

УДК 626.7.018.7:621.396.96

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ КООРДИНАТ МАНЕВРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

К.И. Мотылев, В.В. Паслен

Донецкий национальный технический университет

Робота присвячена проблемам підвищення точності визначення координат повітряних та космічних об'єктів, що маневрують.

В процессе производства авиационной и ракетно-космической техники проводится большое количество испытаний – от контрольных и лабораторных до летных. По мере повышения требований к летным характеристикам объектов роль испытаний становится все более значимой. По результатам испытаний принимаются важные решения о качествах объекта авиационной или ракетно-космической техники.

Целью данной работы является повышение точности и достоверности оценки вторичных координат положения и движения объекта (ЛА) в наземных измерительно-вычислительных системах обработки послеполетной информации.

Исследования по данной работе выполнялись в рамках конкурсов проектов «УМС» и «Университетские микроспутники», реализация которых предусмотрена Национальной космической программой Украины, а также в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве М 199/2009 от 15.04.2009 г. между Украиной и Китаем.

Для повышения точности и достоверности результатов измерения дублируются, вследствие чего возникает временная и пространственная избыточность траекторной информации.

Временная избыточность связана с высокой частотой получения первичных координат объекта от одного измерительного средства.

Пространственная избыточность возникает в результате многократного дублирования измерений различными средствами.

Траектория движения считается известной, если в любой момент времени известен вектор текущего положения центра масс объекта.

Траектория считается известной, если в любой момент времени t заданного временного интервала известен вектор текущего положения центра масс объекта $r(t)$ в выбранной системе координат. В качестве таких систем координат могут быть использованы декартова, прямоугольная сферическая, цилиндрическая, геоцентрическая и другие [1].

В зависимости от наличия сведений об объекте траектории делятся на 2 основные категории [1, 2, 6]:

- детерминированные траектории (ДТ);
- случайные траектории (СТ).

Траектория движения объекта называется детерминированной, если совокупность действующих на объект сил известна с достаточной степенью точности.

Методы обработки информации о ДТ детально и достаточно широко исследованы. Примерами ДТ являются эллиптические, параболические и гиперболические орбиты КА.

На практике редко имеются все необходимые априорные сведения о силах, действующих на объект. Также зачастую эти силы известны со значительными ошибками и их нельзя учитывать в дальнейших расчетах. В этом случае имеем дело со случайной траекторией. Примерами СТ являются траектории маневрирующих летательных и космических аппаратов, где точно учесть силы тяги, сопротивления и другие факторы практически невозможно.

Методы обработки траекторной информации делятся на простые и обобщенные. Простыми называются методы, которые используют минимально необходимый объем данных. Обобщенные методы учитывают всю имеющуюся избыточную информацию [6].

Простые методы обработки данных траекторных измерений основаны на аналитическом определении точки пересечения минимального количества поверхностей положения [6]. Но использование простых методов не приводит к лучшим результатам, т.к. они обладают существенными недостатками [3, 6]:

- не используют избыточность траекторной информации;
- имеют обширные зоны низкой точности;
- не учитывают корреляцию ошибок измерений;
- не учитывают неравноточность измерений.

В нашей работе предлагается следующее решение проблемы повышения точности обработки траекторной информации.

На первом этапе первичная траекторная информация подвергается обработке обобщенным методом, который имеет существенные преимущества по сравнению с простыми. На втором этапе полученные вторичные координаты обрабатываются алгоритмом адаптивного линейного оптимального сглаживания.

Таким образом, на одном этапе обработки траекторной информации происходит учет пространственной избыточности, а на другом этапе – временной. Последовательность выполнения этапов может быть произвольной.

Вследствие этого в обработке принимает участие вся имеющаяся траекторная информация, что невозможно при использовании простых методов.

Теперь рассмотрим применяемые методы детальнее.

В начале 60-х гг. профессором Огородничуком Н. Д. был разработан обобщенный метод обработки данных внешнетраекторных измерений. Данный метод позволяет учесть всю имеющуюся пространственную избыточность траекторной информации и обладает рядом преимуществ по сравнению с простыми методами [4]:

- обеспечивает оптимальную точность обработки избыточной информации любого объема и типа практически при любом расположении измерительных средств;

- допускает обработку информации минимального объема с сохранением точности соответствующих простых методов;

- является эффективным при любых флуктуациях случайных ошибках измерений;

- позволяет осуществлять оперативные контроль и самоконтроль точности измерительной системы параллельно с основной обработкой;

- обеспечивает построение зон повышенной точности, объединяя зоны высокой точности отдельных простых методов.

При использовании обобщенного метода решением будет точка, равноудаленная от поверхностей положения с учетом неравноточности измерений. Метод является статистическим, поэтому полученное с его помощью решение принято называть статистической оценкой (СО). Решение находится с помощью следующего рекуррентного соотношения [6]:

$$\hat{r}_{v+1} = \hat{r}_v + \Delta \hat{r}_v = \hat{r}_v + U_v^{-1} \sum_{j=1}^m \frac{b_{jv}}{\sigma_{jv}^2},$$

где r_{v+1} – $(v+1)$ -е приближение; r_v – v -е приближение; U_v^{-1} – матрица, составленная на основе частных производных градиентов поля f_{jx}, f_{jy}, f_{jz} ; b_{jv} – векторное отклонение j -й поверхности положения относительно v -го приближения СО; σ_{jv}^2 – дисперсия ошибки области искомой оценки.

В полученных на данном этапе вторичных координатах остается неучтенной ВИ. Для ее учета производится дальнейшая обработка координат методом адаптивного линейного оптимального сглаживания.

В основе алгоритма адаптивного линейного оптимального сглаживания, используемого в данной работе, лежит метод наименьших квадратов (МНК).

Если измерения неравноточные, то каждой точке приписывается определенный вес $\lambda_i = 1/\sigma_i^2$.

На результаты обработки влияет не абсолютное значение весов, а их соотношение в разных точках траектории. Чем больше относительное значение веса при точке, тем ближе траектория к ней приблизится.

Для упрощения оценки степени и структуры сглаживающего полинома применяются Л-ортогональные базисные функции, которые находятся по следующей трехчленной рекуррентной формуле [7]:

$$P_{k+1}(t) = (t - \alpha_k)P_k(t) - \alpha_{k-1}P_{k-1}(t)$$

где

$$\alpha_{k-1} = \frac{P_{k-1}^T \Lambda t P_k}{P_{k-1}^T \Lambda P_{k-1}}, \quad \alpha_k = \frac{P_k^T \Lambda t P_k}{P_k^T \Lambda P_k},$$

где

Λ – диагональная матрица, на главной диагонали которой стоят веса точек.

Оценка коэффициентов сглаживающего многочлена и их дисперсия определяются по формулам [7]:

$$\hat{a}_k = \frac{P_k^T \Lambda \xi_u}{P_k^T \Lambda P_k}, \quad \sigma_{\hat{a}_k}^2 = \frac{\sigma_{\xi}^2}{P_k^T \Lambda P_k}$$

Вследствие применения Л-ортогональных базисных функций значения коэффициентов получаются независимыми и структуру сглаживающего полинома можно легко определить по критерию Фишера следующим образом:

- вычислить коэффициенты сглаживающего полинома;
- вычислить суммы квадратов отклонений;
- принятие решения об использовании / отбраковке коэффициента.

В результате значения сглаженных параметров и их дисперсий вычисляются по формулам [7]:

$$\hat{\xi}^S(t) = \sum_{k=0}^m a_k^* P_k^S(t), \quad \sigma_{\hat{\xi}(t)}^2 = \sum_{k=0}^m \sigma_{a_k}^2 [P_k^S(t)]^2.$$

Выводы

В результате исследования возможностей и точностных характеристик обобщенного метода получены следующие результаты.

В среде Borland Delphi был реализован алгоритм обработки данных внешнетраекторных измерений, обладающих пространственной избыточностью.

Программа предусматривает моделирование 1728 моделей траекторий и установку одной и более измерительных станций с заданием ее координат.

С помощью программы исследовались различные варианты работы метода при изменении объема и типа первичной информации, а также при изменении взаимного расположения объекта измерений и измерительных средств. В результате были получены числовые характеристики работы метода, а именно, повышение точности конечного результата по сравнению с простыми методами.

При наличии 1 измерительной станции пространственная избыточность отсутствует. Повышение точности конечных результатов в 2,42 раза достигается за счет сглаживания.

При установке двух измерительных станций точность конечных результатов возросла в 15,8 раз.

При наличии трех измерительных станций точность конечных результатов возросла в 24,5 раза.

Дальнейшее повышение степени избыточности (установка дополнительных измерительных средств) нецелесообразно только при определенном расположении измерительных средств.

Библиографический список

1. Агаджанов П. А., Дулевич В. Е., Коростелев А. А. и др. Космические траекторные измерения. - М.: Советское радио, 1969. – 488с.
2. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. - М.: Советское радио, 1978. – 384с.
3. Кушнарев П. И., Огороднийчук Н. Д., Лакеев А. М. Статистические методы контроля точности траекторных измерительных средств. - М.: Физматгиз, 1968. – 317с.
4. Мотылев К. И., Михайлов М. В., Гончаров Е. В., Паслен В. В. Обработка данных измерений, обладающих пространственной избыточностью // Материалы Международной научной конференции “Излучение и рассеяние ЭМВ – ИРЭМВ-2005”. – Таганрог: изд. ТРТУ, 2005. – 438с.
5. Мотылев К. И., Михайлов М. В., Щербов И. Л., Паслен В. В. Методы обработки данных измерений, обладающих пространственной и временной избыточностью // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. - Выпуск 8 (43). - Днепрпетровск, 2006 – 149 с.
6. Огороднийчук Н. Д. Обработка траекторной информации. - К.: изд. КВВАИУ, ч.1, 1981. – 224с.
7. Огороднийчук Н. Д. Обработка траекторной информации. - К.: изд. КВВАИУ, ч.2, 1981. – 144с.