

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Алгоритм многогипотезного восстановления траектории</b>	<b>2</b>
1.1	Общее описание алгоритма . . . . .	2
1.2	Основные процедуры алгоритма многогипотезного восстановления траектории . . . . .	3
1.2.1	Построения в начальном окне . . . . .	3
1.2.2	Ветвление пучка при поступлении нового замера . . . . .	3
1.2.3	Группировка и прореживание треков . . . . .	4
1.2.4	Вычисление веса треков и меры расхождения треков . . . . .	4
1.2.5	Расчёт оценки текущего положения ВС . . . . .	4
1.3	Математическая модель траекторного движения ВС . . . . .	5
1.3.1	Аналитические расчёты при интегрировании уравнений движения . . . . .	5
1.4	Структура данных программы, термины . . . . .	5
1.5	Алгоритм оптимизации . . . . .	6
1.6	Программа конвертации данных . . . . .	7
1.7	Результаты моделирования . . . . .	9
1.7.1	Модельные данные . . . . .	9
1.7.2	Реальные данные . . . . .	9
	<b>Литература</b>	<b>13</b>

# 1 Алгоритм многогипотезного восстановления траектории

Данный раздел отчёта посвящен исследованию задачи оценивания параметров движения воздушного судна по поступающим радиолокационным замерам. Рассматривается движение в горизонтальной плоскости. Модель движения – система дифференциальных уравнений 4-го порядка, описывающая траекторное движение ВС с ограничением на продольное и боковое ускорения. При этом предполагается, что эти ускорения являются неизвестными наблюдателю параметрами управления, изменяющимися во времени. Для простоты принимается гипотеза, что как функции времени эти управления являются кусочно-постоянными.

В рассматриваемом подходе наряду с текущими параметрами движения формируются наиболее вероятные варианты его предыстории в виде модельных траекторий. Формируемая совокупность возможных траекторий движения воздушного судна с кусочно-постоянными управлениями используются для получения текущей средневзвешенной оценки текущего положения ВС. В общем случае такая задача является многоэкстремальной, даже в случае, когда для её решения используются замеры одного и того же воздушного судна. Поэтому является естественным использование в качестве оценки движения ВС нескольких вариантов траектории.

Предлагаемый подход во многом пересекается с подходом, используемым в настоящее время при мультирадарной обработке данных в НИТА, где задействуется фильтр Калмана и метод ИММ. В частности, как и в ИММ, в каждый момент времени рассматриваются различные варианты движения. Расчёт на улучшение показателей (по сравнению с методом ИММ) по оценке текущих параметров движения сделан на более полное использование модели траекторного движения [5], а также на более представительное хранение предыстории (сохраняется набор наиболее вероятных характерных вариантов (гипотез) движения ВС).

## 1.1 Общее описание алгоритма

Рассматривается движение воздушного судна в горизонтальной плоскости, которое наблюдается одновременно несколькими радиолокаторами. В рамках решения задачи мультирадарной обработки производится оценка текущих координат и скорости ВС по всем замерам, пришедшим до данного момента времени. Предлагается подход, в котором рассчитывается набор (пучок) наиболее вероятных траекторий ВС (с учётом возможных выбросов измерений). Оговоренный пучок треков пересчитывается с использованием измерений из некоторого бегущего окна по времени с фиксированной длительностью с учётом каждого вновь поступившего замера РЛС. В качестве текущей оценки положения ВС рассматриваются варианты выбора «по наилучшей траектории» и выбора «по средней траектории» с использованием принципа максимальной достоверности. Формирование пучка траекторий производится с целью обеспечить максимальную представительность вариантов движения. При описании модели траекторного движения использовалось [5, 6].

Произведено моделирование на реальных и модельных данных. (Федотов: эта фра-

за час для введения или заключения)

## 1.2 Основные процедуры алгоритма многогипотезного восстановления траектории

### 1.2.1 Построения в начальном окне

Начальное окно по времени, используемое для завязки траектории, имеет особый смысл для алгоритма. Длительность начального окна в текущей версии программы и далее в этом подразделе подразумевается заранее выбранным и фиксированным. Формирование пучка траекторий в начальном окне осуществляется по различным тройкам РЛС-замеров, удовлетворяющих следующим условиям:

- замеры попарно разнесены по времени не менее, чем на 8 сек.
- расстояние по геометрическим координатам для всех пар замеров составляет не меньше 800 м.
- при движении с постоянной по величине скоростью по окружности, соединяющей три точки геометрического положения РЛС-замеров, отклонение от замеров в соответствующие моменты времени не превосходит 800 м.

Предполагается, что в начальном окне существует хотя-бы одна такая тройка РЛС-замеров. Ограничение по боковому ускорению в явной форме не задаётся, хотя следует отметить, что оно обеспечивается неявно при выполнении перечисленных выше условий (если рассматривать движения с постоянными ускорениями).

По каждой допустимой тройке РЛС-замеров формируется трек с движением по окружности, проходящей через замеры, и с условием минимальной суммы отклонений по времени от замеров РЛС. Для каждого замера отклонение по времени рассчитывается как модуль разности между моментом РЛС-замера и моментом на траектории, который соответствует прохождению траектории через геометрическую отметку замера (Федотов: я здесь лишний раз отметил, подбираемая траектория проходит через геометрическую отметку замера не в соответствующий для замера момент времени, т.е.  $\text{Замер} = \text{Геом.Отм.} + \text{ВремяЗамера}$ ). Для получения соответствующих параметров движения в виде начальных координат, направления и величины скорости, а также величины бокового ускорения используются явные аналитические формулы и метод наименьших квадратов.

### 1.2.2 Ветвление пучка при поступлении нового замера

Данная операция выполняется для каждого вновь поступившего замера РЛС и представляет собой формирование ведущих к данному замеру ответвлений от всех имеющихся треков. Цель ветвления – обеспечение представительности возможных вариантов движения ВС с учётом информации, содержащейся в новом замере. При выполнении данной операции по каждому треку формируется (если это возможно с учётом принятой модели движения) ещё один дополнительный трек, содержащий ответвление, которое ведёт в геометрическую точку замера.

В качестве ответвления рассматривается движение по дуге окружности с нулевым продольным ускорением (с постоянной по величине скоростью), которое отделяется от некоторой старой траектории. Для построения требуемой дуги используется та же процедура формирования трека по трём точкам, что и в предыдущем подразделе. Отличие заключается лишь в фиксированных параметрах движения (координаты,

направление и величина скорости) на начальный момент времени — они берутся с движения, подлежащего ветвлению. Дополнительные две точки берутся непосредственно со старого трека (см. рис.), при этом выбирается вариант с наибольшим результирующим весом у траектории с ответвлением.

Тут будет поясняющий рисунок.

В ходе ветвления количество треков таким образом может удвоиться. Формируемый на данном этапе пучок треков является начальным приближением для последующей обработки, включающей процедуры прореживания треков и их оптимизации с целью улучшения локальной аппроксимации.

### 1.2.3 Группировка и прореживание треков

При пересчёте пучка траекторий необходимо выполнять их прореживание, ввиду экспоненциального (с основанием два) роста числа вариантов треков по ходу поступлении замеров РЛС за счёт операции ветвления. Здесь требуется, с одной стороны, сохранить представительность среди сохраняемых вариантов движения, а, с другой стороны, необходимо оставить только «лучшие» треки. Представительность в части (Федотов: это всё-таки не синоним большому количеству вариантов движения) вариантов движения необходима для оперативного отслеживания изменений в динамике траекторного движения ВС (также, как и методе IMM). Среди прочих рассматривался вариант, когда треки просто упорядочиваются по весу, а затем остаётся только некоторое количество лучших по весу треков. На практике этот подход оказался неудовлетворительным, поскольку пучок начинает состоять из практически одинаковых треков, которые отражают лишь какой-то один вариант движения, более предпочтительный на текущий момент времени. В этом случае переход на другой тип движения (с движения по окружности на движение по прямой и т.п.) приводит к повышенным к повышенным ошибкам (возникает смещение).

В настоящее время рассматривается несложная в реализации идея, предполагающая разбиение треков на группы по рассчитываемой степени близости (см. раздел 2.5) с дальнейшим выбором в каждой группе наилучшего представителя.

### 1.2.4 Вычисление веса треков и меры расхождения треков

Вес траектории используется для сравнения текущих треков с целью отбора наилучшего при условии их «близости» (меры расхождения). Вес трека связан с вероятностью движения по заданной совокупности замеров при условии, что часть замеров может содержать выбросы и быть ошибочной. Численно мера расхождения треков рассчитывается как среднее расстояние между треками в геометрических координатах, рассчитываемое на равномерной сетке времени в текущем расчётном окне.

!!! Формула

### 1.2.5 Расчёт оценки текущего положения ВС

– по лучшему треку

– по совокупности треков с весами

### 1.3 Математическая модель траекторного движения ВС

Алгоритм использует следующее модельное описание динамики самолёта:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cos \varphi, \\ \dot{z} &= v \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} &= u/v, \\ \dot{v} &= w.\end{aligned}\tag{1.1}$$

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

Предполагаем, что управления  $u, w$  стеснены геометрическими ограничениями  $|u| \leq u_{\max}, |w| \leq w_{\max}$ .

При практическом использовании интегрирования с построением трека в геометрических координатах используется сетка по времени, включающая все секундные отметки (это позволяет корректно сравнивать треки с несовпадающими моментами переключения).

#### 1.3.1 Аналитические расчёты при интегрировании уравнений движения

Система (1.1) в случае постоянных  $u, w$  является интегрируемой аналитически [8, 9].

Примем за начальный момент времени  $t = 0$ . Предположим, что в этот момент выполняются следующие начальные условия на фазовые координаты:

$$v(0) = v_0 > 0, \quad \varphi(0) = 0, \quad x(0) = z(0) = 0.\tag{1.2}$$

Тогда для момента времени  $t > 0$  при условии, что  $v > 0$  на всем промежутке от 0 до  $t$ , будут выполнены соотношения

$$\begin{aligned}v(t) &= v_0 + wt, \\ \varphi(t) &= \frac{u}{w} \ln \left( 1 + \frac{wt}{v_0} \right) = \frac{u}{w} \ln \frac{v(t)}{v_0}, \\ x(t) &= \frac{u}{u^2 + 4w^2} v^2(t) \sin \varphi(t) + \frac{2w}{u^2 + 4w^2} (v^2(t) \cos \varphi(t) - v_0^2), \\ z(t) &= -\frac{u}{u^2 + 4w^2} (v^2(t) \cos \varphi(t) - v_0^2) + \frac{2w}{u^2 + 4w^2} v^2(t) \sin \varphi(t).\end{aligned}\tag{1.3}$$

Для случая  $w = 0$  соотношения выводятся из (1.3) предельным переходом.

Другие начальные условия приводятся к (1.2) путём замен

$$\varphi \rightarrow \varphi + \varphi_0, \quad x \rightarrow x + x_0, \quad z \rightarrow z + z_0.$$

### 1.4 Структура данных программы, термины

*Участок постоянного управления* — промежуток времени, характеризующийся постоянством ускорений ВС. На нём фиксируются:  $u_i$  (поле записи `.Upr`) — значение поперечного управления;  $w_i$  (поле `.Wpr`) — значение продольного управления;  $t_{ni}$  (`.UTn`) — время начала участка постоянного управления;  $t_{ki}$  (`.UTk`) — время конца участка постоянного управления.

*Трек управления* — двунаправленный список участков постоянного управления. Каждый участок постоянного управления в треке управления должен содержать ссылки на предыдущий участок (поле записи `.Prd`) и последующий участок (поле `.Sld`). Величины  $t_{ni}$  и  $t_{ki}$  последовательных элементов списка должны быть согласованы, т. е.  $t_{ki-1} = t_{ni}$ . Также участки постоянного управления могут содержать поля `.nTr` и `.kTr` — ссылки на участок геометрического трека (определяется ниже), который был порождён рассматриваемым участком постоянного управления.

*Замер РЛС* содержит поля: `.Xzr` — координата замера «на север» в плоскости Земли; `.Zzr` — координата замера «на восток» в плоскости Земли; `.Hzr` — высота замера над плоскостью Земли; `.Tzr` — время замера; `.NrIs` — номер РЛС замера.

*Трек замеров* — двунаправленный список замеров РЛС. Каждый замер РЛС в треке замеров должен содержать ссылки на предыдущий замер (поле записи `.Prd`) и последующий замер (поле `.Sld`).

*Точка геометрического трека* описывает положение ВС и содержит поля: `.X` — координата ВС «на север» в плоскости Земли; `.Z` — координата ВС «на восток» в плоскости Земли; `.H` — высота ВС над плоскостью Земли; `.Phi` — направление скорости ВС (угол по часовой стрелке относительно направления на север); `.V` — величина скорости ВС. Время точки геометрического трека в необходимых случаях вычисляется используя её положение в геометрическом треке.

*Геометрический трек* — двунаправленный список точек геометрического трека. Каждая точка геометрического трека должна содержать ссылки на предыдущий замер (поле записи `.Prd`) и последующий замер (поле `.Sld`). Вычисление геометрического трека по треку управления возможно при помощи процедуры `PostrTrekaSTekUchUprPrmo()`. Аргументом этой процедуры является первый элемент списка трека управления, этот элемент должен иметь поле `.nTr`, указывающее на точку геометрического трека. Эта точка используется как начальная при интегрировании уравнений движения ВС.

Треки всех видов (трек управления, трек замеров, геометрический трек) в программе хранятся в одном массиве

```
var MetkaTreka:array[0..RazmerMassivaMetok]of TMetkaTreka;
```

Тип `TMetkaTreka` описан как запись с вариантной частью. Варианты соответствуют виду трека. Такой подход позволяет динамически распределять память между треками разных видов, использовать одни и те же процедуры манипулирования двунаправленным списком (добавление/удаление элемента, очистка трека и т. п.). Недостатком такого подхода служит большая вероятность возникновения ошибок программирования и сложность отладки.

## 1.5 Алгоритм оптимизации

Алгоритм оптимизации основывается на методе Хука — Дживса [10].

В качестве входной информации алгоритм получает ссылку на трек управления (последовательность участков постоянного управления).

Алгоритм варьирует: значения продольного управления  $w_i$ , значения поперечного управления  $u_i$ , время переключения между участками постоянного управления  $t_{ni}$ . При этом учитываются ограничения: на абсолютные значения управления, на минимальную продолжительность постоянного управления. Целью варьирования является построение последовательности управлений, которые бы определяли геометрический трек с минимальным весом.

Для вычисления веса трека алгоритм формирует временный трек управления. В процессе формирования временного трека происходит проверка нарушения ограничений на управление, если ограничения нарушаются, то происходит возврат в основной алгоритм Хука – Дживса, при этом в качестве значения минимизируемой функции возвращается штраф пропорциональный величине нарушения ограничения (при этом при подаче на вход алгоритма оптимизации трека управления с нарушением ограничений возможно «скатывание» алгоритма в область, где ограничения не нарушаются). Для построения геометрического трека по сформированному треку управления используется обращение к процедуре `PostrTrekaSTekUchUprPrimo()` (которая производит интегрирование), затем вес трека вычисляется обращением к функции `RaschetVesaTreka()` и происходит возврат в основной алгоритм алгоритм Хука – Дживса с возвратом веса трека в качестве значения минимизируемой функции.

Варьирование прекращается когда текущие шаги варьирования оказываются меньше заданных финальных шагов варьирования.

Алгоритм возвращает ссылку на новый трек управления, получившийся в результате варьирования. В свою очередь трек управления содержит ссылки на соответствующий геометрический трек.

### Константы-параметры алгоритма оптимизации

Алгоритм использует следующие постоянные параметры (константы):

`Du1` = 0.5 – начальный шаг варьирования поперечного управления;

`Dw1` = 0.25 – начальный шаг варьирования продольного управления;

`Dt1` = 32.0 – начальный шаг варьирования разбивки времени;

`DuFin` = 0.01 – финальный шаг варьирования поперечного управления;

`DwFin` = 0.01 – финальный шаг варьирования продольного управления;

`DtFin` = 0.02 – финальный шаг варьирования разбивки времени;

`MAXu` = 4 ( $u_{\max}$ ) – максимальное значение поперечного управления;

`MAXw` = 2 ( $w_{\max}$ ) – максимальное значение продольного управления;

`dtmin` = 10.0 – минимальный промежуток времени постоянного управления;

`dh` = 0.5 – множитель уменьшения шага при неудаче в «поиске вокруг базовой точки» метода Хука – Дживса.

## 1.6 Программа конвертации данных

Программа `tracks_plots_00` предназначена для фильтрации и конвертации данных (РЛС, АЗН-В, монорадарная обработка, мультирадарная обработка) из текстовых файлов `tracks.txt`, `plots.txt`, `plots_ads.txt`, получаемых при помощи программы `vidparser.exe` из файлов `.vid`. Цель конвертации — получить небольшие по объёму текстовые файлы данных для использования в программе многогипотезного восстановления траектории.

В связи с тем, что исходные файлы имеют очень большой объём (гигабайты), полная загрузка информации из файлов в оперативную память (при использовании 32-битной ОС и 32-битного компилятора) не представляется возможной. Используются неоднократное чтение файлов и приближённая оценка сверху количества замеров в РЛС-треках.

## Алгоритм

- Первое чтение файла `tracks.txt`, сбор общей статистики по источникам, глобальным идентификаторам трека и т.п.
- Выделение памяти для АЗН-треков.
- Чтение файла `plots_ads.txt`. Заполнение массивов замеров АЗН.
- Упорядочение замеров внутри АЗН-треков по времени, запись треков в файлы `ads.new4` и `ads.plt`.
- Освобождение памяти для АЗН-треков.
- Выделение памяти (на основе приближённой оценки) для монорадарных треков (моно-треков), треков мультирадарной обработки (мульти-треков), РЛС-треков.
- Второе чтение файла `tracks.txt`. Заполнение массивов моно-треков и мульти-треков, заполнение номеров замеров в РЛС-треках.
- Упорядочение замеров внутри моно-треков и мульти-треков по времени, запись треков в файлы `*_mr.new4` и `*_mr.plt`.
- Чтение файла `plots.txt`. Заполнение массивов замеров РЛС-треков.
- Упорядочение замеров внутри РЛС-треков по времени, запись треков в файлы `*_r.new4` и `*_r.plt`.

## Особенности текущей версии, параметры программы

Воздушные суда идентифицируются по параметру `global` (глобальный номер трека), при этом в обработку идёт не более `AZN_TRACKS_MAX` воздушных судов, АЗН-треки которых имеют не менее `AZN_TRACKS_MIN_MEASUR` замеров (при этом из подходящих выбираются АЗН-треки с наибольшим числом замеров).

Из файлов `tracks.txt`, `plots.txt` учитываются РЛС-замеры и моно-замеры, параметр `sensor` которых равен параметру `RADAR_SENSOR_ONLY`.

Если после всех фильтраций трек содержит меньше `TRACKS_MIN_MEASUR` замеров, то он не записывается.

Выходные файлы записываются в поддиректорию `new`, которая не должна существовать до запуска программы. В директории `new` создаются поддиректории, соответствующие с параметром `global` записываемых ВС. Записываются файлы `ads.new4` и `ads.plt` (АЗН-треки), `240_mr.new4` и `240_mr.plt` (мульти-треки), `*_mr.new4` и `*_mr.plt` (моно-треки), `*_r.new4` и `*_r.plt` (РЛС-треки). Здесь `*` — номер РЛС.

Файлы `*.plt` имеют формат треков программы Ozi Explorer и используются для визуализации треков при помощи программы GPSMapEdit.

## Формат файлов .new4

Текстовые файлы, в которых построчно записаны замеры. Столбцы: время замера, широта замера, долгота замера, высота замера. Столбцы разделяются символом табуляции.

Для РЛС-треков в качестве координат замеров используются поля `lat` и `lon` файла `plots.txt`, т.е. широта и долгота, сформированные из дальности и азимута сырых



РЛС-замеров, которые предварительно корректируются с учётом текущей оценки систематических ошибок в программе мультирадарной обработки.

## 1.7 Результаты моделирования

Приведены **отдельные** результаты вычислений, полученные на модельных и реальных данных.

На всех рисунках: синие **траектории — геометрические треки**, представляющие текущие пучки траекторий; желтые квадратики — замеры РЛС (смоделированные или полученные из файла `plots.txt`). При работе с модельными данными: зелёная траектория — идеальное движение ВС. При работе с реальными данными: зелёная траектория — трек РЛС (получен из файла `plots.txt`); красная траектория — трек монорадарной обработки (получен из файла `tracks.txt`); жёлтая траектория — трек АЗН-В (получен из файла `plots_ads.txt`).

### 1.7.1 Модельные данные

На рис. 1.1–1.3 показаны результаты работы с модельными данными, относящимися к одной и той же модельной траектории. Движение по этой траектории направлено слева направо (на **«запад»**).

Рисунок 1.1 иллюстрирует построение в начальном окне, необходимое для «разгона» алгоритма. Некая «разбросанность» пучка, **видная** на рисунке, характерна только для этого этапа и пропадает после операций прореживания или оптимизации.

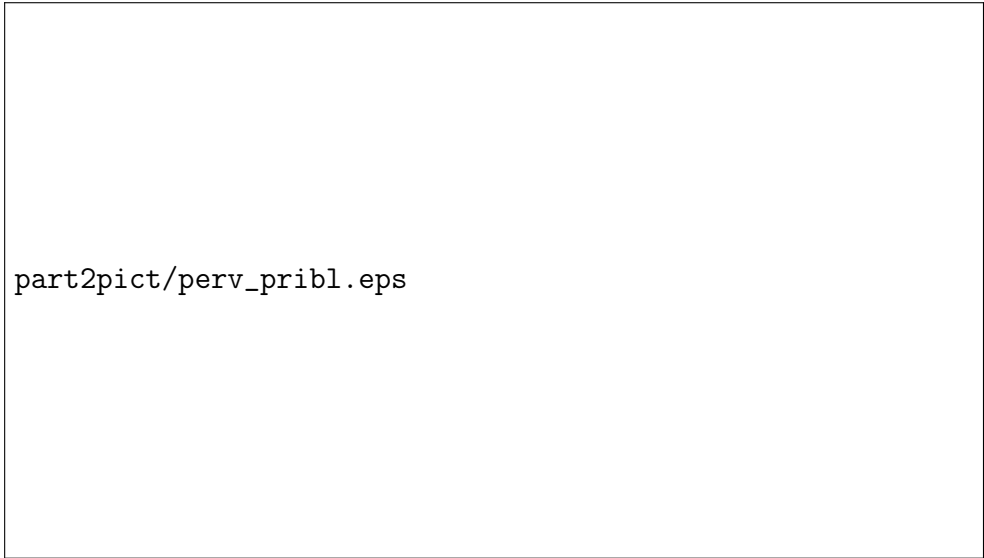
Рисунок 1.2 показывает состояние текущего пучка траекторий после нескольких последовательных итераций ветвления треков и прореживания. **Непосредственно** последней была применена процедура ветвления.

Состояние в которое переходит пучок после применения оптимизации к состоянию, изображённому на рис. 1.2 **показано на рис. 1.3**.

### 1.7.2 Реальные данные

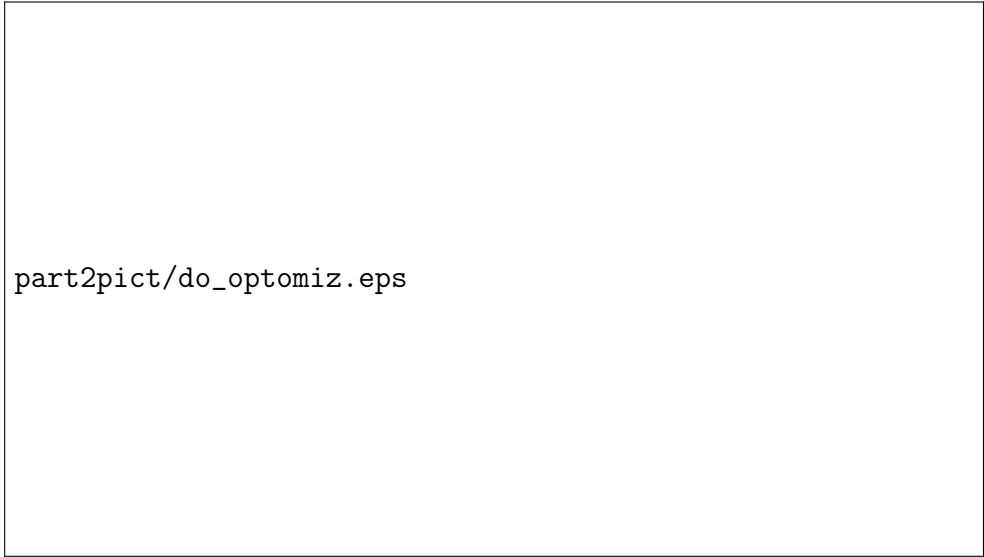
На рис. 1.4 показан **конец** пучка движений при обработке данных ВС с глобальным номером трека 29850, полученных с РЛС № 26, сенсор 10 (вторичная РЛС режима RBS). Приведено состояние непосредственно после процедуры ветвления перед которой происходило нескольких последовательных итераций ветвления треков и прореживания.

Рисунок 1.5 показывает состояние текущего пучка движений при обработке данных ВС с глобальным номером трека 30637, полученных с РЛС № 35, сенсор 10 (вторичная РЛС режима RBS). Приведено состояние непосредственно после процедуры оптимизации. Здесь, как и на рис. 1.3 **виден недостаток использования процедуры оптимизации в том виде, как это реализовано в настоящее время: после оптимизации большинство траекторий пучка оканчивается около последнего** замера (или точно на нём). **В дальнейшем возможны** различные способы преодоления этого недостатка: **ужесточённое** ограничение на продолжительность последнего промежутка постоянного управления; использование других функционалов **веса трека** (**меньший вес последнего замера, «лункообразный» функционал**).



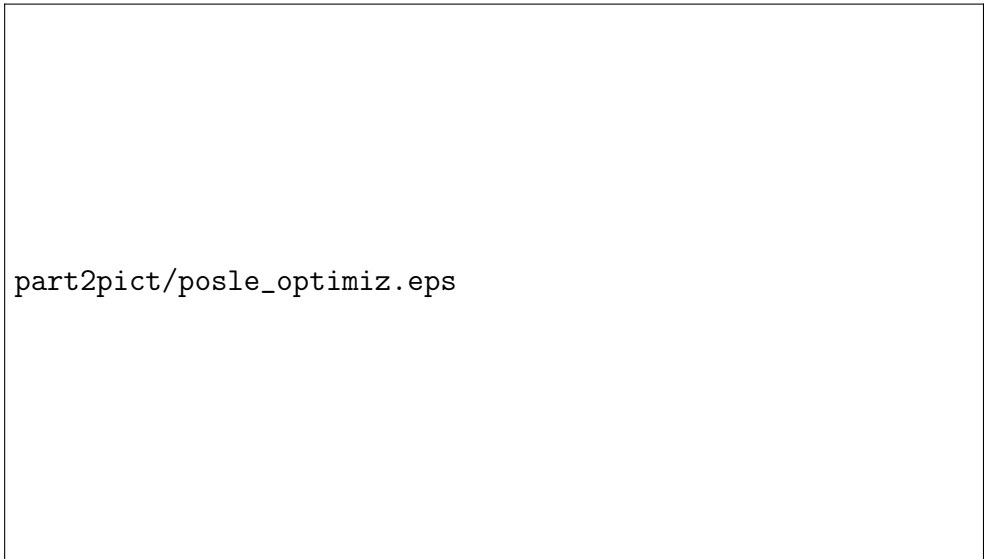
part2pict/perv\_pribl.eps

Рис. 1.1: Построение в начальном окне. Модельные данные



part2pict/do\_optomiz.eps

Рис. 1.2: Текущий пучок траекторий после процедуры ветвления. Модельные данные



part2pict/posle\_optimiz.eps

Рис. 1.3: Текущий пучок траекторий после процедуры оптимизации. Модельные данные

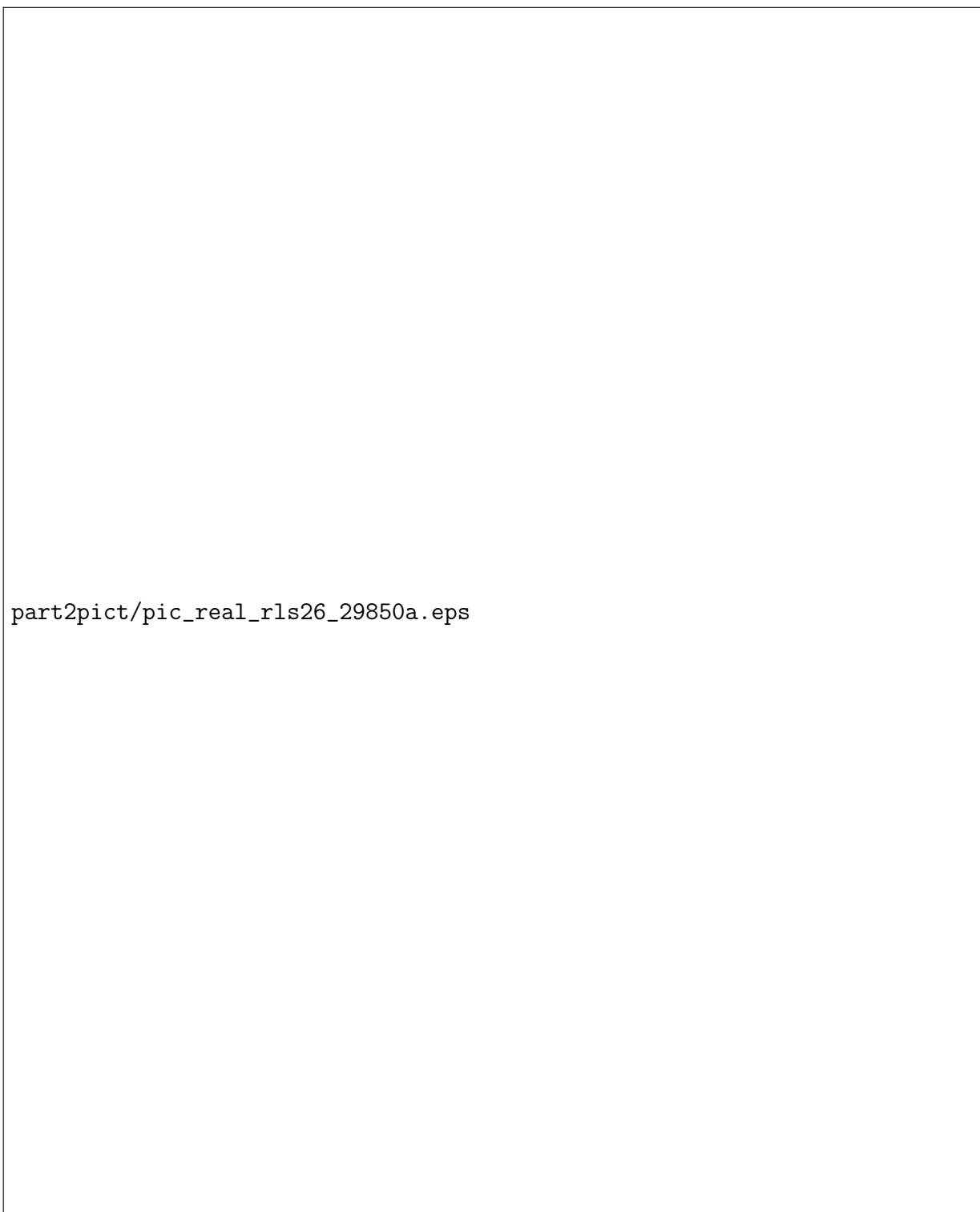


Рис. 1.4: Текущий пучок траекторий после процедуры ветвления. Реальные данные: глобальный номер трека 29850, РЛС № 26. Движение направлено «вверх»



Рис. 1.5: Текущий пучок траекторий после процедуры оптимизации. Реальные данные: глобальный номер трека 30637, РЛС № 35. Движение направлено «вверх»

## Литература

- [1] Бедин Д. А., Денисов А. П., Иванов А. Г., Федотов А. А., Черетаев И. В., Ганебный С. А., Васильев А. В. Одновременное определение координат движущегося ВС и коррекция систематических ошибок РЛС при помощи фильтра Калмана. 2015. Отчёт по Договору 610-15У. 33 с.
- [2] Blom, H. A. P., Van Doorn, B. A. Systematic Error Estimation in Multisensor Fusion Systems / Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. Vol. 1954, Oct. 1993, pp. 450–461.
- [3] Reinhardt, M., Noack, B., Arambel, P. O., Hanebeck, U. D. Minimum Covariance Bounds for the Fusion under Unknown Correlations // Signal Processing Letters, IEEE. Vol. 22, Iss. 9, Sept. 2015, pp. 1210–1214.
- [4] Julier, S. J., Uhlmann, J. K. A Non-divergent Estimation Algorithm in the Presence of Unknown Correlations / Proceedings of Amer. Control Conf., vol. 4, 1997, pp. 2369–2373.
- [5] ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. Издание официальное. Москва, Госкомстандарт, 1980.
- [6] Пятко С.Г., Красов А.И. и др. Автоматизированные системы управления воздушным движением. Санкт-Петербург, Изд. Политехника, 2004.
- [7] Бедин Д.А., Беляков А.В., Кумков С.И., Пацко В.С., Пятко С.Г., Строков К.В., Федотов А.А. Отчёт по договору №61/2007. Разработка алгоритмов и программ обработки и анализа информации в системе УВД (Этап 4). Том 2. Пакет алгоритмов для задачи восстановления траектории самолёта. 2008. 51 с.
- [8] Бедин Д.А., Беляков А.В., Кумков С.И., Пацко В.С., Пятко С.Г., Федотов А.А. Методы и алгоритмы анализа, выделения и отсеивания недостоверных замеров радиолокационной информации. Восстановление траектории самолета по зашумленным замерам в движущемся окне. 2006, Отчёт по Договору 53/2005. 27 с.
- [9] Бедин Д.А., Беляков А.В., Кумков С.И., Пацко В.С., Пятко С.Г., Строков К.В., Федотов А.А. Методы и алгоритмы анализа, выделения и отсеивания недостоверных замеров радиолокационной информации. Программный пакет алгоритмов восстановления траектории самолета по замерам с ошибкой. 2007, Отчёт по Договору 53/2005. 41 с.
- [10] Банди Б. Методы оптимизации (вводный курс). – М.: Радио и связь, 1988.