

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ АЗИМУТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАДИОЛОКАТОРОВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЗА ДВИЖЕНИЕМ ВОЗДУШНОГО СУДНА *

А. Г. Иванов¹, А. А. Федотов²

Институт математики и механики, УрО РАН, 620990, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 16
Телефон: +7 (343) 375-3444. Факс: +7 (343) 374-2581.
E-mail: iagsoft@imm.uran.ru, andreyfedotov@rambler.ru

А. В. Беляков³, К. В. Строков⁴

Фирма «НИТА», 196210, Санкт-Петербург, ул. Взлетная, 15А
Телефон: +7 (812) 704-1872. Факс: +7 (812) 331-2405.
E-mail: al@nita.ru, ks@nita.ru

Аннотация

Ключевые слова: РЛС, идентификация параметров, обратная задача, восстановление траектории движения, методы оптимизации, численное моделирование

Рассматривается задача нахождения систематических ошибок нескольких радиолокаторов по азимуту при наблюдении за движением воздушного судна на некотором промежутке времени. Исходные данные по каждой РЛС представляют собой наборы замеров наклонной дальности и азимута. При вычислении азимутальных ошибок РЛС дополнительно схематично восстанавливается траектория движения воздушного судна в виде ломаной линии в трехмерном пространстве. Разработанные алгоритмы протестированы на модельных и реальных данных.

Систематическая ошибка радиолокатора (РЛС) по азимуту приводит к пространственному смещению наблюдаемого трека воздушного судна (ВС). Если одно и то же движение ВС наблюдается при помощи нескольких РЛС, то появляется возможность вычисления их систематических ошибок по азимуту. Существенно, что значительные систематические ошибки связаны только с измерением азимута, изменение дальности, как правило, большими систематическими ошибками не характеризуется.

Работа посвящена решению задачи идентификации систематических ошибок РЛС по азимуту. Предполагается, что каждая РЛС замеряет в своей локальной системе координат наклонную дальность и азимут с некоторой ошибкой. Замеры от разных РЛС приходят со своим тактом по времени.

При больших размерах зоны управления воздушным движением (характерный размер – 150 км и более) применение в расчетах модели «плоской Земли» дает большие ошибки, поэтому используется модель Земли в форме шара. Разработанный ранее алгоритм идентификации, использующий модель плоской Земли, описан в работе [1].

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 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.

Расстояние ρ между точкой \vec{a} восстанавливаемого трека и окружностью с центром в точке \vec{c} , радиусом r и вектором нормали \vec{n} подсчитывается по формуле $\rho = \sqrt{|\vec{l}|^2 + r^2 - 2r|\vec{n} \times \vec{l}|}$, где $\vec{l} = \vec{a} - \vec{c}$.

Неубывающую функцию от расстояния между окружностью и точкой восстанавливаемого трека, соответствующей моменту РЛС-замера, назовем невязкой РЛС-замера. Как показало моделирование, в качестве невязки лучше взять квадратичную функцию расстояния (которая является неубывающей при неотрицательном аргументе).

Сконструируем функцию, аргументами которой являются координаты вершин восстанавливаемого трека и систематические ошибки по азимуту для всех локаторов, наблюдающих одно ВС. Используя систематические ошибки, сделаем поправки на значения азимута для всех РЛС-замеров. После этого

¹ Главный программист.

² Кандидат физико-математических наук, вед. математик.

³ Инженер-программист.

⁴ Инженер-программист.

просчитаем все невязки замеров и просуммируем их. Сумму будем считать значением функции. Тогда значение аргумента, доставляющее минимум функции, будет состоять из вершин восстанавливаемого трека, приближающего реальную траекторию ВС, и значений систематических ошибок по азимуту, обеспечивающих наилучшее сведение траекторий от разных РЛС.

Таким образом, задача нахождения систематических ошибок по азимуту сводится к задаче поиска точки минимума функции многих переменных.

Для решения задачи минимизации использовался алгоритм Хука – Дживса [2], дающий хорошие результаты при большом числе переменных. В рассматриваемой задаче размерность аргумента минимизируемой функции лежит в пределах 50 – 600 в зависимости от исходных данных и параметров решения. Для повышения вероятности попадания в глобальный минимум алгоритм дополнен [3] элементами случайного поиска (метод Монте-Карло).

Если в данных РЛС-замеров содержится дополнительно информация о высоте, алгоритм может учитывать ее, при этом невязкой замера является неубывающая функция от расстояния между точкой восстанавливаемого трека и РЛС-замером, который в этом случае является точкой в трехмерном пространстве.

Алгоритм отлаживался как на модельных, так и на реальных данных.

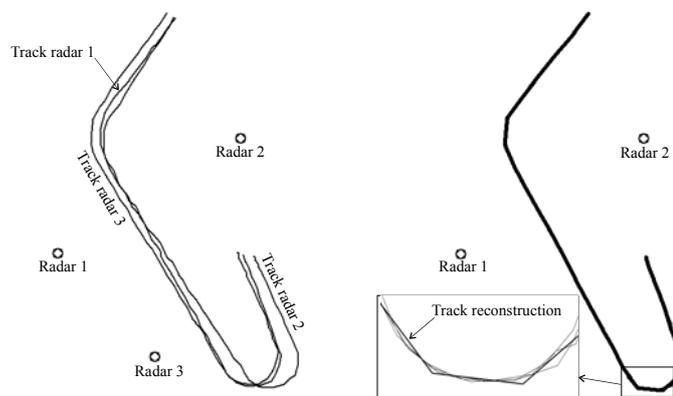
Для отработки алгоритма поиска систематических ошибок РЛС по азимуту был взят набор типовых траекторных движений ВС (движение по прямой, поворот, маневр на взлете/посадке в районе аэропорта), заданы координаты нескольких РЛС (см. рис.) и с некоторым шагом по времени были смоделированы идеальные замеры азимута, наклонной дальности и высоты. При расчете модельного траекторного движения наблюдаемого ВС использовалась принятая для навигационных расчетов стандартная система обыкновенных дифференциальных уравнений движения самолета [4, 5].

Далее в замеры для каждой РЛС были внесены систематические погрешности по азимуту и случайные погрешности (по нормальному закону) азимута, наклонной дальности и высоты.

Алгоритм с хорошей точностью восстанавливал систематические ошибки.

Пример определения систематических ошибок по модельным данным показан на рисунке.

Для реальных данных стабильность восстановленных значений систематики не всегда является приемлемой. Это может объясняться неучтенными в модели факторами, например, зависимостью систематической ошибки от направления на ВС, систематическими ошибками по расстоянию и т.п.



РЛС-треки, слева – исходные треки с нулевыми поправками по азимуту, справа – треки, повернутые на рассчитанные систематические ошибки

Работа выполнена в рамках программы Президиума РАН «Математическая теория управления», при финансовой поддержке УрО РАН (проект 09-П-1-1015), а также поддержке РФФИ, гранты 09-01-00436, 10-01-96006.

Литература

1. Федотов А.А., Иванов А.Г., Бедин Д.А., Беляков А.В., Строков К.В. Разработка и внедрение алгоритмов автоматизированных систем УВД (этап 3). Идентификация систематических ошибок нескольких РЛС по азимуту. / Отчет о научно-экспериментальной работе. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2010. Отчет доступен на сайте: <http://home.imm.uran.ru/sector3/otchetIMM1007/nita2010-7.html>.
2. Банди Б. Методы оптимизации (вводный курс). М.: Радио и связь, 1988.
3. Иванов А.Г. Параллельная программа поиска минимума // Высокопроизводительные вычисления и их приложения: Труды Всероссийской научной конференции (30 октября - 2 ноября 2000 г., г. Черноголовка). М.: Изд-во МГУ, 2000. С. 250–252.
4. Автоматизированные системы управления воздушным движением / Под ред. Пятко С.Г. и Красова А.И. - С.-Петербург: Политехника, 2004.
5. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. Издание официальное. М., Госкомстандарт, 1980.