

УЧЕТ АЗИМУТАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ НЕСКОЛЬКИХ РЛС ПО АЗИМУТУ

А.Г. Иванов

ИММ УрО РАН, г. Екатеринбург
iagsoft@imm.uran.ru

Введение

Если при наблюдении за траекторным движением воздушного судна (ВС) посредством некоторой РЛС в замерах присутствуют систематические ошибки (в частности, по азимуту), это приводит к пространственному смещению наблюдаемого трека ВС. Здесь и далее под РЛС-треком понимаем совокупность замеров некоторой РЛС при наблюдении за одним ВС на ограниченном промежутке времени. Если одно и то же движение ВС наблюдается при помощи нескольких РЛС, то естественно возникает задача «сведения» разных РЛС-треков.

Азимутальные ошибки являются существенным фактором, влияющим на взаимное расположение треков. Поэтому идентификация систематических ошибок по азимуту является важной задачей при сведении треков.

1. Постановка задачи

По набору радиолокационных замеров, сделанных несколькими РЛС и относящихся к одному ВС, требуется восстановить (идентифицировать) систематическую погрешность по азимуту для каждого из локаторов, участвующих в наблюдении за ВС. Также нужно восстановить систематическую погрешность по азимуту на основе обработки большого количества треков по одной воздушной зоне.

Исходные данные по каждой РЛС представляют собой набор замеров наклонной дальности и азимута ВС на некотором промежутке времени в прямоугольной системе координат, связанной с касательной плоскостью к Земле в точке положения РЛС. Точно заданы географические координаты (широта и долгота) расположения РЛС. Для некоторых замеров может присутствовать информация о высоте ВС над уровнем моря.

2. Алгоритм

Для решения задачи идентификации вводится понятие «восстанавливаемого» трека. Восстанавливаемый трек представляет собой ломаную линию в трехмерном пространстве. Каждой вершине ломаной приписан момент времени. Координаты вершин ломаной можно рассматривать как независимые переменные. При зафиксированных координатах любому моменту времени соответствует некоторая точка восстанавливаемого трека (предполагается, что между вершинами ломаной время изменяется равномерно).

Наклонная дальность и азимут РЛС-замера дают неопределенность положения наблюдаемого ВС в виде окружности в трехмерном пространстве, лежащей в плоскости, перпендикулярной к местному горизонту в точке положения соответствующей РЛС. Квадрат расстояния между окружностью неопределенности РЛС-замера и точкой вос-

становливаемого трека, соответствующей времени РЛС-замера, назовем невязкой РЛС-замера. Если в информации замера присутствует высота, то невязкой РЛС-замера называем квадрат расстояния между замером и точкой восстанавливаемого трека.

Просуммировав все невязки РЛС-замеров, относящиеся к одному ВС, получаем результирующую невязку. Такая невязка зависит от координат вершин восстанавливаемого трека и предполагаемых систематических ошибок по азимуту (которые учитываются при построении окружностей неопределенности РЛС-замеров). Варьируя значения систематических ошибок по азимуту и координаты вершин восстанавливаемого трека, находим значения, при которых результирующая невязка минимальна. Значения систематических ошибок по азимуту, соответствующие минимальной результирующей невязке, считаем идентифицированными систематическими ошибками по азимуту.

В качестве процедуры минимизации функции многих переменных, используемой для минимизации невязки, взят алгоритм Хука-Дживса с элементами метода Монте-Карло [1].

Алгоритм отлаживался как на модельных, так и на реальных данных [2].

Проводилась статистическая обработка результатов идентификации систематических ошибок РЛС по азимуту, полученных для большого числа ВС за ограниченный промежуток времени (несколько часов – сутки). При этом в ряду других строились графики зависимости идентифицированной ошибки от среднего азимута трека. Для некоторых РЛС прослеживалась явная зависимость идентифицированной ошибки от среднего азимута трека, см., например, рис. 1.

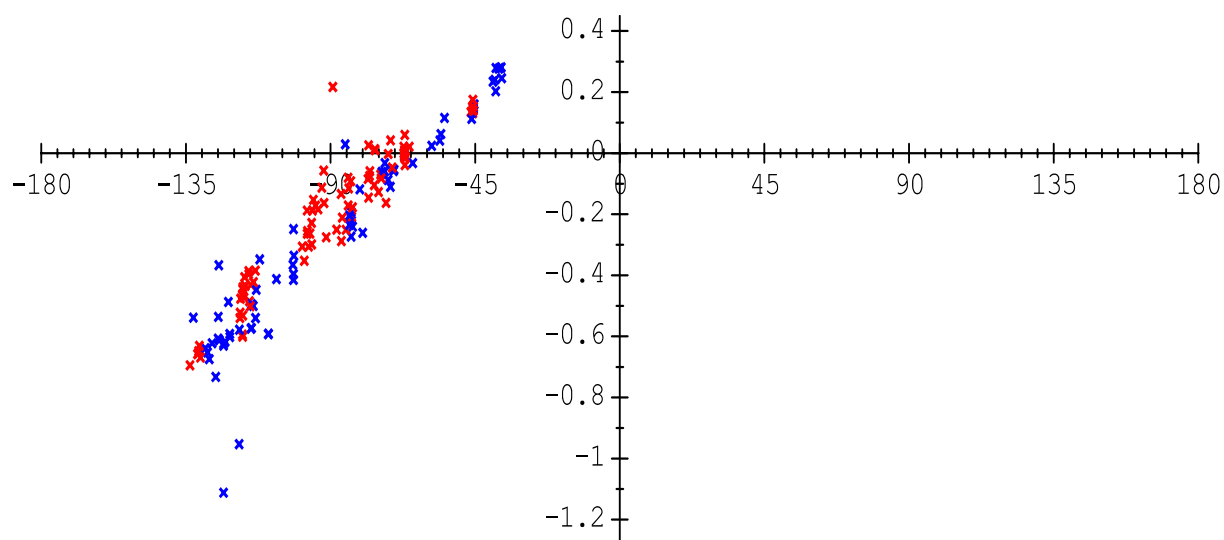


Рис. 1. Зависимость систематической ошибки по азимуту от среднего азимута трека для РЛС «Красноярск». Горизонтальная ось – средний азимут трека (градусы), вертикальная ось – систематическая ошибка по азимуту (градусы). Каждый крестик соответствует одному ВС.

Была выдвинута гипотеза о возможной зависимости систематической ошибки по азимуту от азимута. Алгоритм восстановления систематической ошибки был модифицирован с целью учета этого обстоятельства.

При разработке алгоритма учитывалось естественное предположение, что систематическая ошибка по азимуту непрерывно зависит от азимута. Основные требования к алгоритму: возможность описания зависимости небольшим числом параметров; реали-

зация периодичности с периодом 2π рад (значение для -180° должно равняться значению для 180°).

Реализованы два варианта аппроксимации зависимости систематической ошибки по азимуту от азимута при наблюдении за движением одного ВС: кусочно-линейная функция и тригонометрический ряд.

В первом случае полный угол делится базовыми направлениями на равные части, задаются значения функции на базовых направлениях, значения функции между базовыми направлениями вычисляются линейной интерполяцией. При этом в процедуре варьирования независимыми переменными являются систематические ошибки на базовых направлениях для всех РЛС, наблюдающих ВС.

Во втором случае берутся несколько первых членов ряда Фурье:

$$\Delta(\alpha) = a_0 + a_1 \cos(\alpha) + b_1 \sin(\alpha) + a_2 \cos(2\alpha) + b_2 \sin(2\alpha) + \dots$$

Здесь α – азимут замера, $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots$ – коэффициенты ряда, $\Delta(\alpha)$ – значение систематической ошибки данной РЛС для азимута α . В качестве независимых переменных используются коэффициенты ряда Фурье.

3. Результаты

Результаты статистической обработки расчетов систематической ошибки для многих ВС представлены на рис. 2, 3. Рис. 2 соответствует РЛС, для которой зависимость систематической ошибки от азимута является существенной. Другая ситуация показана на рис. 3: здесь значения систематической ошибки являются малыми и слабо зависят от азимута. Пропуски на графиках объясняются тем, что в определенных диапазонах азимута количество замеров, попавших в диапазон, оказывается слишком малым для статистической обработки.

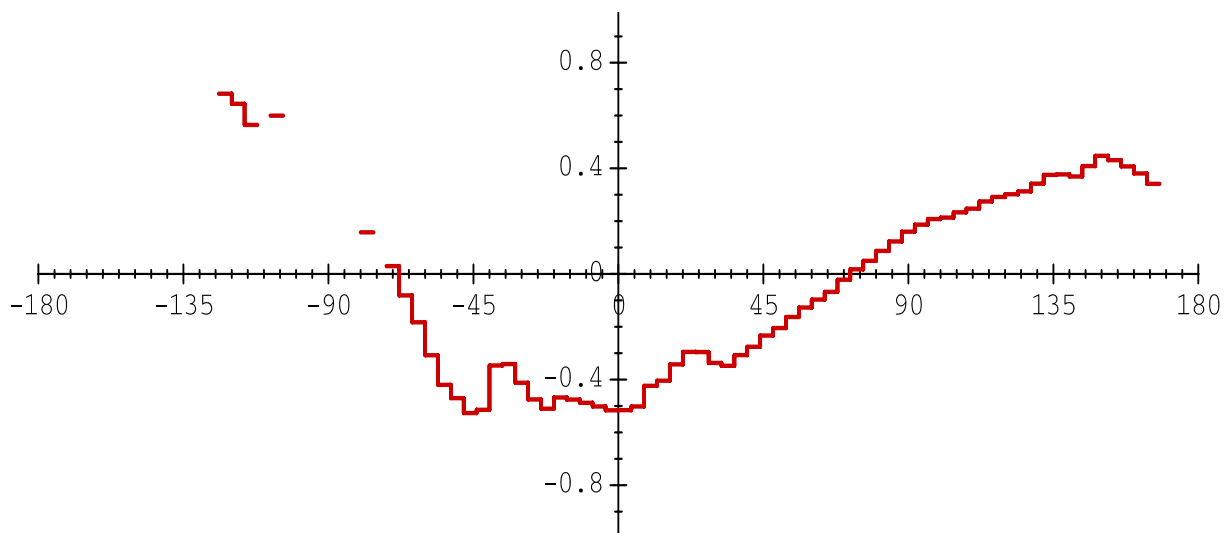


Рис. 2. Зависимость систематической ошибки по азимуту от азимута замера для первичной РЛС «Сафоново». Горизонтальная ось – азимут замера, вертикальная ось – систематическая ошибка по азимуту.

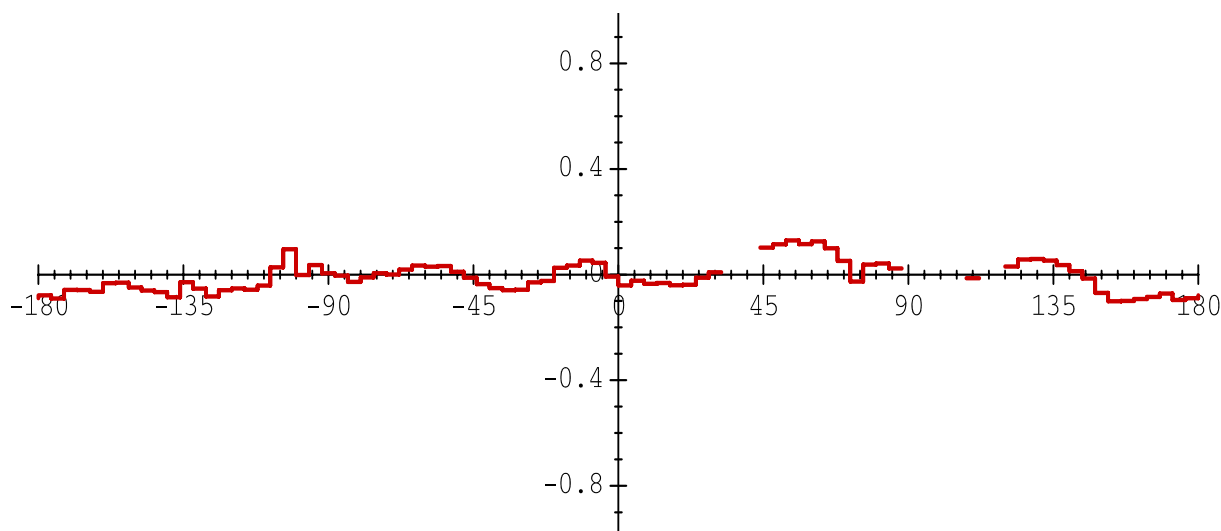


Рис. 3. Зависимость систематической ошибки по азимуту от азимута замера для вторичной РЛС «Домодедово». Горизонтальная ось – азимут замера, вертикальная ось – систематическая ошибка по азимуту.

Полученные результаты могут быть применены в алгоритмах систем управления воздушным движением.

При написании статьи использованы результаты работы автора по договору о сотрудничестве между Институтом математики и механики УрО РАН (Екатеринбург) и фирмой «Новые информационные технологии в авиации» (Санкт-Петербург).

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Динамические системы и теория управления», при финансовой поддержке УрО РАН (проект 12-П-1-1002), а также при поддержке РФФИ (проекты 10-01-96006-урал-а, 12-01-00537).

Литература

1. Иванов А.Г. Параллельная программа поиска минимума // Высокопроизводительные вычисления и их приложения: Труды Всероссийской научной конференции. г. Черноголовка, 30 октября - 2 ноября 2000 г. М.: Изд-во МГУ, 2000. С. 250-252.
2. Иванов А.Г., Федотов А.А., Беляков А. В., Строков К.В.. Идентификация систематических азимутальных погрешностей радиолокаторов по наблюдениям за движением воздушного судна // Сборник материалов XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам / Под. ред. В.Г. Пешехонова. СПб.: Государственный научный центр Российской Федерации ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2011. С. 200-201.