5. Кроме того, из пучка исключаются траектории с относительно большим значением показателя соответствия.

Выборочная оптимизация траекторий. Процедура оптимизации состоит в варьировании значений управления и времени переключения управлений при помощи программы прямого поиска минимума многомерной функции, где в качестве целевой функции используется показатель 5.

Численные эксперименты показали, что процедура оптимизации, будучи применённой ко всем траекториям, даёт не очень хорошие результаты в связи с «уточнением» пучка и потерей многогипотезности (остаётся слишком мало траекторий, существенно отличающихся между собой). В настоящем алгоритме оптимизация проводится только по небольшому числу траекторий с наилучшим значением показателя соответствия.

Удаление дублирующих треков. На этом этапе создаётся матрица взаимных расстояний между траекториями пучка. При этом, если в процессе создания матрицы расстояний обнаруживаются две совпадающие траектории или очень близкие траектории, то траектория с худшим значением показателя соответствия удаляется из пучка. Процедура необходима перед выработкой оценки текущего положения ВС, иначе дублирующие треки будут учтены несколько раз и будут иметь двойной эффективный вес.

Расчёт 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. Численные эксперименты показали, что использование для оценки текущего положения простого среднего по конечным точкам всех траекторий пучка даёт неудовлетворительные результаты. Аналогично, не очень хорошие результаты получаются при использовании для оценки текущего положения одной (лучшей по критерию 5) траектории.

Кроме того, оказалось, что формирование оценки текущего положения при помощи показателя соответствия, использованного для основных процедур развития пучка (показатель 5), даёт 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 из пучка, а только те, для которых значение основного критерия мало. Для каждой траектории (из участвующих в формировании оценки) вычисляется показатель 1 (или показатели 2, 3), на основании этого показателя вычисляется вес траектории.

Вес каждой траектории при использовании показателя 1 вычисляется по формуле

$$w_j = \frac{1}{I_{1,j} + 10^{-6}}$$

(индекс j относится к номеру траектории). Оценка положения ВС:

$$R = \frac{\sum_j R_{f,j} \times w_j}{\sum_j w_j}.$$

Здесь $R_{f,j}$ — радиус вектор последней точки траектории j .

Группировка и прореживание треков. Задача этого алгоритма — уменьшить количество треков в пучке при одновременном сохранении представительности разных гипотез о движении ВС.

Используется простой итерационный алгоритм. В матрице взаимных расстояний между треками пучка определяется пара траекторий с минимальным расстоянием, из этой пары удаляется траектория с худшим показателем соответствия, затем снова ищем пару траекторий с минимальным расстоянием и т.д. Процедура продолжается до тех пор, пока количество траекторий не станет меньше заданного числа.

Результаты моделирования

В качестве иллюстрации работы алгоритма приведём рис. 3, где показана моментальная конфигурация пучка для случая обработки модельного трека. Выбран момент, когда движение по прямой (с наибольшим продольным ускорением) переходит в участок с поворотом. На входе в поворот произошел выброс замера. Визуально видно, что алгоритм удовлетворительно восстанавливает траекторию движения, недостатками являются небольшое отставание восстановленных замеров от истинных на участке ускорения и некоторое увеличение радиуса на участке поворота.

Было проведено массовое моделирование движений по нескольким стандартным траекториям: прямолинейное движение с постоянной скоростью, прямолинейное движение с ускорением, стандартный разворот с постоянным боковым ускорением и нулевым продольным ускорением. Для каждой стандартной траектории моделировались 100 реализаций случайных ошибок на основе одной и той же эталонной траектории. По результатам восстановления траектории для 100 реализаций строился график зависимости от времени среднеквадратичного отклонения восстановленной траектории от истинной траектории. Проведён анализ соответствия восстановленных траекторий проекту стандарта по обработке траекторной информации [7].

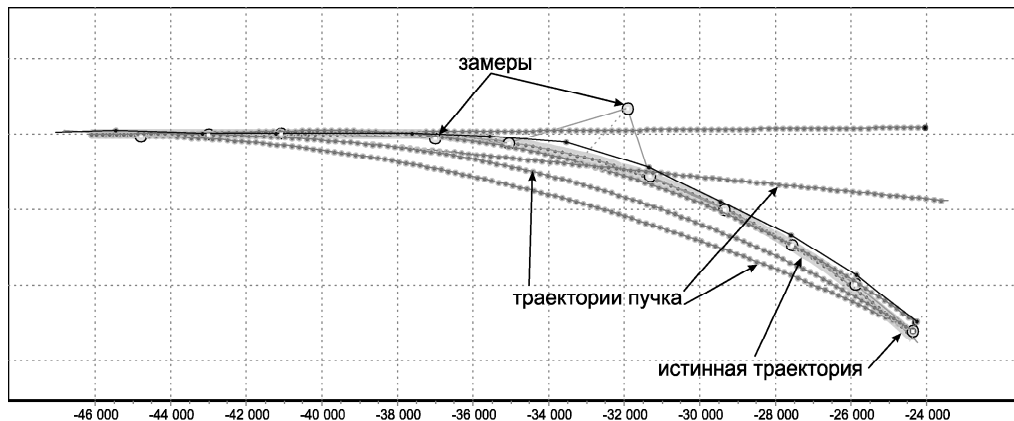


Рис. 3. Пример конфигурации пучка при вхождении в поворот, сопряжённом с выбросом замера

Исследованы два варианта реализации случайных ошибок: а) круговая случайная ошибка с нормальным распределением по радиусу; б) круговая случайная ошибка с выбросами: в среднем каждый десятый случайный замер получал ошибку, увеличенную в десять раз.

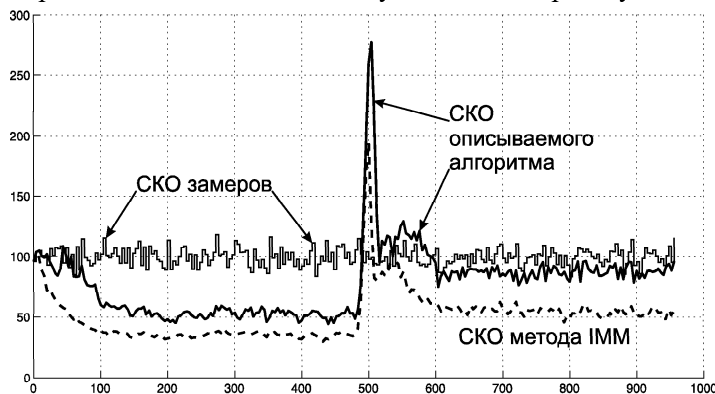


Рис. 4. Статистическое сравнение методов восстановления траектории. Замеры без выбросов. Горизонтальная ось — время в секундах, вертикальная ось — СКО от истинного движения в метрах

90 м, что вкладывается в нормативные требования для участков постоянного управления. Во время переходного процесса между управлениями СКО возрастает до 275 м, т.е. не удовлетворяет требованиям проекта ГОСТ. Метод IMM укладывается в требования на всех этапах движения.

Результаты для случая присутствия выбросов в модельных замерах представлены на рис. 5. Такого рода моделирование не предусмотрено нормативами, но в реальных данных выбросы встречаются достаточно часто. Результаты многогипотезного алгоритма несколько ухудшились (что является естественным — включение выбросов увеличило СКО замеров в три раза), но остались в приемлемых рамках. Результаты метода IMM оказываются заметно хуже, а на участке с разворотом становятся совершенно неудовлетворительными. Отметим, что алгоритм метода IMM в своей основе не был рассчитан на присутствие выбросов.

По результатам анализа приведённых графиков, а также других многочисленных результатов моделирования можно сделать вывод, что основной проблемой предлагаемого алгоритма является переходный процесс между устано-

Результаты обработки для случая а) и траектории, являющейся переходом от движения с постоянной скоростью к стандартному развороту с боковым ускорением 2 м/с^2 , показаны на рис. 4. Для сравнения, кроме графика СКО многогипотезного алгоритма, приведен график СКО модельных замеров со случайными ошибками, а также график восстановления траектории для этих же замеров при помощи метода IMM [1]. Многогипотезный алгоритм на первом участке (прямолинейное движение с постоянной скоростью) после переходного процесса имеет СКО около 50 м, на втором участке (стандартный разворот) после переходного процесса обеспечивает СКО около



Рис. 5. Статистическое сравнение методов восстановления траектории. Замеры с выбросами. Горизонтальная ось — время в секундах, вертикальная ось — СКО от истинного движения в метрах

вившимися движениями. Во многих случаях значения СКО оказываются больше установленных по стандарту, в некоторых случаях — продолжительность переходного процесса выходит за границы стандарта. Подбор параметров алгоритма может улучшить эти показатели.

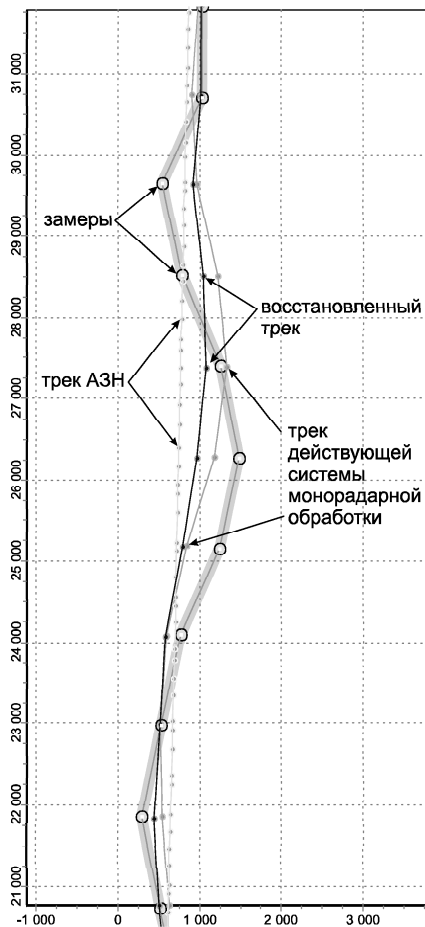


Рис. 6. Пример восстановления траектории реального трека

На рис. 6 показана работа алгоритма на реальных данных. Здесь «замеры» — реальные замеры одной РЛС, наблюдавшей ВС; «трек АЗН» — показания системы АЗН-В, принятые с этого ВС; «восстановленный трек» — работа описываемого алгоритма на основании реальных замеров; «трек действующей системы монорадарной обработки» — результаты восстановления траектории по этим же замерам для действующей системы траекторной обработки.

Заключение

Разработан алгоритм восстановления траектории ВС, основанный на многогипотезном подходе. Алгоритм характеризуется устойчивой работой в случае присутствия во входных данных отдельных выбросов замеров. На участках постоянного управления работа алгоритма удовлетворяет требованиям нормативных документов. Недостаток алгоритма (в текущей конфигурации) — сравнительно большая продолжительность переходных процессов между разными типами движения и большая величина соответствующей ошибки. Работа над алгоритмом будет продолжена.

*Работа выполнена при поддержке ООО «Фирма “НИТА”»,
гранта РФФИ № 15-01-07909 (А.Г. Иванов)
Авторы благодарят Д.А. Бедина, С.А. Ганебного и В.С. Пацко за
обсуждение результатов и помощь в работе.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. — John Wiley & Sons, 2004. — 584 с.
2. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 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. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. Издание официальное. М.: Госкомстандарт, 1980. — 52 с.
5. 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.
6. Бедин, Д.А., Пацко, В.С., Федотов, А.А., Беляков, А.В., Строков, К.В. Восстановление траектории самолета по неточным измерениям // АиТ. — 2010. — №.2. — С. 17–30.
7. 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