ПАКЕТ АЛГОРИТМОВ АПОСТЕРИОРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК НЕСКОЛЬКИХ РЛС *

Д. А. Бедин[1], А. Г. Иванов[2], А. А. Федотов[3]

ФГБУН Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия, e-mail: bedin@imm.uran.ru

С. А. Ганебный[4]

ООО «Фирма «НИТА», С.-Петербург, Россия, e-mail: gsa@nita.ru

Аннотация

Ключевые слова: систематическая ошибка, РЛС, параметрическое оценивание

Рассматривается задача оценивания систематических ошибок радиолокаторов – неслучайных искажений, зависящих от положения наблюдаемого воздушного судна. Предложено несколько алгоритмов, каждый из которых эффективен при своём наборе предположений. Алгоритмы реализованы программно в виде единого пакета. Их работа проверена на модельных и реальных данных радиолокационного наблюдения.

Введение

Измерения радиолокаторов (радиолокационных станций — РЛС), как и других измерительных устройств, подвержены ошибкам. Различают ошибки случайной природы и неслучайные искажения — систематические ошибки. Изучение большого числа реальных данных показало, что систематические ошибки РЛС зависят в основном от положения наблюдаемого воздушного судна (ВС) относительно радиолокатора и являются мало изменяющимися (стабильными) во времени. Хорошей математической структурой для описания систематических ошибок является векторное поле: вектор, описывающий сдвиг измерений из-за действия систематических ошибок, зависит от положения в пространстве.

Задача выявления систематических ошибок в измерениях РЛС и их последующей корректировки является важной для обеспечения стабильности работы средств управления воздушным движением [1]. В особенности, это касается алгоритмов мультирадарной обработки [2]. Решение задачи оценивания можно искать различными способами. Один из возможных вариантов — рассмотрение измерений РЛС и спутниковой системы (АЗН-В) совместно. Алгоритмы, разрабатываемые авторами, связаны с другим вариантом: определение систематических ошибок РЛС только по радиолокационной информации без привлечения внешних источников.

Модель измерений

Обозначим через m общее число РЛС. Рассмотрим уравнение наблюдения, пригодное для описания измерений радиолокатора i в декартовой системе координат (например, геоцентрической). Пусть $x(t)$ — вектор текущего положения ВС в момент t. Символом z_i обозначим вектор измерений радиолокатора i; величина s_i — вектор сдвига из-за воздействия систематических ошибок; вектор w_i — сдвиг, связанный со случайными ошибками. Уравнения наблюдения выглядят следующим образом:

$$\begin{gathered} z_i(t) = x(t) + s_i(x(t)) + w_i(t), \\ i = 1,\ldots,m. \end{gathered} \tag{1}$$

Радиолокатор не измеряет положение в декартовой системе координат непосредственно, вместо этого он получает тройку измерений (z_i^r, z_i^α, z^h), где z_i^r, z_i^α — собственные измерения наклонной дальности до объекта и его азимута, а z^h — измерение высоты, которое поступает от самого ВС в случае вторичной радиолокации. Преобразование $d_i:\ (z_i^r, z_i^\alpha, z^h) \mapsto z_i$ является взаимно однозначным (и обратимым, соответственно) везде, кроме некоторой окрестности РЛС. Зачастую уравнения наблюдения рассматривают непосредственно в терминах величин, измеряемых радиолокатором

$$z_i^r(t) = r_i(x(t)) + \Delta_i^r(x(t)) + w_i^r(t), \quad z_i^\alpha(t) = \alpha_i(x(t)) + \Delta_i^\alpha(x(t)) + w_i^\alpha(t), \quad z^h(t) = h(x(t)) + w^h(t). \tag{2}$$

[1] Младший научный сотрудник.
[2] Главный программист.
[3] Кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник.
[4] Кандидат физ.-мат. наук, инженер-программист.

Переменные Δ_i^r, Δ_i^α суть систематические ошибки по дальности и азимуту. Случайные ошибки рассматриваются отдельно в каждом канале: w_i^r, w_i^α, w^h. Символами $r_i(x)$, $\alpha_i(x)$ обозначены наклонная дальность от объекта до РЛС i и азимут объекта; $h(x)$ — высота над поверхностью Земли.

В случае если высота $h(x)$ не измеряется (случай так называемых первичных радиолокаторов), измерение (z_i^r, z_i^α) не соответствует однозначно точке в трехмерном пространстве. Однако в большинстве таких ситуаций существуют близкие измерения того же самого ВС при помощи других РЛС, в которых высота уже присутствует, и это позволяет разрешить неопределённость.

Популярной моделью систематических ошибок являются постоянные систематические ошибки по дальности и азимуту: в этом случае величины Δ_i^r, Δ_i^α не зависят от положения x воздушного судна.

Задача оценивания систематических ошибок

Для решения задачи оценивания систематических ошибок РЛС разработаны три алгоритма, которые объединены в программный пакет с единым интерфейсом. Далее будем называть их алгоритмом параметрического оценивания, алгоритмом непараметрического оценивания и алгоритмом непараметрического оценивания для работы в условиях искажения времени измерений. Каждый из алгоритмов эффективен при своём наборе предположений. Все они используют избыточность информации о движении воздушного судна, поступающей от разных радиолокаторов.

1. В алгоритме параметрического оценивания предполагается, что систематическая ошибка (неслучайное искажение радиолокационных измерений) может быть представлена как комбинация из нескольких заранее известных функций, задающих структуру оцениваемого векторного поля систематических ошибок, с неизвестными константами. Для систематических ошибок по дальности и азимуту это записывается следующим образом (символ ϑ обозначает вектор-столбец неизвестных параметров):

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

Для измерений в декартовой системе координат имеем

$$\forall x \in R^3,\ i = 1,\ldots,m \qquad s_i(x) = \boldsymbol{S}_i(x,\vartheta). \tag{4}$$

Наиболее простой пример – модель постоянных систематических ошибок по дальности и азимуту. В этом случае уравнение (3) принимает вид

$$\forall x \in R^3,\ \ i = 1,\ldots,m \qquad \Delta_i^r(x) = \Delta_i^r = \mathrm{const}, \quad \Delta_i^\alpha(x) = \Delta_i^\alpha = \mathrm{const}, \quad \vartheta = \left\{ (\Delta_i^r, \Delta_i^\alpha) \right\}_{i=1}^m .$$

Каждая траектория ВС анализируется алгоритмом отдельно, и для неё вырабатывается своя индивидуальная оценка ϑ параметров систематических ошибок. Вычисление индивидуальных оценок производится при помощи минимизации среднеквадратичного отклонения. В основном варианте рассматривается нелинеаризованный вариант преобразования d_i и учитываются физические ограничения на параметры движения ВС, что приводит к численным процедурам оптимизации. Для оптимизации выбран метод, сочетающий градиентный спуск по части переменных с методом прямого поиска Хука – Дживса (добавлены элементы метода Монте-Карло) по другой их части. В случае линеаризованной модели наблюдения РЛС за ВС (линеаризованное преобразование d_i) точка минимума функционала может быть вычислена аналитически. Разработан вариант алгоритма для такой линеаризованной постановки.

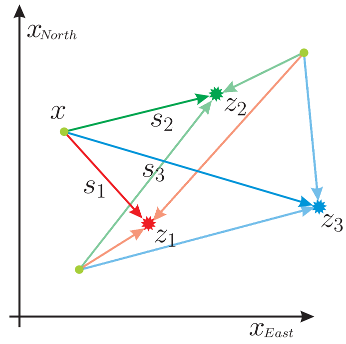
На следующем этапе алгоритма набор индивидуальных оценок $\{\vartheta\}$, полученных для различных ВС, подвергается статистической обработке для получения итоговой общей оценки $\hat{\vartheta}$ параметров ϑ и для оценки полей систематических ошибок $\hat{\Delta}_i^r(\cdot)$, $\hat{\Delta}_i^\alpha(\cdot)$, $\hat{s}_i(\cdot)$. Следует отметить, что не обязательно итоговые оценки полей выдавать в виде

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

Например, хорошее согласие с реальными данными показывает кусочно-постоянная по x оценка $\hat{\Delta}_i^r(x)$, $\hat{\Delta}_i^\alpha(x)$, полученная усреднением индивидуальных оценок по малым областям с учетом количества измерений, проведенных в каждой области.

2. Алгоритм непараметрического оценивания предназначен для ситуации, когда модель систематической ошибки вида (3) или (4) неизвестна, либо результаты, полученные алгоритмом из раздела 1, неудовлетворительно корректируют измерения РЛС. Алгоритм не использует какую-либо заданную модель систематической ошибки и включает в себя две стадии: первая — получение множеств неопределённости, вторая — выделение однозначной функции в качестве ответа.

Множество неопределенности представляет собой совокупность «средних» векторов в пространстве сдвигов для всех возможных вариантов систематических ошибок, совместимых с измерениями. На рисунке изображены измерения z_1, z_2, z_3 трех РЛС в один и тот же момент времени. Даже при отсутствии случайных ошибок измерений существует много вариантов, где может быть истинное положение x ВС. Три таких возможных варианта показаны на рисунке. Если нет априорных сведений о значениях сдвигов s_i от систематических ошибок, положение x может быть где угодно вблизи тройки измерений z_1, z_2, z_3. Однако каждому варианту положения x соответствует лишь один возможный вариант сдвигов s_1, s_2, s_3. Если случайные ошибки присутствуют в измерениях, то можно говорить о среднем варианте сдвигов s_1, s_2, s_3, соответствующих каждому возможному x. Поскольку x принадлежит двухмерной плоскости в R^3, соответствующей измеряемой высоте h, для сдвигов от систематических ошибок получаем двухмерное аффинное многообразие S в пространстве векторов $s = \begin{bmatrix} s_1^T & s_2^T & s_3^T \end{bmatrix}^T$ – множество неопределенности.



В рассматриваемом алгоритме множества неопределённости S строятся для заданной сетки «малых» областей наблюдения путем обработки «местных» измерений различных ВС. Процедура построения множеств неопределённости использует измерения РЛС, полученные на одинаковые моменты времени, но, на самом деле, разные радиолокаторы измеряют положение ВС в различные моменты. Поэтому создаются «искусственные» измерения путём сглаживания каждого РЛС-трека при помощи ломаных. Каждое множество S приписывается центру некоторой малой области наблюдения. Таким образом, имеем дело с многозначной функцией $S(x)$, описывающей все варианты систематических ошибок, хорошо совместимых с измерениями.

Вторая стадия работы алгоритма связана с поиском однозначной функции $s(\cdot)$ систематических ошибок. При этом можно использовать более «слабые» по сравнению с параметрическим представлением вида (3) или (4) знания о том, как функция должна быть устроена в целом. Например, можно требовать малость значения функционала, отражающего плавность «изменения» функции $s(\cdot)$ в пространстве. В настоящее время алгоритм использует функционал среднеквадратичной вариации.

3. Третий алгоритм повторяет все основные построения алгоритма непараметрического оценивания из раздела 2, однако в своей работе не опирается на знание времени измерений РЛС. Множества неопределённости строятся особым образом. Вначале траектории ВС разрезаются на участки прямолинейного движения. Методом главных компонент [3] оценивается направление движения ВС на этом участке. Поскольку искажения во времени эквивалентны перенесению замеров по направлению движения, вдоль него невозможно корректно определить составляющую для векторов сдвига от систематических ошибок. По всем остальным направлениям варианты сдвигов от систематических ошибок объединяются в множество неопределённости. Остальные построения алгоритма повторяют алгоритм непараметрического оценивания.

Заключение

Программный пакет реализован на языке MATLAB. Работа всех алгоритмов проверена на модельных и реальных данных радиолокационных измерений.

Исследования производились в сотрудничестве с фирмой «НИТА».
Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №15-01-07909.

Литература

1. **Bar-Shalom, Y.** Exact multisensor dynamic bias estimation with local tracks / X. Lin, Y. Bar-Shalom, T. Kirubarajan // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004. Vol. 40, No. 2. P. 576–590.
2. **Siegelmann, H. T.** Sensor Registration Using Neural Networks / H. Karniely, H. T. Siegelmann // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000. Vol. 36, No. 1. P. 85–101.
3. **Jolliffe, I. T.** Principal Component Analysis. New York: Springer-Verlag. 2002. P. 405.