ции функционала невязок, полученных по уравнению (1):

$$J = \sum_{j=1}^{n} \sum_{i \in I_j} \left(t_i^j - t^j - \frac{1}{c} \| r + v(t^j - t^n) - r_i \| \right)^2 . \qquad (2)$$

Функционал (2) не является выпуклым. Кроме того, значительную трудность доставляет различный масштаб переменных. Поэтому его оптимизация не является простой. Задача решена следующим образом. Представим $t^j = t^n + \Delta t^j$. Разности Δt^j можно определить с достаточной степенью точности, анализируя только t_i^j и не привлекая (1). Далее, с зафиксированными значениями Δt^j производится минимизация функционала (2) численным методом на основе метода Левенберга – Марквардта с динамически изменяемой константой регуляризации. Задача минимизации решается достаточно эффективно: получаемая точность определения горизонтальной компоненты r близка к границе точности Рао – Крамера [1].

Работа подготовлена при поддержке программы президиума РАН №30 «Теория и технологии многоуровневого децентрализованного группового управления в условиях конфликта и кооперации».

Библиографические ссылки

1. *Chernyak, V.* Using potential accuracy of object localisation with multilateration systems // Proceedings of ESAV'08, September 3–5, 2008, Capri, Italy.

МНОГОГИПОТЕЗНЫЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА

Д.А. Бедин, А.Г. Иванов, А.А. Федотов

Институт математики и механики им Н.Н. Красовского УрО РАН
Софьи Ковалевской 16, 620990 Екатеринбург, Россия
{bedin,iagsoft}@imm.uran.ru, andreyfedotov@mail.ru

Рассматривается задача восстановления траектории воздушного судна (ВС) по поступающим радиолокационным замерам в текущем времени: после поступления очередного радиолокационного замера алгоритм должен «мгновенно» выдать оценку положения ВС [1].

В алгоритме производится построение пучка траекторий, представляющих наиболее возможные варианты траекторного движения ВС.

При пересчете в бегущем по времени окне совокупность замеров РЛС аппроксимируется траекториями пучка. Каждая траектория представляет собой некоторый вариант движения ВС, совместимый с его динамическими возможностями. При поступлении очередного замера операция по пересчету пучка треков заключается в последовательном запуске нескольких процедур: ветвления пучка, детектирования типа движения, генерации оценки текущего положения ВС, прореживания пучка и т.д.

Предложены различные варианты функции расстояния между траекториями пучка и последовательностью замеров, обеспечивающие устойчивость к возможным «выбросам» радиолокационных замеров. Критерий определяет «выживаемость» траекторий пучка: траектории с хорошим показателем остаются в пучке, траектории с плохим показателем удаляются.

В процедуре ветвления после поступления очередного замера происходит продление траекторий на текущий момент. Продление может происходить как с учетом координат нового замера, так и без их учета. Последнее хорошо работает в ситуации, когда пришедший замер оказывается «выбросом». Ответвление может происходить не только между двумя последними замерами, но и на протяжении всего расчетного окна.

Дополнительно в пучок вводятся траектории, построенные не при помощи ответвления от старых траекторий, а «с нуля» по координатам замеров в расчетном окне: «прямая по МНК» и «окружность по МНК». Эти траектории хорошо восстанавливают истинное движение при отсутствии выбросов в случаях движения по прямой (прямая по МНК) и движения в повороте (окружность по МНК). Для генерации траектории «окружность по МНК» разработан оригинальный быстродействующий алгоритм, в котором задача сводится к минимизации функции одного аргумента.

В алгоритме используется процедура детектирования текущего типа движения ВС. В качестве входа на детектор подается история оценки мгновенного ускорения движущегося ВС до текущего момента. На выходе детектор формирует признак постоянства анализируемого ускорения, а также оценку его величины. Далее по ним делается вывод о текущем типе движения, и на его основе меняются параметры работы основного многогипотезного алгоритма. Так, если было определено движение по прямой, то вес траектории «прямая по МНК» будет усилен по сравнению с другими траекториями пучка при итого-

вом построении оценки положения ВС. Кроме того, от типа движения зависят коэффициенты штрафов.

Применение описанного подхода позволило создать алгоритм восстановления траектории ВС, который в случае замеров без выбросов обеспечивает точность, сравнимую с точностью метода IMM [1, 2] (стандарт де-факто в траекторной обработке), а при наличии выбросов точность предлагаемого алгоритма оказывается лучше.

Рассматривались траектории маневрирующего ВС, для которых «регулярные» замеры имеют СКО 70 м, замеры с выбросами имеют СКО 350 м, выбросы возникают с вероятностью 0.05. Временной интервал между замерами 6 с. При обработке получено следующее качество: СКО между оценкой и истинной траекторией на участках постоянства движения составляет около 60 м, на переходных участках возможны пиковые отклонения до 250 м малой продолжительности. Для тех же данных метод IMM показал, соответственно, 80 и 350 м.

Работа подготовлена при поддержке программы президиума РАН №30 «Теория и технологии многоуровневого децентрализованного группового управления в условиях конфликта и кооперации».

Библиографические ссылки

1. *Коновалов А.А.* Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. Ч. 2.
2. *Blom H., Challa S., Bar-Shalom Ya.* IMM estimator versus optimal estimator for hybrid systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol. 41, no. 3, July 2005. P. 986–991.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОГО ДВУХУРОВНЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Д.Е. Бережнов, Л.И. Минченко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

П. Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь

inform@bsuir.by

Пусть $x \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}^m$. Будем рассматривать задачу двухуровневого линейного программирования (BLPP), имеющую следующий вид:

$$F(x,y) = \langle c, x\rangle + \langle q, y\rangle \to \min,$$
$$x \in X = \{x \in \mathbb{R}^n \,\big|\, g_j(x) = \langle A^j, x\rangle - D_j \le 0,\ j \in J = \{1, ..., l\}\},$$
$$y \in S(x) \stackrel{\Delta}{=} \arg\min\{f(x,y) = \langle v, x\rangle + \langle p, y\rangle \,|\, y \in K(x)\},$$
$$K(x) = \{y \in \mathbb{R}^m \,\big|\, h_i(x,y) = \langle a^i, x\rangle + \langle b^i, y\rangle - d_i \le 0,\ i \in I = \{1, ..., s\}\},$$