

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
ГосНИИ ГА

SCIENTIFIC BULLETIN
OF THE STATE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF CIVIL AVIATION (GosNII GA)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ (№ 319)

№ 8

Москва
2015

ББК 39.5
НЗ4

Научный вестник ГосНИИ ГА

№ 8 (319)

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 29 июня 2011 г.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-61476 от 24 апреля 2015 г.

Подписано в печать 04.08.2015

Печать офсетная
11 усл. печ. л.

Формат 60x84/8
Заказ № 6703

6,5 уч. изд. л.
Тираж 130 экз.

Федеральное государственное унитарное предприятие
Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации
125438, Москва, ул. Михалковская, д. 67, корп. 1

ООО «Анкил»
105005, г. Москва, Елизаветинский пер., д. 6, офис 23

Отпечатано в ОП и МТ МГИМО (У) МИД РФ
119454, Москва, пр. Вернадского, 76
Тел.: 8-495-434-93-69

Подписной индекс в каталоге Роспечати **70663**
© ФГУП Государственный НИИ гражданской авиации, 2015

Редакционная коллегия

Главный редактор	– заслуженный работник транспорта РФ, д-р техн. наук, проф. В.С. Шапкин (<i>ФГУП ГосНИИ ГА</i>)
Зам. главного редактора	– д-р экон. наук С.С. Демин (<i>ФГУП ГосНИИ ГА</i>)
Ответственный секретарь	– канд. техн. наук А.И. Плешаков (<i>ФГУП ГосНИИ ГА</i>)

Члены редакционной коллегии

канд. техн. наук Е.С. Вайцехович (*АОА «Минский завод гражданской авиации № 407»*);
д-р техн. наук Г.Н. Гипич (*ОАО «Авиатехприемка»*);
канд. техн. наук М.С. Громов (*ФГУП ГосНИИ ГА*);
заслуженный работник транспорта РФ, д-р техн. наук С.В. Далецкий (*ФГУП ГосНИИ ГА*);
канд. техн. наук О.А. Евтушенко (*филиал «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА*);
д-р техн. наук И.Г. Кирпичев (*ФГУП ГосНИИ ГА*);
д-р техн. наук, проф. В.Б. Козловский (*ОАО «НПК ПАНХ»*);
д-р техн. наук А.А. Комов (*ФГУП ГосНИИ ГА*);
заслуженный работник высшей школы, д-р техн. наук, проф. Е.А. Куклев (*СПб ГУ ГА*);
д-р техн. наук А.А. Кулешов (*ФГУП ГосНИИ ГА*);
д-р техн. наук В.Я. Кушельман (*филиал «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА*);
д-р техн. наук Г.Е. Масленникова (*ФГУП ГосНИИ ГА*);
д-р техн. наук, проф. В.В. Никонов (*МГТУ ГА*);
д-р техн. наук Ю.В. Попов (*ФГУП ГосНИИ ГА*);
заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. Н.Н. Сиротин (*ФГУП ГосНИИ ГА*);
заслуженный работник транспорта РФ, д-р техн. наук, проф. С.Ю. Скрипниченко (*ФГУП ГосНИИ ГА*);
канд. техн. наук Ж.В. Сладь (*филиал «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА*);
д-р инж. наук А.М. Сорокин (*ИЦ «РНЭЦ «Авиатест-ЛНХ»*);
заслуженный работник транспорта, канд. техн. наук О.Ю. Страдомский (*ФГУП ГосНИИ ГА*);
канд. техн. наук М.Е. Хаймзон (*ФГУП ГосНИИ ГА*).

Технический секретарь – Л.Л. Долгова (*ФГУП ГосНИИ ГА*)

Тел./факс: 8 (495) 956-49-63 (*1018)

E-mail: science@gosniiga.ru

Плата за публикацию в Научном вестнике ГосНИИ ГА с аспирантов и студентов не взимается.

Editorial board

Chief editor	Shapkin V.S., Dr. Tech. Sci., Professor, General Director, GosNII GA, Moscow, Russia.
Deputy chief editor	Demin S.S., Dr. Econ. Sci., Deputy General Director, GosNII GA, Moscow, Russia.
Responsible Secretary	Pleshakov A.I., Cand. Tech. Sci., Scientific Secretary, GosNII GA, Moscow, Russia.

The members of the editorial board

Vaitsehovich E.S. Cand. Tech. Sci., “Minsk Plant of Civil Aviation No. 407”, Minsk, Belarus
Gipich G.N. Dr. Tech. Sci., JSC “Aviatechpriemka”, Moscow, Russia
Gromov M.S. Cand. Tech. Sci., GosNII GA, Moscow, Russia
Daletskiy S.V. Dr. Tech. Sci., GosNII GA, Moscow, Russia
Yevtushenko O.A. Cand. Tech. Sci., Branch “R&D Institute of Air Navigation” of GosNII GA, Moscow, Russia
Kirpichev I.G. Dr. Tech. Sci., GosNII GA, Moscow, Russia
Kozlovskiy V.B. Dr. Tech. Sci., Professor, JSC “PANH Helicopters”, Krasnodar, Russia
Komov A.A. Dr. Tech. Sci., GosNII GA, Moscow, Russia
Kuklev E.A. Dr. Tech. Sci., Professor, Saint-Petersburg State University CA, Saint-Petersburg, Russia
Kuleshov A.A. Dr. Tech. Sci., GosNII GA, Moscow, Russia
Kushelman V.Ya. Dr. Tech. Sci., Branch “R&D Institute of Air Navigation” of GosNII GA, Moscow, Russia
Maslennikova G.E. Dr. Tech. Sci., GosNII GA, Moscow, Russia
Nikonov V.V. Dr. Tech. Sci., Professor, MSTU CA, Moscow, Russia
Popov Yu.V. Dr. Tech. Sci., GosNII GA, Moscow, Russia
Sirotin N.N. Dr. Tech. Sci., Professor, GosNII GA, Moscow, Russia
Skripnichenko S.Yu. Dr. Tech. Sci., Professor, GosNII GA, Moscow, Russia
Slad’ Zh.V. Cand. Tech. Sci., Branch “R&D Institute of Air Navigation” of GosNII GA, Moscow, Russia
Sorokin A.M. Dr. Tech. Sci., “Aviatest-LNK” Ltd., Riga, Latvia
Stradomskiy O.Yu. Cand. Tech. Sci., GosNII GA, Moscow, Russia
Haimson M.E. Cand. Tech. Sci., GosNII GA, Moscow, Russia

Technical Secretary – Dolgova L.L., GosNII GA, Moscow, Russia.

Tel./fax: 8 (495) 956-49-63 (*1018)

E-mail: science@gosniiga.ru

Payment for the publication in the Scientific Bulletin of GosNII GA from graduate students and students it isn't raised.

Federal State Unitary Enterprise The State Scientific Research Institute of Civil Aviation
Legal and postal address: Mikhalkovskaya St., 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation

Ankil Ltd.

Elizavetinsky Lane, 6, office 23, 105005 Moscow, Russian Federation

УДК 528.088.6, 621.396.969.34

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК РЛС, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ДАННЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Д.А. БЕДИН, С.А. ГАНЕБНЫЙ, А.Г. ИВАНОВ, С.Г. ПЯТКО, А.А. ФЕДОТОВ

Аннотация. Рассматриваются три подхода к решению проблемы оценки систематических ошибок в измерениях РЛС, полученных из нескольких перекрывающихся областей наблюдения. При этом ни одна из РЛС не является эталоном. Систематические ошибки определяются путем обработки измерений РЛС за счет избыточности в радиолокационных данных. Предложенные методы могут быть использованы в вычислительно-информационных комплексах систем управления воздушным движением.

Ключевые слова: радиолокация, систематические ошибки РЛС, алгоритмы оценивания.

Введение

Рассмотрим ситуацию, когда несколько РЛС наблюдают за движением самолета. Каждая РЛС дает свой трек. Не всегда эти треки близки между собой. Если они удалены друг от друга, то при восстановлении траектории воздушного судна (ВС) в реальном времени возникают существенные трудности. Причиной расхождения треков является наличие систематических ошибок радиолокаторов.

Пусть известны данные измерений нескольких РЛС за длительный промежуток времени (например, сутки) в большой географической зоне. Поставим задачу об идентификации систематических ошибок РЛС в рассматриваемой зоне по этим данным. В дальнейшем оценки ошибок можно использовать при наблюдении за конкретным самолетом в реальном времени.

В статье рассмотрены три подхода к решению задачи идентификации систематических ошибок РЛС на основе обработки большого числа данных. Подчеркнем, что мы заранее не предполагаем отсутствие систематических ошибок («идеальность») у какого-либо локатора. Статья примыкает к исследованиям [1–3], в которых тоже рассматривается задача определения систематических ошибок. В указанных работах алгоритм оценивания применяется к выборкам данных из достаточно малой области пространства. Предлагаемые в этой статье подходы существенно используют данные по всей зоне наблюдения, что позволяет лучше идентифицировать пространственную зависимость систематических ошибок.

Работа выполнена сотрудниками Института математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук (ИММ УрО РАН, Екатеринбург) и компании ООО «Фирма “Новые информационные технологии в авиации”» (Фирма «НИТА», Санкт-Петербург). При моделировании использованы реальные данные, полученные в Московском и Новосибирском центрах управления воздушным движением (УВД).

1. Модель наблюдения

Первичные РЛС измеряют два значения, которые характеризуют положение ВС. Первое – наклонная дальность r между самолетом и РЛС, второе – азимут α , т. е. угол между направлением от РЛС на север и горизонтальной проекцией луча «РЛС – ВС». Вторичный обзорный радиолокатор дополнительно получает высоту h от ВС. Тройку (r, α, h) легко конвертировать в геоцентрические и географические координаты.

Обозначим через m общее число РЛС, наблюдающих самолет A . Рассмотрим процесс наблюдения, осуществляемый РЛС с идентификатором i (этот символ будет присутствовать в индексах соответствующих переменных). Пусть $x(t)$ – вектор реального положения ВС

в момент t , а $r_i(x(t))$, $\alpha_i(x(t))$ – наклонная дальность от ВС до РЛС i и его азимут. Высоту ВС над поверхностью Земли обозначим через $h(x(t))$.

Уравнения наблюдения в случае вторичного радиолокатора имеют вид

$$\begin{aligned} z_i^r(A, t) &= r_i(x(t)) + \Delta_i^r(x(t)) + w_i^r(t), \\ z_i^\alpha(A, t) &= \alpha_i(x(t)) + \Delta_i^\alpha(x(t)) + w_i^\alpha(t), \quad i = \overline{1, m}, \\ z^h(A, t) &= h(x(t)) + w_i^h(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь z_i^r , z_i^α , z^h – измерения дальности, азимута и высоты для ВС A в момент t . Далее символ A будем опускать, если это не приводит к недоразумению. Переменные Δ_i^r , Δ_i^α обозначают систематические ошибки по дальности и азимуту, которые являются неслучайными искажениями, зависящими от местоположения x ВС относительно РЛС i . Кроме того, во всех измерительных каналах имеются случайные ошибки. В системе (1) они обозначены через w_i^r , w_i^α , w_i^h . В каналах дальности и азимута случайные ошибки имеют адекватное вероятностное описание. Математические ожидания величин w_i^r , w_i^α равны нулю; известна их матрица ковариации. Для любых различных моментов t_1 , t_2 случайные величины $w_i^r(t_1)$, $w_i^r(t_2)$, $w_i^\alpha(t_1)$ и $w_i^\alpha(t_2)$ взаимно независимы и не зависят от местоположения x ВС. Ошибки w_i^h в канале высоты имеют малую величину и не оказывают существенного влияния на дальнейшую оценку.

Используя геоцентрическую систему координат, уравнения (1) можно записать в виде

$$z_i(A, t) = x(t) + s_i(x(t)) + w_i(t, x(t)), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где z_i – вектор, соответствующий тройке (z_i^r, z_i^α, z^h) ; вектор s_i обозначает сдвиг, описывающий влияние систематической ошибки на замеры; вектор w_i – сдвиг, связанный со случайными ошибками.

2. Постановка задачи

Если ВС движется через несколько перекрывающихся областей радиолокационного наблюдения и каждая РЛС имеет свои систематические ошибки $\Delta_i^r(x)$, $\Delta_i^\alpha(x)$, треки этого ВС от различных РЛС будут отличаться друг от друга (рис. 1). В случае когда присутствуют дополнительные эталонные измерения, систематические ошибки каждой РЛС можно определить сравнением эталонных и радиолокационных данных. Но такую дополнительную внешнюю информацию (например, из системы ADS-B) о траектории ВС не всегда легко получить на практике. В данной работе обсуждаются алгоритмы, которые используют только радиолокационную информацию.

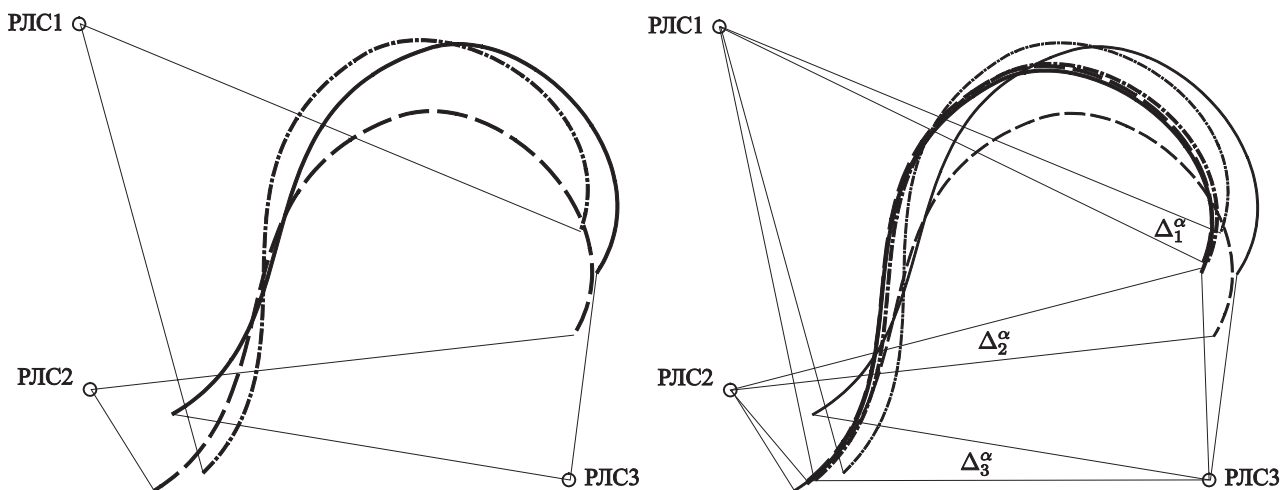


Рис. 1. Треки наблюдения одного ВС тремя РЛС (схема). Слева показаны исходные треки, справа – треки после коррекции систематических ошибок Δ_i^α по азимуту

Определение систематических ошибок может рассматриваться как задача о нахождении поправок, которые сводят (сближают) все радиолокационные данные. В качестве вектора коррекции для РЛС i можно взять вектор $-\hat{s}_i(x)$, где $\hat{s}_i(x)$ – оценка вектора сдвига $s_i(x)$. Желательно, чтобы сведенные треки одного ВС от различных РЛС выглядели как один трек после коррекции сдвигов. Проблема сведения может быть решена, если оценки $\hat{s}_i(x)$ близки к истинному значению $s_i(x)$, или, что одно и то же, оценки $\hat{\Delta}_i^r(x)$, $\hat{\Delta}_i^\alpha(x)$ близки к истинным значениям $\Delta_i^r(x)$, $\Delta_i^\alpha(x)$. Таким образом, мы пытаемся найти «хорошие» оценки для систематических ошибок.

В алгоритмах разделов 3 и 4, следуя работам [1, 2, 4, 5], полагаем, что функции $\Delta_i^r(x)$, $\Delta_i^\alpha(x)$ (или $s_i(x)$) принадлежат некоторому параметрическому классу функций:

$$\forall x \in R^3 \quad \forall i = \overline{1, m} \quad \Delta_i^r(x) = D^r(x, \vartheta), \quad \Delta_i^\alpha(x) = D^\alpha(x, \vartheta).$$

Здесь ϑ – вектор всех неизвестных параметров модели. В этом случае пытаемся найти оценки в том же классе:

$$\forall x \in R^3 \quad \forall i = \overline{1, m} \quad \hat{\Delta}_i^r(x) = D^r(x, \hat{\vartheta}), \quad \hat{\Delta}_i^\alpha(x) = D^\alpha(x, \hat{\vartheta}).$$

Это приводит к оценке неизвестного параметра ϑ при помощи некоторого критерия, который зависит от качества сведения треков после коррекции посредством оценок $\hat{\Delta}_i^r(x)$, $\hat{\Delta}_i^\alpha(x)$. Соответствующая процедура обеспечивает малое значение величины математического ожидания $E \{ \|\hat{\vartheta} - \vartheta\|^2 \}$. Следовательно, получаем малые значения величин

$$E \{ |\hat{\Delta}_i^r(x) - \Delta_i^r(x)|^2 \}, \quad E \{ |\hat{\Delta}_i^\alpha(x) - \Delta_i^\alpha(x)|^2 \}, \quad x \in R^3.$$

Самым простым является вариант, когда неизвестный векторный параметр ϑ имеет смысл *постоянных* систематических ошибок (по дальности и азимуту) для всех РЛС.

Алгоритм раздела 5 развивает (для случая известной высоты) подход, описанный в [3], используя непараметрический метод оценивания без каких-либо предварительно определенных моделей для функций $\Delta_i^r(x)$, $\Delta_i^\alpha(x)$. Оказалось, что в любой небольшой области наблюдения замеры позволяют оценить некоторые линейные комбинации «средних» значений $\Delta_i^r(x)$, $\Delta_i^\alpha(x)$ для разных i , причем без каких-либо дополнительных предположений о структуре функций $\Delta_i^r(x)$, $\Delta_i^\alpha(x)$ в целом. Количество таких комбинаций на две меньше, чем число наблюдаемых радиолокаторами величин. К сожалению, это не дает возможности сделать точечную оценку значений Δ_i^r , Δ_i^α для какой-либо РЛС. Чтобы решить эту проблему, необходима дополнительная информация о функциях $\Delta_i^r(x)$, $\Delta_i^\alpha(x)$.

3. Параметрический алгоритм оценивания систематических ошибок

Первый алгоритм определения систематических ошибок был разработан на основе параметрического подхода. В этом алгоритме каждая траектория ВС обрабатывается отдельно с целью нахождения индивидуальной оценки систематических ошибок (первый этап алгоритма). Окончательное поле сдвигов $\hat{s}_i(x)$ вычисляется процедурой усреднения (второй этап алгоритма) с использованием индивидуальных оценок, которые были получены ранее. Предполагается, что количество ВС и продолжительность их треков достаточны для адекватного усреднения. Кроме того, важно, чтобы пространственный охват треков ВС был достаточно велик для уверенности в выводах о структуре функции $\hat{s}_i(x)$. Также мы предполагаем, что моменты измерений точно известны.

Алгоритм может работать с данными наблюдений первичных РЛС без какой-либо информации о высоте самолета.

3.1. Оценка систематических ошибок одного ВС

Рассматриваются только такие участки траекторий ВС, которые наблюдались двумя или более РЛС одновременно. Если часть траектории наблюдалась лишь одной РЛС, эта часть удаляется из процесса оценки.

Введем понятие вспомогательного восстановленного трека как кусочно-линейной трехмерной кривой, которая приближает истинное движение ВС. Узлы восстановленного трека соответствуют заранее фиксированной временной сетке. Пусть x_k, y_k, z_k – координаты узла в момент k .

В случае когда замер РЛС включает в себя информацию о высоте, поставим ему в соответствие гипотетическую точку прогнозного положения ВС в трехмерном пространстве. Ее координаты зависят от координат РЛС, наклонной дальности, азимута, высоты замера и, кроме того, от прогнозных систематических ошибок по азимуту и дальности. Если информация о высоте отсутствует (случай первичной РЛС или когда измерение вторичной РЛС не содержит достоверное значение высоты), то получаем неопределенность в виде некоторой дуги окружности в трехмерном пространстве. Расположение дуги зависит от координат РЛС, наклонной дальности, азимута замера и от прогнозных систематических ошибок по дальности и азимуту.

Для замера с номером j от РЛС i вычисляем невязку $\delta_{i,j}^2$ – квадрат расстояния между неопределенностью замера (точка в случае известной и дуга в случае неизвестной высоты) и точкой восстановленного трека, соответствующей моменту замера. Невязка зависит от данных замера (наклонной дальности, азимута и, возможно, высоты) и от координат расположения РЛС. Перечисленные величины в процессе оптимизации не варьируются. Кроме того, на невязку влияют координаты (x_k, y_k, z_k) , $(x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1})$ двух точек восстановленного трека и прогнозные систематические ошибки $\Delta_i^\alpha, \Delta_i^r$ рассматриваемой РЛС (предполагается, что систематические ошибки не зависят от измеренного азимута и наклонной дальности). Следовательно,

$$\delta_{i,j}^2 = \delta_{i,j}^2(\Delta_i^\alpha, \Delta_i^r, x_k, y_k, z_k, x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1}).$$

Момент k в сетке восстановленного трека определяется по номеру j .

Суммируя все невязки, относящиеся к рассматриваемому ВС, получаем *суммарную* невязку

$$D = \sum_i \sum_j \delta_{i,j}^2.$$

Она зависит от координат всех РЛС, наблюдавших ВС, от систематических ошибок этих РЛС, от координат точек восстановленного трека и данных всех замеров по этому ВС. Координаты точек восстановленного трека и прогнозные систематические ошибки РЛС рассматриваются в качестве независимых переменных, которые можно варьировать:

$$D = D(\Delta_1^\alpha, \Delta_2^\alpha, \dots, \Delta_1^r, \Delta_2^r, \dots, x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots).$$

Таким образом, проблема сводится к задаче минимизации функции многих переменных:

$$D(\Delta_1^\alpha, \Delta_2^\alpha, \dots, \Delta_1^r, \Delta_2^r, \dots, x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots) \rightarrow \min.$$

Решая задачу минимизации, получаем значения координат вершин восстановленного трека. Одновременно реализуем реконструкцию некоей «средней» траектории ВС и находим предполагаемые систематические ошибки, которые наилучшим образом соответствуют параметрам задачи (данным замеров и координатам РЛС).

Для минимизации функции многих переменных использован метод Хука – Дживса [6] с небольшими изменениями.

На начальном этапе исследований предполагалось, что систематическая ошибка по дальности отсутствует, а систематическая ошибка по азимуту для каждой РЛС есть величина, которая не зависит от измеряемого азимута и наклонной дальности. Но применение такой

модели для обработки реальных данных во многих случаях давало неудовлетворительные результаты. А именно, эмпирическая дисперсия систематической ошибки, найденная для различных ВС, часто была большой. Попутно было замечено, что существует корреляция систематической ошибки со средним азимутом РЛС-трека. Все это привело к предположению о зависимости систематической ошибки по азимуту от измеренного азимута. В программном обеспечении были реализованы кусочно-линейная и тригонометрическая зависимости систематических ошибок от измеренного азимута. Кроме того, в программе была учтена относительная систематическая ошибка по дальности. Такая ошибка считается постоянной и индивидуальной для каждой РЛС. Пример результатов работы алгоритма для одного ВС представлен на рис. 2.

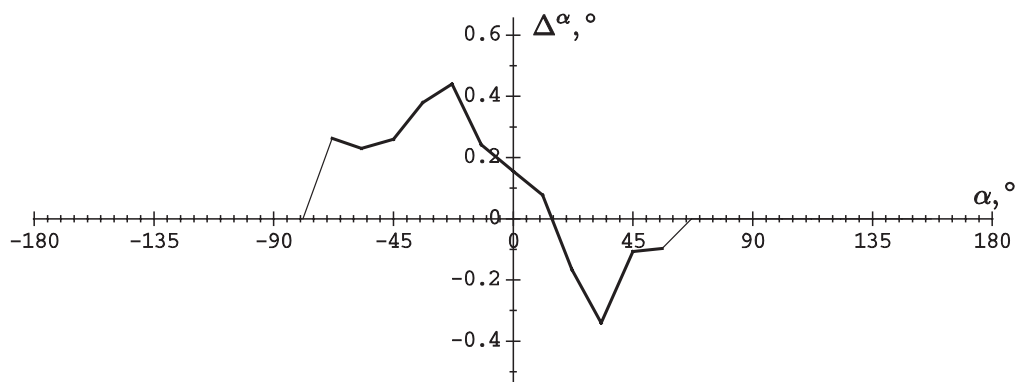


Рис. 2. Пример восстановления систематической ошибки по азимуту для одного ВС – кусочно-линейная зависимость систематической ошибки по азимуту от азимута замера

3.2. Статистическая обработка треков многих ВС

По многим причинам результаты обработки треков только для одного ВС не могут быть использованы для других ВС. В частности, область азимутальных замеров одного ВС не обязана совпадать с аналогичной областью замеров других судов. Тем не менее можно построить общую усредненную картину систематических ошибок РЛС в зоне наблюдения на основе обработки больших объемов данных по воздушному движению в рассматриваемой зоне в течение достаточно большого промежутка времени (от нескольких часов до целых суток). Такие результаты не будут содержать недостатков обработки данных только одного ВС. Пример средней зависимости систематической ошибки по азимуту от азимута замера показан на рис. 3.

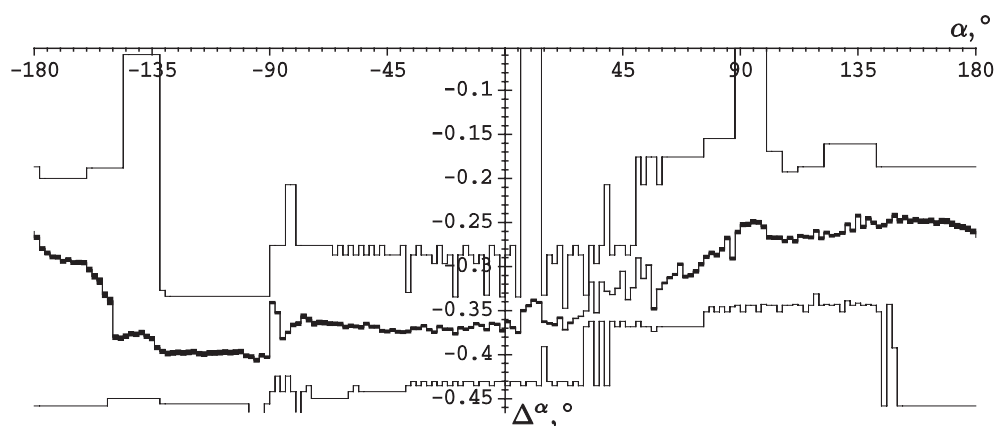


Рис. 3. Пример зависимости систематической ошибки в азимутальных измерениях для одной РЛС на основе обработки измерений многих ВС по многим РЛС в Московской зоне

На рис. 3 центральная линия – усредненная оценка систематической погрешности; серые крайние линии соответствуют минимуму и максимуму индивидуальных оценок систематической ошибки.

Используя статистическую обработку, получаем зависимости систематической ошибки по дальности и систематической ошибки по азимуту как от дальности, так и от азимута. Такие зависимости можно представить в виде векторного поля (рис. 4). Они могут быть использованы для коррекции радиолокационных измерений по дальности и азимуту.

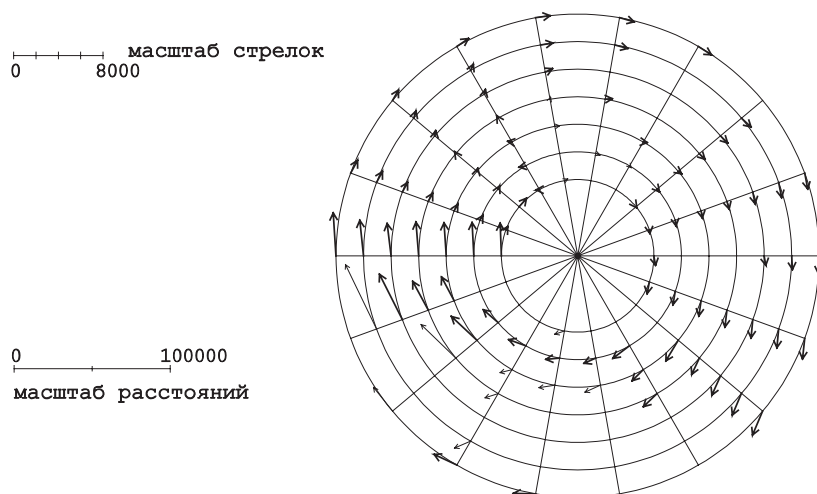


Рис. 4. Зависимость систематической ошибки для одной РЛС, представленная в виде векторного поля сдвигов замеров

На рис. 4 зависимость получена путем обработки данных от нескольких РЛС и многих ВС в Новосибирской зоне. Толщина стрелки соответствует количеству замеров вблизи рассматриваемого места.

4. Геометрический подход к определению систематических ошибок РЛС

В этом разделе будем считать, что РЛС, которые участвуют в наблюдении зоны УВД, имеют неизвестные, но *постоянные* систематические ошибки по азимуту и дальности. Ошибка по дальности предполагается аддитивной и не зависящей от дальности замера.

Рассмотрим две РЛС с перекрывающимися зонами наблюдения. Геометрическое расхождение замеров этих РЛС за счет систематических ошибок (без учета случайных ошибок) зависит от положения замера и образует векторное поле в пространстве замеров. Назовем такое поле *разностным* полем ошибок рассматриваемых РЛС.

По векторному разностному полю пары РЛС, для которых точно известно их местоположение, можно найти значения постоянных систематических ошибок по азимуту и дальности для обеих РЛС. Такая задача легко решается численно путем минимизации суммы квадратов разностей между модельными расхождениями (которые были получены выбором постоянных систематических ошибок по азимуту и дальности) и расхождениями, рассчитанными на основе входных данных (фактические несоответствия). При условии что положения РЛС не совпадают, решение такой задачи единственно. Для сведения треков от большого числа РЛС используется одна равномерная сетка по географическим координатам.

Процедура вычисления систематических ошибок по азимуту и дальности может быть легко расширена на случай трех и более РЛС, если известны соответствующие попарные оценки геометрического расхождения.

В изложенной схеме расчета оценки постоянных систематических ошибок РЛС по азимуту и дальности наиболее сложной операцией является получение входной информации о геометрическом расхождении замеров от двух РЛС. На практике, если рассматривать небольшую

географическую область, имеем (как правило) замеры с разной точностью и, кроме того, поступающие от соответствующих РЛС с различной частотой в разные моменты времени. Период поступления замеров от обзорных РЛС может достигать 20 с.

Для небольшой области с центром в точке с географическими координатами (ϕ, λ) систематические ошибки Δ_i^r и Δ_i^α РЛС с номером i примерно соответствуют постоянному вектору сдвига $s_i(\phi, \lambda, \Delta_i^r, \Delta_i^\alpha)$ в плоскости местного горизонта. Вектор s_i имеет следующее описание:

$$s_i(\phi, \lambda, \Delta_i^r, \Delta_i^\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_i^r \\ r_i \cdot \Delta_i^\alpha \end{bmatrix}.$$

Здесь r_i , α_i – средние дальность и азимут центра области относительно РЛС с номером i .

Обозначим разностный вектор между двумя векторами сдвига для РЛС i и p через

$$d_{ip}(\phi, \lambda, \Delta_i^r, \Delta_i^\alpha, \Delta_p^r, \Delta_p^\alpha) = s_i(\phi, \lambda, \Delta_i^r, \Delta_i^\alpha) - s_p(\phi, \lambda, \Delta_p^r, \Delta_p^\alpha).$$

Опираясь на реальные замеры, найдем разностный вектор $\tilde{d}_{ip}(\phi, \lambda)$, который характеризует расхождение между замерами РЛС i и p в рассматриваемой небольшой области. Чтобы определить вектор $\tilde{d}_{ip}(\phi, \lambda)$, используем все треки совокупности А ВС, которые находились в рассматриваемой области в течение некоторого интервала времени. Каждый из двух фрагментов этих треков берется как геометрическая фигура (составленная из набора кусочно-линейных сегментов) в проекции на плоскость местного горизонта. Вертикальные координаты различных РЛС-треков от одного ВС имеют близкие значения, потому что высота выдается самим ВС. Разностный вектор $\tilde{d}_{ip}(\phi, \lambda)$ рассчитывается путем наложения таких фигур с минимизацией взаимного суммарного расстояния $R_{ip}(\phi, \lambda)$ между кусочно-линейными сегментами треков (рис. 5). Суммарное значение $R_{ip}(\phi, \lambda)$ складывается из расстояний $\delta(z_i(t_k))$ от замеров РЛС i до ломаной с вершинами в замерах РЛС p и из расстояний $\delta(z_p(t_l))$, просчитанных наоборот – от замеров РЛС p к ломаной, связанной с замерами РЛС i :

$$R_{ip}(\phi, \lambda) = \sum_{A \in A, \{t_k^i\}} \|\delta(z_i(A, t_k^i))\|^2 + \sum_{A \in A, \{t_l^p\}} \|\delta(z_p(A, t_l^p))\|^2. \quad (3)$$

Здесь t_k^i , t_l^p – моменты замеров РЛС i и p . Отметим, что в расчетах по формуле (3) время замеров не используется. Поэтому полученная оценка геометрического расхождения треков РЛС i и p не зависит от возможных ошибок времени в замерах РЛС.

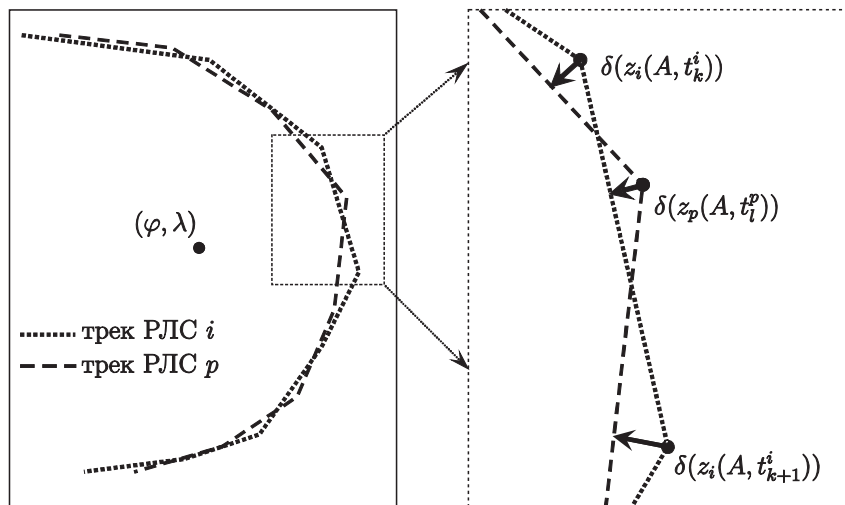


Рис. 5. Расчет суммарного расстояния $R_{ip}(\phi, \lambda)$ путем наложения фигур треков двух РЛС

Если указанные разностные векторы определены для некоторой совокупности $\{\pi_n\}$ больших областей π_n , то можно оценить постоянные систематические ошибки всех РЛС, минимизируя следующий критерий:

$$\sum_{i < p} \sum_{\{\pi_n\}} \left\| \tilde{d}_{ip}(\phi_n, \lambda_n) - d_{ip}(\phi_n, \lambda_n, \Delta_i^r, \Delta_i^\alpha, \Delta_p^r, \Delta_p^\alpha) \right\|^2 \xrightarrow{\{\Delta_i^r, \Delta_i^\alpha, \Delta_p^r, \Delta_p^\alpha\}} \min.$$

В некоторых случаях процедура наложения дает высокий уровень ошибок (даже если имеем большое количество замеров); например, если траектории всех ВС – параллельные прямые. Таким образом, в каждой небольшой геометрической области π_n необходимо наличие отрезков движения с различными направлениями. Кроме того, треки не должны иметь форму набора концентрических дуг.

Были разработаны специальные программы, которые позволяют автоматизировать описанную вычислительную схему, в том числе выбор геометрических областей π_n , для правильного расчета векторов невязки по парам РЛС. Тесты программного обеспечения показали стабильные результаты, особенно для зон с высокой интенсивностью движения. В таких случаях разностное векторное поле расхождений РЛС оказывается наиболее представительным.

В качестве иллюстрации приведем результаты расчетов по Новосибирской зоне УВД. На основе данных непрерывного (в течение 8 часов) наблюдения было рассчитано расхождение замеров РЛС на некоторой сетке географических координат. Подходящие поправки по азимуту и дальности были вычислены для каждой РЛС с помощью описанной выше процедуры оптимизации. На рис. 6 для одной пары РЛС с близкими позициями расположения представлены: исходные поправки (а), остаточные смещения (б) после учета только азимутальных поправок и остаточные смещения (в) после учета поправок по азимуту и дальности. Близкое расположение выбрано для того, чтобы было легче интерпретировать характер разностных векторов.

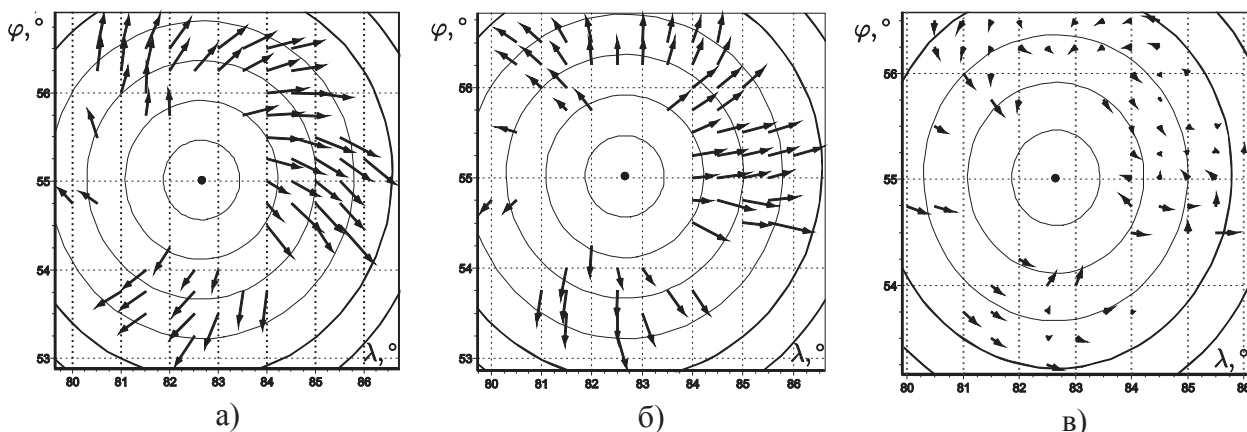


Рис. 6. Результаты расчетов разностного векторного поля для пары РЛС в Новосибирской зоне УВД: а) начальные разностные векторы; б) остаточные смещения после учета азимутальных поправок; в) остаточные смещения после учета азимутальных поправок и поправок по дальности

5. Алгоритм определения систематических ошибок при непараметрическом оценивании

На сегодняшний день основной метод для определения радиолокационных систематических ошибок Δ_i^r и Δ_i^α состоит в параметрическом оценивании [1, 2, 4, 5]. При таком подходе структура (или, иначе, модель) функций $\Delta_i^r(x)$, $\Delta_i^\alpha(x)$ задана заранее. Например, можно предположить, что систематические ошибки имеют вид $\Delta_i^r(x) \equiv 0$, $\Delta_i^\alpha(x) \equiv \Delta_i^{\alpha*} = \text{const}$. Алгоритм параметрического оценивания в этом случае находит неизвестные константы $\Delta_i^{\alpha*}$.

Предположения о структуре могут быть более сложными, но при параметрическом подходе они приводят к формулам вида

$$\Delta_i^r(x) = \sum_{q=1}^{P^r(i)} a_i^{rq} f_{iq}^r(x), \quad \Delta_i^\alpha(x) = \sum_{q=1}^{P^\alpha(i)} a_i^{\alpha q} f_{iq}^\alpha(x)$$

с предварительно заданными функциями $f_{iq}^r(x)$, $f_{iq}^\alpha(x)$ (здесь $P^r(i)$, $P^\alpha(i)$ – количество функций). Дальнейшие оценки связаны с определением неизвестных констант a_i^{rq} , $a_i^{\alpha q}$. Функции $f_{iq}^r(x)$, $f_{iq}^\alpha(x)$, как правило, выбираются на основе инженерных представлений о проблеме. Эффективность любого параметрического алгоритма оценки сильно зависит от этого выбора, который может оказаться неудачным.

Алгоритмы, описанные в предыдущих разделах, использовали параметрическое оценивание.

Для задачи оценивания систематических ошибок РЛС модель, в которой предполагалось, что $\Delta_i^r(x) \equiv 0$, $\Delta_i^\alpha(x) \equiv \Delta_i^{\alpha*} = \text{const}$, показала несовместимость с реальными данными. Индивидуальные оценки $\Delta_i^{\alpha*}$, полученные в экспериментах для различных ВС, сильно отличались друг от друга. Вариация индивидуальных результатов более чем в 10 раз превышала уровень, который может быть объяснен влиянием случайных ошибок.

На рис. 7 представлены отдельные результаты для семи траекторий; каждая индивидуальная оценка помечена толстой горизонтальной полоской, а «усы» (вертикальные отрезки) показывают уровень среднеквадратичного отклонения, умноженный на 3.

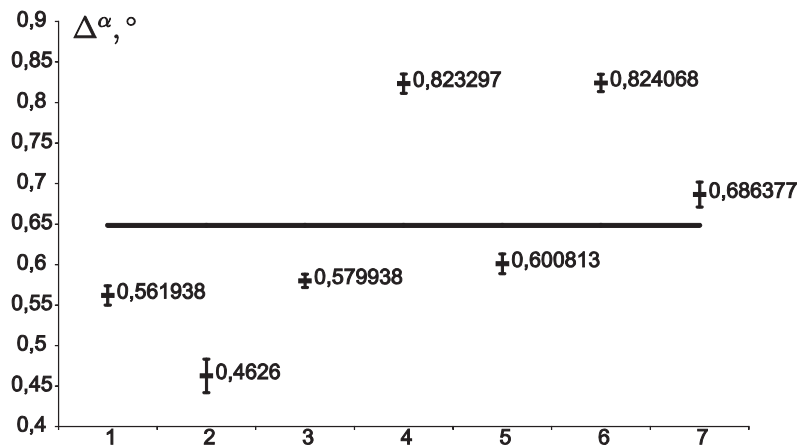


Рис. 7. Результаты определения систематических ошибок для индивидуальных траекторий

В качестве альтернативы попытаемся оценить систематические ошибки без использования фиксированной модели.

Все данные РЛС делятся на измерения индивидуальных траекторий ВС. Траектория содержит несколько треков от различных РЛС. Произведем предварительное сглаживание каждого трека. Эта процедура может быть сделана многими способами, например методом восстановления траектории ВС [7]. В дальнейшем будем рассматривать только сглаженные измерения. В сглаженных замерах уровень случайных ошибок достаточно мал. Поэтому пренебрегаем влиянием таких ошибок. Этот факт соответствует установке значений w_i^r , w_i^α , w_i^h , w_i равными нулю в формулах (1), (2).

Рассмотрим группу $Z(t)$ сглаженных замеров одного ВС от нескольких РЛС в некоторый момент t . На практике реальные замеры от различных РЛС приходят в различные моменты; но после процедуры сглаживания можно ввести новые замеры, созданные на основе исходных, но определенные на общем множестве моментов времени.

Обратим внимание, что нам ничего не известно о структуре функций $\Delta_i^r(x)$, $\Delta_i^\alpha(x)$, за исключением того, что они имеют ограниченные значения. Таким образом, истинное положение $x(t)$ ВС в момент t можно произвольно разместить около группы замеров $Z(t)$. Построим набор всех версий систематических ошибок, которые соответствуют имеющимся данным (т. е. группе одномоментных замеров) и тому, что вектор $x(t)$ является одним и тем же для различных РЛС. Назовем такой набор *множеством неопределенности* систематических ошибок

для данной группы измерений и обозначим его через $F(Z(t))$. Наиболее наглядно и просто это может быть сделано в геоцентрической системе координат для геометрических сдвигов $s_i(x)$. Рисунок 8 показывает некоторую группу из четырех замеров и один из возможных вариантов сдвигов, обусловленных систематическими ошибками.

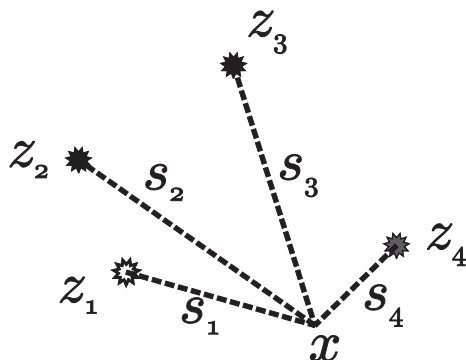


Рис. 8. Вариант сдвигов, обусловленных систематическими ошибками, в соответствии с группой Z одномоментных замеров

В ходе анализа было замечено, что группы $Z(t)$ замеров для различных моментов t похожи друг на друга, если они имеют близкие географические позиции. Группы изменяют свою конфигурацию довольно медленно вдоль любого трека ВС. Это позволяет рассматривать новое множество неопределенности для систематических ошибок, которое связано не с конкретной группой замеров, а с характерным расположением замеров разных РЛС друг относительно друга вблизи данной точки пространства. Такие наборы могут быть получены усреднением всех множеств неопределенности $F(Z(t))$ в небольшой геометрической области π_n около позиции x_n . Обозначим множество неопределенности в точке x_n через $F(x_n)$.

Задавая сетку $\{x_n\}$ пространственных положений, построим множество $F(x_n)$ в каждой точке x_n . Совокупность таких множеств для всех x_n описывает все возможные варианты систематических ошибок РЛС, хорошо согласованные с исходными данными (входными замерами). Подчеркнем, что построение множеств $F(x_n)$ не использует какую-либо модель систематических ошибок и не связано с *априорными* предположениями о структуре их зависимости от x_n . Используются только уравнения наблюдения (1), основанные на самой простой и общей информации.

Заметим, что система, описываемая уравнениями (1) или (2), не является полностью наблюдаемой по отношению к неизвестной позиции $x(t)$ ВС и всем переменным $\Delta_i^r(x(t))$, $\Delta_i^\alpha(x(t))$. Этот факт лежит в основе природы множества неопределенности $F(x_n)$. Невозможно дать точные оценки $\hat{\Delta}_i^r(x_n)$ и $\hat{\Delta}_i^\alpha(x_n)$ истинных величин $\Delta_i^r(x_n)$ и $\Delta_i^\alpha(x_n)$ в точке x_n . Мы можем найти только значения $2m_n - 2$ (где m_n – количество РЛС, наблюдающих в точке x_n) линейно независимых линейных комбинаций компонент составного вектора

$$f(x_n) = [\Delta_1^r(x_n), \Delta_1^\alpha(x_n), \dots, \Delta_{m_n}^r(x_n), \Delta_{m_n}^\alpha(x_n)]^T.$$

Множество неопределенности $F(x_n)$ в некоторой позиции x_n взаимно однозначно связано с оценкой $\hat{h}(x_n)$ величин $C(x_n)f(x_n)$, где $C(x_n)$ – матрица, с помощью которой выражаются все линейные комбинации $\Delta_i^r(x_n)$ и $\Delta_i^\alpha(x_n)$, поддающиеся оценке. Матрица $C(x_n)$ зависит от позиции x_n и совокупности наблюдающих РЛС. Наша оценка минимизирует значение математического ожидания

$$E \{ \|\hat{h}(x_n) - C(x_n)f(x_n)\|^2 \}$$

в классе линейных оценок для каждой позиции x_n .

Используя множества неопределенности $F(x_n)$, построим (тем или иным способом) однозначную оценку систематических ошибок $\Delta_i^r(x_n)$ и $\Delta_i^\alpha(x_n)$ на сетке $\{x_n\}$. Если выбрать значения $\Delta_i^r(x_n)$ и $\Delta_i^\alpha(x_n)$ из множества $F(x_n)$, то мы можем быть уверены в их хорошей совместимости с данными замеров. В точках, отличных от узлов сетки, систематические ошибки рассчитываются интерполяцией.

Истинные однозначные функции систематических ошибок $\Delta_i^r(x)$ и $\Delta_i^\alpha(x)$ неизвестны. Но можно сделать естественные предположения об их функциональных свойствах. Например, разумно потребовать близость функций $\Delta_i^r(x)$ и $\Delta_i^\alpha(x)$ к некоторым константам в большинстве точек сетки $\{x_n\}$. Могут быть и другие предположения, имеющие инженерный смысл.

Наиболее естественным предположением является требование малого изменения функций $\Delta_i^r(x)$ и $\Delta_i^\alpha(x)$ по отношению к пространственному положению x . Такое требование подтверждается малым изменением конфигурации групп $Z(t)$ замеров вдоль треков и может быть реализовано с помощью функционала

$$J(f(\cdot)) = \sum_{x_{n_1}, x_{n_2} \in \mathcal{X}} \frac{\|f(x_{n_1}) - f(x_{n_2})\|^2}{\|x_{n_1} - x_{n_2}\|^2},$$

имеющего смысл среднего (по точкам сетки $\{x_n\}$) квадрата константы Липшица функции $f(\cdot)$ (множество $\mathcal{X}$ состоит из пар близких друг к другу точек x_{n_1} , x_{n_2} позиций сетки $\{x_n\}$). Неизвестные истинные функции $\Delta_i^r(x)$ и $\Delta_i^\alpha(x)$ близки к функциям, которые должны давать небольшие значения такого функционала.

Разработан алгоритм, позволяющий построить функции $\hat{\Delta}_i^r(x)$ и $\hat{\Delta}_i^\alpha(x)$, которые, с одной стороны, обеспечивают минимум функционала, с другой стороны, значения $\hat{\Delta}_i^r(x_n)$ и $\hat{\Delta}_i^\alpha(x_n)$ принадлежат множеству неопределенности $F(x_n)$.

На рис. 9 представлено решение для систематической ошибки $\hat{\Delta}_i^\alpha(x)$ РЛС «Кемерово». Оценка получена с помощью алгоритма данного раздела. Яркость заливки на рисунке соответствует значению (в градусах) величины систематической ошибки. Расположение РЛС отмечено крестиком. Маленькие кружки соответствуют сетке $\{x_n\}$, используемой в алгоритме.

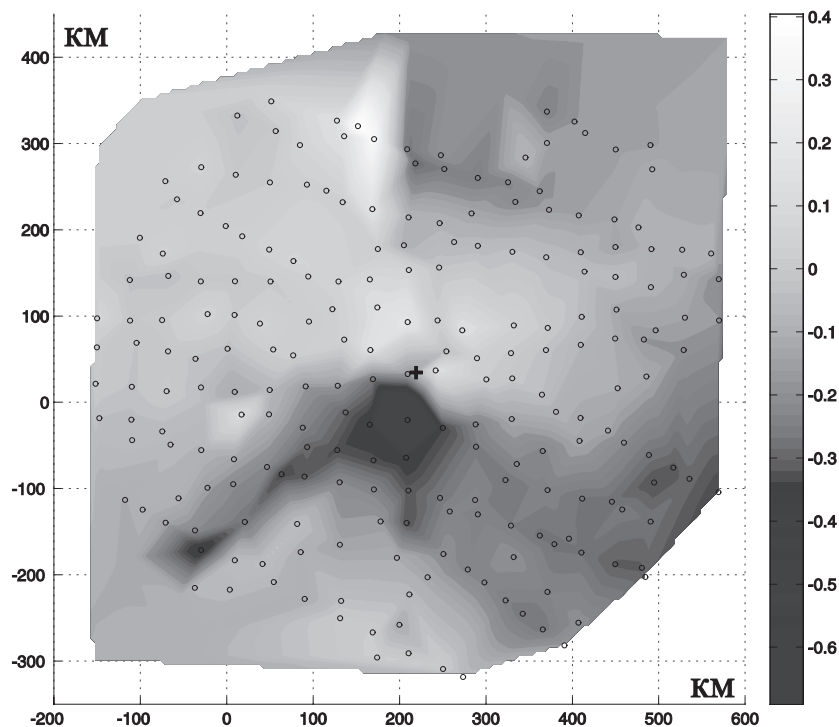


Рис. 9. Азимутальная систематическая ошибка $\hat{\Delta}_i^\alpha(x)$ для РЛС «Кемерово»

Заключение

В работе описаны три метода определения систематических ошибок РЛС. Методы используют только радиолокационную информацию без привлечения информации от каких-либо дополнительных источников (например, от ADS-B). Первый алгоритм базируется на параметрической оценке и потраекторной обработке данных. Второй алгоритм не требует точных сведений о моментах замеров и стабилен при временных задержках в информационных каналах. Третий алгоритм не предполагает предписанную структуру систематических ошибок (если они рассматриваются как функции местоположения ВС). Все алгоритмы протестированы как на модельных, так и на реальных радиолокационных данных.

Авторы выражают благодарность за внимание к работе заведующему сектором Института математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук Пацко Валерию Семеновичу.

Работа выполнена при поддержке ООО «Фирма «НИТА»», гранта РФФИ № 14-01-31319 (Д.А. Бедин) и комплексной программы УрО РАН, проект № 15-16-1-13 (А.Г. Иванов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Taghavi E., Tharmarasa E., Kirubarajan T., Bar-Shalom Y. Bias Estimation for Practical Distributed Multiradar-Multitarget Tracking Systems // 16th International Conference on Information Fusion (FUSION), Istanbul: 9–12 July 2013. – P. 1304–1311.
2. Lin X., Bar-Shalom Y., Kirubarajan T. Exact multisensor dynamic bias estimation with local tracks // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2004. – Vol. 40, no. 2. – P. 576–590.
3. Karniely H., Siegelmann H.T. Sensor Registration Using Neural Networks // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2000. – Vol. 36, no. 1. – P. 85–101.
4. Herrero G.J., Portas J.A.B., and Corredera C.J.R. On-line multi-sensor registration for data fusion on airport surface // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2007. – Vol. 43, January. – P. 356–370.
5. Renes J.J., v. d. Kraan P., and Eymann C. Flightpath reconstruction and systematic radar error estimation from multi-radar range-azimuth measurements // 24th IEEE Conference on Decision and Control. – 1985. – Vol. 24. – P. 1282–1285.
6. Банди Б. Методы оптимизации (вводный курс). – М.: Радио и связь, 1988.
7. Бедин Д.А., Пацко В.С., Федотов А.А., Беляков А.В., Строков К.С. Восстановление траектории самолета по неточным измерениям // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 2. – С. 17–30.

REFERENCES

1. Taghavi E., Tharmarasa E., Kirubarajan T., Bar-Shalom Y. Bias Estimation for Practical Distributed Multiradar-Multitarget Tracking Systems // 16th International Conference on Information Fusion (FUSION), Istanbul: 9–12 July 2013, pp. 1304–1311.
2. Lin X., Bar-Shalom Y., Kirubarajan T. Exact multisensor dynamic bias estimation with local tracks // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, Vol. 40, no. 2, pp. 576–590.
3. Karniely H., Siegelmann H.T. Sensor Registration Using Neural Networks // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, Vol. 36, no. 1, pp. 85–101.
4. Herrero G.J., Portas J.A.B., and Corredera C.J.R. On-line multi-sensor registration for data fusion on airport surface // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, Vol. 43, January, pp. 356–370.
5. Renes J.J., v. d. Kraan P., and Eymann C. Flightpath reconstruction and systematic radar error estimation from multi-radar range-azimuth measurements // 24th IEEE Conference on Decision and Control, 1985, Vol. 24, pp. 1282–1285.
4. Bandi B. *Metody optimizacii (vvodnyj kurs)* [Optimization methods (introduction course)]. Moscow, Radio i svyaz, 1988.
7. Bedin D.A., Patsko V.S., Fedotov A.A., Belyakov A.V., Strokov K.S. Vosstanovlenie traektorii samoleta po netochnym izmerenijam [Restoration of aircraft trajectory from inaccurate measurements]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2010, no. 2, pp. 17–30.

ALGORITHMS FOR ESTIMATION OF RADAR SYSTEMATIC ERRORS ON THE BASIS OF RADAR OBSERVATION DATA ONLY

Bedin D.A., Ganebny S.A., Ivanov A.G., Pyatko S.G., Fedotov A.A.

Abstract. Three approaches are considered to solve the problem of estimation of systematic errors in the radar measurements obtained from several overlapping observation areas. Neither of the radars is supposed as the reference. Systematic errors are determined by means of the radar measurement processing at the cost of radar data redundancy. The methods proposed here can be used in data-processing facilities of air traffic control systems.

Keywords: radar observation, radar systematic errors, estimation algorithms.

Сведения об авторах

Бедин Дмитрий Александрович, младший научный сотрудник, Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук, ул. Софьи Ковалевской, 16, Екатеринбург, Российская Федерация, 620990; e-mail: bedin@imm.uran.ru.

Ганебный Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, инженер-программист, ООО «Фирма “Новые информационные технологии в авиации”», ул. Взлетная, 15, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196210; e-mail: gsa@nita.ru.

Иванов Алексей Геннадьевич, главный программист, Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук, ул. Софьи Ковалевской, 16, Екатеринбург, Российская Федерация, 620990; e-mail: iagsoft@imm.uran.ru.

Пятко Сергей Григорьевич, доктор технических наук, профессор, советник генерального директора, ОАО «Концерн ПВО “Алмаз – Антей”», ул. Вереysкая, 41, Москва, Российская Федерация, 121471; e-mail: psg_atc@gmail.com.

Федотов Андрей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук, ул. Софьи Ковалевской, 16, Екатеринбург, Российская Федерация, 620990; e-mail: andreyfedotov@mail.ru.

About the Authors

Bedin Dmitriy A., Junior Research Officer, Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of UrB RAS, S. Kovalevskaja Street, 16, 620990 Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: bedin@imm.uran.ru.

Ganebny Sergey A., Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Engineer, New Information Technologies in Aviation, LLC, Vzletnaya Street, 15A, 196210 St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: gsa@nita.ru.

Ivanov Aleksey G., Senior Developer, Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of UrB RAS, S. Kovalevskaja Street, 16, 620990 Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: iagsoft@imm.uran.ru.

Pyatko Sergey G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Adviser of the General Director, the Joint-stock Company “Concern “Almaz – Antey”, Vereyskaya Street, 41, Moscow, Russian Federation; e-mail: psg_atc@gmail.com.

Fedotov Andrey A., Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Research Officer, Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of UrB RAS, S. Kovalevskaja Street, 16, 620990 Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: andreyfedotov@mail.ru.