УДК 519.95:518.0

А. Г. Додонов, В. Г. Путятин, В. А. Валетчик
Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

Совместная обработка траекторной измерительной информации при испытаниях сложных информационно-управляющих систем

Рассмотрен метод траекторных измерений, использующий совместную обработку измерительной информации, полученной от полигонных средств внешнетраекторных измерений и специальной бортовой измерительной аппаратуры при натурных испытаниях сложных информационно-управляющих систем на местах их постоянной дислокации.

Ключевые слова: *система, метод, траектория, оценка, модель, информация, обработка.*

Разработка и внедрение в практику полигонных испытаний сложных информационно-управляющих систем (ИУС) эффективных методов и средств траекторных измерений и обработки результатов измерений является актуальной задачей при оценке их тактико-технических характеристик.

Траекторные измерения как новое научно-техническое направление исследований возникли в практике летных испытаний различных систем и летательных объектов (ЛО). Под ними понимается процесс измерения первичных параметров положения, движения объекта и обработки полученных данных для определения траектории полета объекта на интервале измерений с прогнозированием, по возможности, его последующего движения на некотором отрезке времени.

Отличительной чертой траекторных измерений является исключительно высокая требуемая точность и тесная взаимосвязь процессов измерений и обработки информации. Измерения и обработка информации обеспечиваются траекторным (полигонным) измерительно-вычислительным комплексом (ТИВК) в составе: средств внешнетраекторных измерений (СВТИ); систем автоматического или полуавтоматического съема и передачи информации; системы единого времени; вычислительной системы.

Быстрое развитие ИУС придает особую актуальность вопросам повышения точности измерений и обработки траекторной информации, достоверности оценки точности, сокращению сроков обработки, разработке новых прикладных методов анализа траекторной информации, базирующихся на гибком использовании избыточных данных измерений для повышения точности и достоверности результатов.

В настоящей работе рассматривается метод траекторных измерений, использующий избыточную измерительную информацию, полученную от полигонных наземных СВТИ и от специальной бортовой измерительной аппаратуры (СБИА).

Основное отличие предлагаемого метода определения траекторий движения летательных объектов по совокупности измерительной информации, получаемой от СВТИ и СБИА, от методов, используемых в навигации, состоит в возможности предварительного, с использованием эталонной (плановой) траектории, решения системы дифференциальных уравнений систематических погрешностей счисления пути по данным бортовых измерителей, построении аппроксимирующего уравнения ее решения и уточнения после проведения эксперимента его параметров.

При определении движения ЛО в качестве измеряемых различных типов первичных параметров могут быть использованы: расстояния от ЛО до измерительных пунктов (дальности); разности дальностей; производные от дальностей по времени (радиальные скорости); углы, определяющие направление измерительный пункт–ЛО (углы визирования); углы между направлениями от ЛО на два известных пункта (звезду, планету, заданный пункт на Земле и т.п.) и другие величины.

Обработка полученной измерительной информации предполагает проведение трех этапов. На первом этапе производится моделирование эталонной (плановой) траектории полета ЛО и выбор состава базисных функций аппроксимирующего параметрического уравнения, описывающего поведение систематических погрешностей счисления пути по данным бортовых измерителей с заданной точностью. Проведение первого этапа обработки измерительной информации предполагает использование алгоритма, приведенного в [1] .

На втором этапе используются алгоритмы траекторных измерений и навигации: производится первичная обработка измерительной информации полигонных наземных СВТИ, включающая процедуры отбраковки недостоверных или аномальных измерений и приведения их к виду, удобному для дальнейшего использования по существующим алгоритмам, а также построение оценочной траектории ЛО по разработанным навигационным алгоритмам для соответствующих навигационных систем. Обычно используются: позиционные (угломерные, дальномерные, разностно-дальномерные и комбинированные); использующие счисление пути интегрированием скорости и ускорения; основанные на обзорно-сравнительных методах местоопределения; спутниковые радионавигационные системы.

В состав навигационного комплекса ЛО в различных сочетаниях включают: инерциальную систему навигации, доплеровский (или корреляционный) измеритель путевой скорости и угла сноса (ДИСС), датчик воздушной скорости, измеритель курса, крена и тангажа (курсовертикаль), а также угломерно-дальномерную систему ближней навигации, радиосистему дальней навигации, бортовую РЛС и другие датчики навигационной информации.

Объединение и обработка навигационной информации осуществляется с помощью бортовой ЭВМ. При этом обеспечивается непрерывное автоматическое измерение координат ЛО, его путевой и воздушной скорости, курса, углов сноса, крена и тангажа, барометрической и истинной высот.

Основой непрерывного определения координат ЛО является счисление пути с помощью данных инерциальной системы навигации, измерителей воздушной скорости, курса, крена и тангажа, а также путевой скорости и угла сноса, измеряемых ДИСС или корреляционным измерителем.

При централизованной структуре обработки информации на измерительном пункте производится лишь первичная (предварительная) обработка данных траекторных измерений. Она обычно включает в себя преобразование измерительной информации в цифровую форму, проведение простейших операций по сжатию данных траекторных измерений, например линейное или полиномиальное усреднение, привязка данных к шкале единого времени, формирование и кодирование посылок (кадров) траекторной информации для их передачи по каналам связи. Определение параметров траектории объекта производится после сбора всех данных измерений [3].

На третьем этапе производится совместная обработка собранной траекторной измерительной информации с целью уточнения полученного на втором этапе первичного приближения оценочной траектории ЛО по данным полигонных наземных электронно-оптических, оптико-электронных и радиотехнических СВТИ. Построение оценки вектора положения ЛО на третьем этапе обработки совокупных результатов измерений целесообразно вести с использованием итерационных алгоритмов [4].

Основными требованиями, предъявляемыми к обработке результатов измерений, является высокая оперативность выдачи эталонных (априорных) данных и возможно более высокая их точность. На решение этих задач направлено построение предлагаемой схемы обработки, при которой максимально возможное число операций производится до проведения эксперимента (достижение оперативности выдачи эталонной траектории), и предполагающей использование всей полученной измерительной информации для построения оценочной траектории ЛО (достижение точности результатов). Кроме того, вычислительная схема должна предусматривать ограниченность возможностей вычислительной базы в местах проведения экспериментов.

В работе [2] рассматривается задача обработки результатов измерений каждой первичной координаты после исключения систематических ошибок, представленных в виде суммы:

$$x_i = \xi_i(\text{и}) + \Delta_i,\ i = \overline{1,N},$$

где x_i — результат измерения; и — вектор оцениваемых параметров; Δ_i — ошибка измерений.

Требуется найти оценку вектора параметров $\hat{\text{и}}_N = \Phi_N(x_i)$, где Φ_N задается конечным алгоритмом.

Решение задачи определяется набором предположений о виде функции ξ, классе алгоритмов Φ_N, среди которых выбирается наилучший, исходной (априорной) информации об оцениваемых параметрах и случайном факторе (ошибке измерения Δ), а также набором критериев, по которым сравниваются алгоритмы Φ_N. Точные значения векторов Δ при решении рассматриваемой задачи остаются неизвестными. Их обычно рассматривают как случайные векторы с заданными вероятностными характеристиками (законами распределения, моментами и т.п.).

Следуя [2], введем вектор $\delta l_s(\tau_j)$, $j=\overline{1,M}$, $s=\overline{1,N}$:

$$\delta l_s(\tau_j)=\bar{l}_s(\tau_j)-\tilde{l}(\tau_j)=W\delta x_s+\xi(\tau_j), \tag{1}$$

где $\tilde{l}(\tau_i)$ — вектор измерений, т.е. совокупность всех используемых измерений; M — число измерений; $\bar{l}_s(\tau_j)$ — расчетные значения вектора измерений, полученные с использованием эталонных (плановых) параметров движения ЛО; $\delta x_s(\tau_j)$ — отклонение текущего вектора положения ЛО от расчетного; W — матрица непрерывных частных производных вида $\partial F_i/\partial c_s$; $\xi(\tau_j)$ — случайный вектор ошибок измерений.

Используя известные соотношения [1, 2] зависимость (1) можно привести к следующему виду:

$$\delta l_s(\tau_j)=W\Phi c_s+\xi(\tau_j), \tag{2}$$

где c_s — вектор неизвестных коэффициентов;

$$\Phi=\begin{vmatrix}\Phi_1 & O & O\\ O & \Phi_2 & O\\ O & O & \Phi_3\end{vmatrix},\quad \Phi_v=(\varphi_{1v},\varphi_{2v},\ldots,\varphi_{rv}). \tag{3}$$

Среднеквадратические значения погрешностей аппроксимации ξ_α в выражении

$$\delta X=\Phi_c+\xi_\alpha \tag{4}$$

заключены в пределах от долей до единиц метров, поэтому в дальнейшем при выводе основных расчетных соотношений будем ними пренебрегать.

Среди формальных методов получения оценок наибольшее распространение получил метод наименьших квадратов (МНК) [1–4]. Вычислительная схема МНК является одной из самых простых, поэтому метод наименьших квадратов зачастую выгодно применять даже тогда, когда ошибки измерений не подчинены нормальному закону. Возникающие при этом квазиправдоподобные оценки обладают меньшей точностью, чем истинно правдоподобные оценки, зато они получены ценой не слишком больших усилий. Многократное повторение стандартной процедуры МНК с изменяющимися весами позволяет во многих случаях получить не только квазиправдоподобные, но и истинно правдоподобные оценки.

Вычислительные схемы МНК удобны также и тем, что позволяют организовать так называемые рекуррентные схемы вычислений, в которых получение каждого нового измерения влечет за собой изменение прежней оценки. Рекуррентные схемы обработки особенно важны в тех случаях, когда определяются характеристики процессов, развивающихся во времени, и когда необходимо иметь в наличии самые свежие сведения о переменных состояния процесса.

Рекуррентные алгоритмы — это алгоритмы, которые позволяют получать последовательно улучшающиеся оценки по мере поступления результатов измерений. Они могут дать улучшение таких важных показателей, как быстрота получения оценок, простота реализации и систематичность контроля параметров.

Общая форма рекуррентных (итеративных) алгоритмов оценки неизвестного вектора $\bar{c}_v$ записывается в виде:

$$\bar{c}_{v,s,n} = \hat{c}_{v,s,n-1} + b_{s,v,n}\left(\delta l_n - W_{v,n}\Phi_{v,n}\hat{c}_{v,s,n-1}\right), \tag{5}$$

где δl_n — элемент вектора δl; $\hat{c}_{v,s,n}$ — оценка вектора $c_{v,s}$ на n-м шаге итерационной процедуры.

После получения оценок возникает вопрос об их точности. Точность оценок существенно зависит от способа назначения весовых характеристик, который, в свою очередь, определяется предположениями, сделанными в отношении точностных характеристик отдельных измерений [1–5].

Оптимальность рекуррентного алгоритма (5) определяется неизвестными значениями вектора коэффициентов $b_{s,v,n}$, которые выбираются на основании априорных сведений о характере погрешностей измерений. Так, в случае, если $\Delta \equiv \mathrm{O}$, $\xi_n \in N\left(\mathrm{O}, \sigma_l^2\right)$, то представленная схема вырождается в алгоритм рекуррентного МНК, и оптимальные значения весовых коэффициентов определяются выражением:

$$b_{s,v,n} = \frac{p_n W_n \Phi_{v,n}}{\sum\limits_{i-1}^{M} p_i W_v \Phi_{v,i}}, \tag{6}$$

где $p_i = 1/\sigma_i^2, i = 1,2,\ldots,n$ — весовые характеристики, назначенные в виде величин, обратных дисперсиям отдельных измерений [1].

Это наиболее часто употребляемая форма построения оценок неизвестного вектора $c_{v,n}$, к которой приводят исследования, проведенные в работах [1–6].

Наиболее общая форма рекуррентных алгоритмов вида (5), когда априорные сведения о характере погрешностей измерений не могут иметь достаточного теоретического обоснования, рассмотрена при исследовании процедур стохастической аппроксимации [2].

Обозначим $\varepsilon_n = \hat{c}_{v,s,n} - c_{v,s,n}$, где $c_{v,s,n}$ — истинное значение вектора коэффициентов, тогда рекуррентная процедура (5) записывается в виде:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{n-1} + b_{s,v,n}\left(\xi_n - W_{v,n}\Phi_{v,n}\right) = G_n\,\varepsilon_{n-1} + \xi_n\, b_{s,v,n}, \tag{7}$$

где $G_n = E - b_{s,v,n}\Phi^T{}_{v,n}$; E — математическое ожидание случайного вектора ошибок измерений.

Определим матрицы: $\pi_{n+1,n} = E,\ \pi_{k,N} = \prod_{l=N}^{\kappa} G_l,\ k = \overline{1,N}$.

Тогда:

$$\varepsilon_n = \pi_{1,n}\varepsilon_0 + \sum_{k=1}^{n}\xi_k \pi_{k+1,n} b_{s,v,k}. \tag{8}$$

Если при $n \to \infty$ математическое ожидание нормы вектора $\varepsilon \to \infty$, то процедура (5) определяет истинные значения коэффициентов $c_{v,s,n}$.

Введем в рассмотрение матрицу $K_n = M\left\{\varepsilon_n \varepsilon_n^T\right\}$, которая будет ковариационной матрицей оценок в случае их несмещенности, тогда:

$$K_n = M\left\{\varepsilon_n^T \varepsilon_n\right\} = tr\,K_n. \tag{9}$$

Весовые коэффициенты $b_{s,v,n}$ выбираются таким образом, чтобы минимизировать значение (9). Из выражений (8) и (9) следует:

$$K_n = G_n K_{n-1} G_n^T + \sigma_{\xi,n}^2 b_{s,v,n} b_{s,v,n}^T + G_n \lambda_n b_{s,v,n}^T + b_{s,v,n}\lambda_n^T G_n^T, \tag{10}$$

где $\sigma_{\xi,n}^2 = M\left\{\xi_n^2\right\}$ — дисперсии соответствующих составляющих вектора ошибок ξ_n; $\lambda_n = M\left\{\xi_n \varepsilon_{n-1}\right\},\ n = 1,2\ldots$

Для λ_n с использованием выражений (8) и (10) можно составить явное аналитическое выражение:

$$\lambda_n = \sum_{k=1}^{n} r\left(k-1, n\right)\pi_{k,n-1} b_{s,v,n-1}, \tag{11}$$

где $r\left(k,n\right) = M\left\{\xi_k \xi_n\right\},\ \lambda_1 = r\left(0,1\right) b_{s,v,o}$.

Явная зависимость K_n от $b_{s,v,n}$ может быть записана как:

$$\begin{aligned} K_n = tr\,K_{n-1} + 2b_{s,v,n}^T\left(\lambda_n - K_{n-1}\Phi_{v,n}^T W_{v,n}^T\right) + \\ + \left(\sigma_{\xi,n}^2 + W_{v,n}\Phi_{v,n} K_{n-1}\Phi_{v,n}^T W_{v,n}^T - 2W_{v,n}\Phi_{v,n}\lambda_{v,n}\right) b_{s,v,n}^T b_{s,v,n}. \end{aligned} \tag{12}$$

Минимизируя выражение (12) по элементам вектора $b_{s,v,n}$, получим оптимальный вектор коэффициентов влияния:

$$b_{s,v,n} = \frac{\left(K_{n-1}\Phi^{T}_{v,n}W^{T}_{s,v,n} - \lambda_n\right)}{\left(\sigma^{2}_{\xi,n} + W_{v,n}\Phi_{v,n}K_{n-1}\Phi^{T}_{v,n}W^{T}_{v,n} - 2W_{v,n}\Phi_{v,n}\lambda_n\right)}. \qquad (13)$$

Таким образом, получена рекуррентная форма для вычисления оптимальных в смысле минимума соотношения (12) коэффициентов влияния для использования в алгоритме (5).

Поскольку матрица K_n симметрическая по определению, то:

$$K_n = G_n K_{n-1} + b_{s,v,n}\lambda^{T}_{n}. \qquad (14)$$

Условие монотонной сходимости получаемой на каждом шагу итерационной процедуры оценки $\hat{c}_{s,v,n}$ к истинному значению $c_{s,v,n}$ задается неравенством:

$$\sigma^{2}_{\xi,n} + W_{v,n}\Phi_{v,n}K_{n-1}\Phi^{T}_{v,n}W^{T}_{v,n} > 2\,W_{v,n}\Phi_{v,n}\lambda_n. \qquad (15)$$

В случае если ξ_k, $k = 1,2\ldots$ — некоррелированные, то условие (15) превращается в неравенство

$$\sigma^{2}_{\xi,n} + W_{v,n}\Phi_{v,n}K_{n-1}\Phi_{v,n}W_{v,n} > 0, \qquad (16)$$

которое всегда выполняется, так как матрица K_n для любых ξ_n положительно определена.

Таким образом, уравнение (5) совместно с выражениями (6) или (13) решают задачу совместной обработки результатов измерений для оценивания значения $c_{s,v,n}$.

Расчет коэффициентов $b_{s,v,n}$, входящих в процедуру (5), может быть произведен априорно на основании данных об ожидаемых характеристиках закона распределения погрешностей измерений. При этом может быть использована мощная вычислительная техника полигона или разработчика ИУС. В процессе послеполетной подготовки предлагается проводить лишь ее заключительный этап, включающий в себя только реализацию выражения (5).

Расчет параметров взаимного положения двух летательных объектов в районе встречи при наличии на борту объектов измерений специальной аппаратуры траекторных измерений производится с использованием штатных алгоритмов. В противном случае эти параметры определяются по данным измерений наземных оптических СВТИ, реализующих пеленгационный метод [7, 8].

Пеленгационный метод определения параметров траекторий полета ЛО нашел широкое применение и реализуется при наличии в составе полигонного измерительно-вычислительного комплекса точных средств, измеряющих угловое положение объекта в пространстве. Метод эффективно используется для оптических измерительных средств (кинотеодолитов, кинотелескопов, электронно-оптической техники).

Высокая точность пеленгационного метода определения параметров траекторий полета ЛО позволяет использовать полученные им эталонные траектории для оценки точности других методов измерения координат.

Несмотря на то, что для определения координат объекта достаточно двух измерительных инструментов, в практике полигонных испытаний ИУС их используют три и более, что повышает надежность и точность измерений углового положения объекта в пространстве.

Основным недостатком пеленгационного метода является существенное падение точности измерения угловых координат объекта при его значительном удалении от измерительных средств (на дальности свыше 100 км).

Предложенный метод траекторных измерений при испытаниях сложных ИУС на местах постоянной дислокации предполагает совместное использование измерительной информации бортовых и наземных измерителей, не требует привлечения дополнительных наземных траекторных и вычислительных средств, а по точностным характеристикам не уступает ныне используемым на полигонах методам.

1. *Мудров В.Н., Кушко В.Л.* Методы обработки измерений: квазиправдоподобные оценки. — М.: Радио и связь, 1983. — 304 с.

2. *Эльясберг П.Е.* Определение движения по результатам измерений. — М.: Наука, 1976. — 416 с.

3. *Жданюк Б.Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений. — М.: Сов. радио, 1978. — 384 с.

4. *Линник Ю.В.* Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. — М.: Физматгиз, 1962. — 352 с.

5. *Пустыльник Е.И.* Статистические методы анализа и обработки наблюдений. — М.: Наука, 1968. — 288 с.

6. *Тьюки Дж.* Анализ результатов наблюдений. — М.: Мир, 1981. — 692 с.

7. *Бакулев П.А.* Радиолокационные системы. — М.: Радиотехника, 2004. — 320 с.

8. *Поршнев С.В.* Радиолокационные методы измерений экспериментальной баллистики. — Екатеринбург: Уральское Отделение РАН, 1999. — 210 с.

Поступила в редакцию 19.11.2004