

XXI САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИНТЕГРИРОВАННЫМ НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ



26 - 28 мая 2014 г.
Санкт-Петербург, Россия

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

- НАУЧНОГО СОВЕТА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИИ
- 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), США
- АССОЦИАЦИИ АСТРОНАВТИКИ И АЭРОНАВТИКИ ФРАНЦИИ (AAAF)
- ФРАНЦУЗСКОГО ИНСТИТУТА НАВИГАЦИИ (IFN)
- НЕМЕЦКОГО ИНСТИТУТА НАВИГАЦИИ (DGON)

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ СОВМЕЩЕНИЕ ТРЕКОВ ОТ НЕСКОЛЬКИХ РЛС, ОЦЕНКА СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК В ЗАМЕРАХ *

Д.А. Бедин¹, А.Г. Иванов², А.А. Федотов³

Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения
Российской академии наук, Екатеринбург, e-mail: iagsoft@imm.uran.ru

Аннотация

Ключевые слова: геометрическое совмещение треков, систематические ошибки РЛС

Рассматривается задача обработки замеров обзорных радиолокационных станций (РЛС), поступающих при наблюдении за воздушным движением. Целью обработки является совмещение треков воздушных судов, формируемых разными РЛС, и оценивание систематических ошибок РЛС (в виде набора «поправок» к замерам). Используется избыточность наблюдений при наличии данных от нескольких РЛС. В предлагаемом подходе ни одна из рассматриваемых РЛС принципиально не считается эталоном. Систематические ошибки определяются при совместной обработке замеров «соседних» РЛС с пересекающимися зонами видимости.

Введение

Рассматриваются замеры нескольких РЛС, зарегистрированные при наблюдении за воздушным движением в зоне размером до 1000 км. Замеры, помимо номера РЛС и номера воздушного судна (ВС), содержат географические координаты, высоту и время. Считается, что первичная обработка с идентификацией и отбраковкой недостоверных данных уже выполнена.

На начальном этапе выполняется предварительная оценка разностных составляющих систематических ошибок по парам РЛС. Здесь решается задача геометрического совмещения с поблочной обработкой данных. В качестве блоков берутся участки треков на небольших промежутках времени. Локальные наборы замеров от разных РЛС рассматриваются как геометрические фигуры (наборы точек).

При обработке таких наборов данных для различных участвующих в наблюдении пар РЛС подбираются параметры смещения треков одной РЛС относительно другой. Вычисляются соответствующие направление и величина сдвига треков для пар РЛС. Также рассчитывается среднеквадратичное отклонение (СКО) замеров относительно расчётного направления движения (направление с максимальной дисперсией разброса отметок замеров). При определении разностных параметров попарного совмещения треков не используется время замеров. Это принципиальный момент, позволяющий определить систематические ошибки геометрического положения замеров РЛС без учёта ошибок привязки замеров к единой шкале времени системы управления воздушным движением (УВД). Дополнительно (после компенсации систематических ошибок геометрического характера) появляется возможность оценки уровня рассинхронизации замеров от разных РЛС.

Ошибки геометрического положения раскладываются на азимутальную и дальностную составляющие. Соответствующие итоговые поправки к замерам формируются путём обработки совокупности локальных параметров геометрического совмещения треков РЛС по всей зоне УВД. Здесь выполняется оптимизационная процедура, минимизирующая среднеквадратичное отклонение между расчётными и фактическими (полученными на начальном этапе при локальной обработке данных) параметрами совмещения треков от разных РЛС.

Геометрический метод получения оценок систематических ошибок в замерах РЛС

В рассматриваемом методе получения оценок систематических ошибок РЛС ошибки геометрического положения и ошибки во времени (ошибки запаздывания) замеров рассчитываются независимо за счёт предварительного геометрического совмещения перекрывающихся по времени участков движения с использованием набора траекторий по некоторой зоне УВД.

В основе методики геометрического «сведения» участков треков от двух и более РЛС лежит построение «средней» линии, аппроксимирующей направление движения ВС. Расчётные данные берутся из небольших географических областей размером до 30–50 км, что позволяет считать сдвиги замеров от действия систематических ошибок РЛС приблизительно постоянными векторами. При этом можно ограничиться сдвигами треков без их деформации. Средняя линия по текущему фрагменту движения рассчитывается по методу главных компонент [1].

¹ Младший научный сотрудник.

² Главный программист.

³ Научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Расчёты выполняются в местной географической системе координат (ось OX направлена на Север, ось OY – вверх перпендикулярно плоскости местного горизонта, ось OZ – на Восток), привязанной к средней точке замеров всех РЛС по рассматриваемому фрагменту движения. К этой же точке привязываются полученные параметры геометрического совмещения, идущие в дальнейшую обработку. Для получения оценки направления движения наборы замеров от участвующих в наблюдении РЛС совмещаются по соответствующим «центрам масс» (среднее для геометрических координат). Далее по полученной совокупности отметок методом главных компонент определяем направление средней линии, относительно которой замеры имеют минимальное СКО.

Приведём необходимые расчёты для плоского случая (без учёта высоты). Пусть имеется совокупность отметок замеров $\{x_i, z_i\}$ в количестве n и $\{x_c, z_c\}$ – центральная точка. Подбирая среднюю линию, вычисляем её угол наклона A_c относительно оси OX по часовой стрелке:

$$A_c = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2\sigma_{12}} \right).$$

Здесь σ_{ij} – элементы ковариационной матрицы

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i - x_c)^2 & \sum_{i=1}^n ((x_i - x_c) \cdot (z_i - z_c)) \\ \sum_{i=1}^n ((x_i - x_c) \cdot (z_i - z_c)) & \sum_{i=1}^n (z_i - z_c)^2 \end{bmatrix}.$$

Для всех РЛС, участвующих в наблюдении за рассматриваемым участком движения ВС, определяются векторы Sd_i сдвига центральных точек треков РЛС относительно средней линии. Далее, по данным векторам для всевозможных пар РЛС с номерами i, j ($i < j$) рассчитываются величины D_{ij} относительного геометрического расхождения треков в направлении, перпендикулярном средней линии. Направление средней линии задаётся вектором $(\cos A_c, \sin A_c)$ в плоскости местного горизонта. Искомые величины D_{ij} рассчитываются как скалярное произведение:

$$D_{ij} = \langle Sd_i - Sd_j, (\sin A_c, -\cos A_c) \rangle.$$

Построения на плоскости иллюстрируются на рис. 1. Здесь по совокупности замеров от двух РЛС рассчитана средняя линия, определяемая текущим направлением движения. Стрелками показаны векторы отклонения Sd_1, Sd_2 соответствующих центральных точек треков от средней линии. Величина D_{12} относительного совмещения данных треков вычисляется по разности векторов $Sd_1 - Sd_2$ и вместе с направлением самой средней линии идёт в дальнейшую обработку. Для наглядности на рисунке средняя линия проходит через точку «центра масс» замеров. К этой же точке смещаются первоначальные треки РЛС.

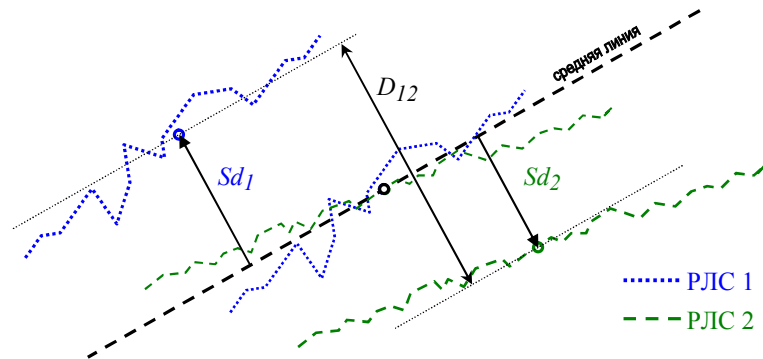


Рис. 1. Сведение участков треков с использованием метода главных компонент

В построениях участвуют все треки РЛС по рассматриваемому участку движения. Параметры геометрического совмещения треков определяются в совокупности по всем РЛС. Это позволяет конструктивно получить согласованные между собой параметры совмещения треков. В практических расчётах для полноты получаемой картины берутся перекрываемые по времени наблюдения участки движения ВС с замерами по всем наблюдающим РЛС.

Описанная выше реализация алгоритма геометрического совмещения треков РЛС работает по одиночным (от одного ВС) фрагментам движения, и найденные значения D_{ij} относительного расхождения треков интерпретируются как величины сдвига по направлению нормали $(\sin A_c, -\cos A_c)$. Полученные значения $\{D_{ij}, A_c\}$ по всем обработанным участкам движения используются для подбора постоянных поправок к замерам РЛС по азимуту и дальности. Совокупность «фактических» разностных векторов вида $D_{ij} \cdot (\sin A_c, -\cos A_c)$ обозначим через $\{(x_{Fk}, z_{Fk})\}$. С другой стороны, используя модель постоянных систематических ошибок по азимуту и дальности, получаем другое (модельное) поле разностных

векторов (относительных сдвигов замеров для пар РЛС). Совокупность таких векторов обозначим $\{(x_{Rk}, z_{Rk})\}$. Оптимизируемый функционал связан с расхождением рассмотренных выше двух векторных полей и записывается в виде

$$\sum_k (x_{Fk}^2 + z_{Fk}^2 - x_{Fk}x_{Rk} - z_{Fk}z_{Rk})^2 \rightarrow \min. \quad (*)$$

Аналогичная схема рассматривалась в работе [2], где данные фактического расхождения треков также представлялись в виде векторного поля, а оптимизируемый функционал формировался по разностному полю в виде $\sum((x_{Rk} - x_{Fk})^2 + (z_{Rk} - z_{Fk})^2) \rightarrow \min$. В этом случае операция геометрического совмещения выполнялась по всем трекам из некоторой малой географической области за заданный промежуток времени, что с вычислительной точки зрения оказывается достаточно трудоёмко. Кроме того, требовалось выполнение условий, связанных с плотностью движения – наличие пересекающихся трасс или крутых поворотов. Новая схема может работать в зонах ответственности УВД с невысокой плотностью движения без обязательного выполнения этих условий. При этом существенно уменьшается время счёта.

Расчёты по модельным данным замеров РЛС

Чтобы составить представление о том, как может выглядеть разностное поле сдвигов замеров РЛС из-за систематических ошибок по азимуту Δ^α и дальности Δ^d , приведём два модельных варианта (рис. 2) данных для некоторой пары РЛС со значениями систематических ошибок из таблицы:

Вариант	РЛС № 1		РЛС № 2	
	Δ_1^α	Δ_1^d	Δ_2^α	Δ_2^d
№ 1	+0,2°	500 м	+0,2°	500 м
№ 2	+0,2°	500 м	-0,2°	0 м

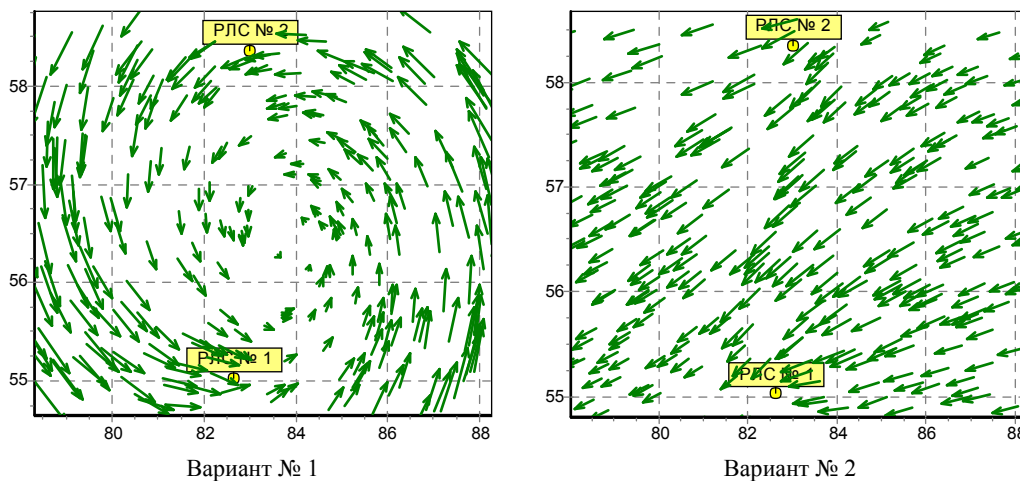


Рис. 2. Модельные разностные сдвиги замеров РЛС (по осям – градусы долготы и широты)

С целью тестирования предложенного метода и разработанного программного обеспечения были взяты имитационные данные наблюдений за воздушным движением в некоторой зоне УВД в течение часа. На рис. 3. изображены два фрагмента движений ВС до учёта систематических ошибок РЛС и соответствующего сведения треков (вверху) и после сведения (внизу). Показаны восемь из двенадцати РЛС, по которым формировались замеры, содержащие информацию об азимуте, наклонной дальности и высоте ВС. По ряду РЛС формировались систематические ошибки по азимуту в диапазоне $1^\circ - 5^\circ$ и по дальности в пределах 1 км.

Для минимизации функционала вида (*) использовался метод покоординатного спуска [3]. Точность восстановления значений систематических ошибок по азимуту находится на уровне $0,01^\circ$. Хуже обстоит дело с оцениванием систематических ошибок по дальности. Потребовалось три итерации используемого метода, чтобы получить точность на уровне 30 м. На нижней части рис. 3 представлены треки ВС, скорректированные на оценки систематических ошибок РЛС по азимуту/дальности, взятые со знаком минус. Видно, что характер совмещения треков по геометрическим координатам существенно улучшается после учёта систематических ошибок замеров.

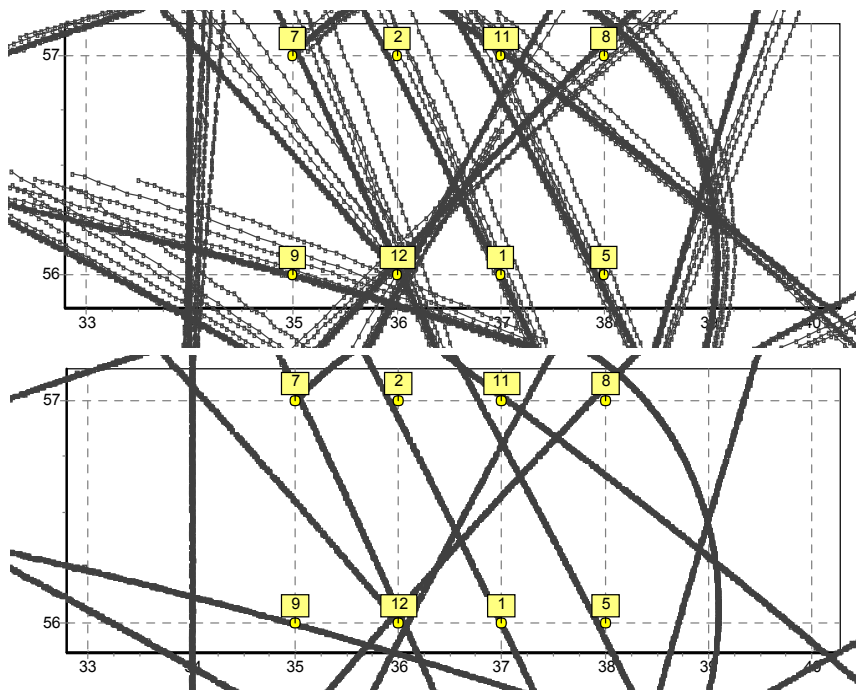
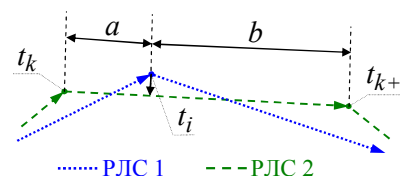


Рис. 3. Модельная траекторная информация до (вверху) и после (внизу) сведения

После учёта систематических ошибок положения замеров РЛС (по азимуту/дальности), т.е. после совмещения треков по геометрическим координатам, выполняется оценка взаимного расхождения замеров по времени для различных пар РЛС. Искомые оценки вычисляются как среднее расхождение по времени для наборов точек треков РЛС (рис. 4) в виде $(\sum \Delta t_i - \sum \Delta t_k) / N$. Здесь где N – общее количество значений Δt_i и Δt_k . Формула для Δt_i приведена на рисунке, где t_i – время замеров РЛС 1, а t_k – время замеров РЛС 2. Значения Δt_k вычисляются аналогичным образом с Δt_i : по совокупности замеров второй РЛС относительно замеров первой. Используется кусочно-линейная аппроксимация треков РЛС. Получаемый результат – относительные величины поправок по времени.



$$\Delta t_i = [t_i - t_k - (t_{k+1} - t_k) \cdot a / (a + b)]$$

Рис. 4. Оценка рассинхронизации замеров РЛС

Заключение

Достоинство предлагаемого метода геометрического сведения треков заключается в получении оценок систематических ошибок геометрического положения замеров *независимо* от ошибок привязки по времени в замерах РЛС. Соответствующие аддитивные поправки к замерам РЛС рассчитываются с использованием относительных параметров геометрического совмещения участков треков ВС. В рамках используемой модели ошибок для каждой РЛС подбираются индивидуальные постоянные поправки по азимуту и дальности. Приведены результаты расчётов, демонстрирующие возможности рассматриваемого метода. Рассмотрены имитационные данные наблюдений за воздушным движением.

Исследования производились в сотрудничестве с фирмой «НИТА».

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 №12-01-00537, №13-01-96055).

Литература

1. Метод главных компонент / Википедия. [2007—2014].
URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Метод%20главных%20компонент> (дата обращения: 02.03.2014).
2. Бедин, Д.А., Беляков, А.В., Ганебный, С.А., Иванов, А.Г., Строков, К.В., Федотов, А.А. Совместная обработка данных от нескольких РЛС для выявления систематических ошибок по азимуту и дальности / Радиолокация, навигация, связь – Воронеж: доклады 19-й международной научно-технической конференции – 2013. – Т. 3. – С.1567–1578.
3. Банди, Б. Методы оптимизации (вводный курс). – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.