УДК 621.396.98

А.Л. Бондаренко

Полтавский военный институт связи

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В МЕСТНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

На основе учета корреляции и смещения при пересчете измерений наземных средств из сферической систем координат в местную топоцентрическую систему координат уточнен алгоритм определения координат летательных аппаратов при совместной обработке измерительной информации наземных и космических средств.

глобальные спутниковые радионавигационные системы, наземные измерительные средства

Введение

Одним из ответственных и дорогих этапов испытаний летательных аппаратов (ЛА) является этап натурных полигонных испытаний. В последнее время с целью экономии средств рассматривается возможность использования в качестве средств внешнетраекторных измерений различного рода систем, построенных на основе использования информации от глобальных спутниковых радионавигационных систем [1, 2, 5]. В связи с этим возникает проблема оценки координат летательных аппаратов в местной системе координат по информации спутниковых радионавигационных приемников и наземных измерительных средств.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [2] получено решение навигационной задачи (определение пространственно-временных координат потребителя, а также составляющих его скорости) с помощью спутниковых радионавигационных систем. Для решения навигационной задачи используют функциональную связь между навигационными параметрами и компонентами вектора потребителя – навигационные функции. Навигационные функции для пространственных координат потребителя можно определить с помощью многих разновидностей дальномерных, разностно-дальномерных, угломерных методов и их комбинаций. В работах [1, 5] предложены алгоритмы определения координат летательных аппаратов при совместной обработке измерительной информации наземных и космических средств и произведена оценка их точностных характеристик методом статистического моделирования. Однако, в этой работе для определения положения ЛА в местной прямоугольной системе координат при совместной обработке измерительной информации наземных и космических средств не учитывались корреляция и смещение параметров в результате пересчета измерений наземных средств из сферической в прямоугольную топоцентрическую систему координат.

Целью работы является разработка уточненного алгоритма определения положения ЛА в местной прямоугольной системе координат при совместной обработке измерительной информации наземных и космических средств с учетом корреляции и смещения параметров в результате пересчета измерений наземных средств из сферической в прямоугольную топоцентрическую систему координат.

Изложение основного материала

В [5] предложен алгоритм оценивания координат ЛА в топоцентрической системе координат. В нем по измерениям псевдодальности от n навигационных спутников приемником, установленном на ЛА, с помощью итерационного алгоритма наискорейшего спуска получают вектор оценок координат ЛА $\hat{X}_{кс}$ с соответствующей матрицей ошибок оценивания $K_{\hat{X}_{кс}}$.

В эту же систему пересчитываются и измерения от наземного средства (если дальность не измеряется, то используются оценки дальности, полученные по измерениям от спутниковых радионавигационных приемников). Известно, что при пересчете координат возникает смещение и корреляция между прямоугольными координатами [3]. С целью упрощения эти факторы в рассматриваемом алгоритме не учитывались. Обозначим вектор пересчитанных измерений через $\hat{X}_{нс}$:

$$\hat{X}_{нс} = D_{нс} \cdot \cos\beta_{нс} \cdot \cos\alpha_{нс};$$
$$\hat{Y}_{нс} = D_{нс} \cdot \sin\beta_{нс}; \qquad (1)$$
$$\hat{Z}_{нс} = D_{нс} \cdot \cos\beta_{нс} \cdot \sin\alpha_{нс},$$

а соответствующую диагональную матрицу ошибок измерений через $K_{\hat{X}_{нс}}$, элементы которой равны [3]:

$$\sigma^2_{\hat{X}_{нс}} = \frac{(D_{нс})^2 + \sigma_D^2}{4} \cdot \left[1 + \cos(2\beta_{нс}) \cdot \exp\left\{-2\sigma_\beta^2\right\}\right] \times \left[1 + \cos(2\alpha_{нс}) \cdot \exp\left\{-2\sigma_\alpha^2\right\}\right] - \left[D_{нс} \cdot \cos(\beta_{нс}) \cdot \cos(\alpha_{нс})\right]^2 \cdot \exp\left\{-(\sigma_\beta^2 + \sigma_\alpha^2\right\};$$

$$\sigma^2_{\hat{Y}_{нс}} = \frac{(D_{нс})^2 + \sigma_D^2}{2} \cdot \left[1 - \cos(2\beta_{нс}) \cdot \exp\left\{-2\sigma_\beta^2\right\}\right] - \left[D^2 \cdot \sin(\beta_{нс}) \cdot \exp\left\{-2\sigma_\beta^2\right\}\right]; \qquad (2)$$

$$\sigma^2_{\hat{Z}_{нс}} = \frac{(D_{нс})^2 + \sigma_D^2}{4} \cdot \left[1 + \cos(2\beta_{нс}) \cdot \exp\left\{-2\sigma_\beta^2\right\}\right] \times \left[1 - \cos(2\alpha_{нс}) \cdot \exp\left\{-2\sigma_\alpha^2\right\}\right] - \left[D_{нс} \cdot \cos(\beta_{нс}) \cdot \cos(\alpha_{нс})\right]^2 \cdot \exp\left\{-(\sigma_\beta^2 + \sigma_\alpha^2\right\},$$

где $D_{нс}$ – измеренная дальность наземным средством (если дальность не измеряется, то вместо неё подставляется оценка дальности, полученная по данным навигационных спутников); $\alpha_{нс}$ – измеренный азимут наземным средством; $\beta_{нс}$ – измеренный угол места наземным средством; $\sigma_D^2, \sigma_\alpha^2, \sigma_\beta^2$ – дисперсии погрешностей измерения дальности и соответствующих угловых координат наземным средством.

Результирующая линейная оценка и ее корреляционная матрица соответственно равны [4]:

$$\hat{X}_р = \hat{X}_{кс} + K_{\hat{X}_{кс}}(K_{\hat{X}_{кс}} + K_{\hat{X}_{нс}})^{-1}(\hat{X}_{нс} - \hat{X}_{кс});$$

$$K_{\hat{X}_р} = K_{\hat{X}_{кс}} - K_{\hat{X}_{кс}}(K_{\hat{X}_{кс}} + K_{\hat{X}_{нс}})^{-1}K_{\hat{X}_{кс}}. \qquad (3)$$

При наличии нескольких наземных станций формулы (3) применяются многократно (вместо значений с индексом КС подставляются соответствующие значения результатов предыдущего объединения оценок). С целью уточнения алгоритма учтем в нем смещение и корреляцию между прямоугольными координатами, которые возникают при пересчете координат.

Смещение или систематические ошибки оценок прямоугольных координат цели описываются выражениями, найденными в [3]:

$$\hat{X}_{см} = D_{нс} \cdot \cos(\beta_{нс}) \cdot \cos(\alpha_{нс}) \cdot \left[1 - \exp\left\{-\left(\sigma_\beta^2 + \alpha_\alpha^2\right)/2\right\}\right];$$
$$\hat{Y}_{см} = D_{нс} \cdot \sin(\beta_{нс}) \cdot \left[1 - \exp\left\{-\sigma_\beta^2/2\right\}\right]; \qquad (4)$$
$$\hat{Z}_{см} = D_{нс} \cdot \cos(\beta_{нс}) \cdot \sin(\alpha_{нс}) \cdot \left[1 - \exp\left\{-\left(\sigma_\beta^2 + \sigma_\alpha^2\right)/2\right\}\right].$$

Определим далее корреляционные связи между оценками прямоугольных координат. Воспользовавшись соотношениями (1), находим выражения для малых приращений:

$$\Delta X = -\Delta\beta D \sin\beta \cdot \cos\alpha + \Delta\alpha\Delta\beta \cdot D \sin\beta \sin\alpha - \Delta\alpha D \cos\beta \cdot \sin\alpha + \Delta D \times \left(\cos\beta \cdot \cos\alpha + \Delta\alpha \cdot \cos\beta \cdot \sin\alpha - \Delta\beta \cdot \sin\beta \cdot \sin\alpha - \Delta\beta\Delta\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\alpha\right);$$

$$\Delta Y = \Delta\beta D \cos\beta + \Delta D\left(\sin\beta + \Delta\beta \cdot \cos\beta\right);$$

$$\Delta Z = -\Delta\beta D \sin\beta \cdot \sin\alpha - \Delta\beta \cdot \Delta\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\alpha + \Delta\alpha \cdot D \cdot \cos\beta \cdot \cos\alpha + \Delta D \times \left(\cos\beta \cdot \sin\alpha + \Delta\alpha \cdot \cos\beta \cdot \cos\alpha - \Delta\beta \cdot \sin\beta \cdot \sin\alpha - \Delta\beta \cdot \Delta\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\alpha\right).$$

Учитывая, что

$$M[\Delta\alpha\cdot\Delta\beta]=0,\ M[\Delta\alpha]=M[\Delta\beta]=0$$

и $D \gg \Delta D$, получим выражения для недиагональных элементов матрицы $K_{\hat{X}_{нс}}$:

$$\begin{gathered}K_{XZ}=K_{ZX}=M[\Delta X\cdot\Delta Z]=D^2\cdot\sin\alpha\cdot\cos\alpha\times\\ \times\left(\sigma_\beta^2\sin^2\beta-\sigma_\alpha^2\cos^2\beta-\sigma_\beta\sigma_\alpha\sin^2\beta\right);\\ K_{XY}=K_{YX}=M[\Delta X\cdot\Delta Y]=\\ =-\sigma_\beta^2\cdot D^2\cdot\sin\beta\cdot\cos\beta\cdot\cos\alpha;\\ K_{YZ}=K_{ZY}=M[\Delta Y\cdot\Delta Z]=\\ =-\sigma_\beta^2\cdot D^2\cdot\sin\beta\cdot\cos\beta\cdot\sin\alpha.\end{gathered}\tag{5}$$

Таким образом, в уточненном алгоритме после пересчета координат по формулам (1) учитывается смещение:

$$\begin{gathered}\hat{X}_{нс}=D_{нс}\cdot\cos\beta_{нс}\cdot\cos\alpha_{нс}-\hat{X}_{см};\\ \hat{Y}_{нс}=D_{нс}\cdot\sin\beta_{нс}-\hat{Y}_{см};\\ \hat{Z}_{нс}=D_{нс}\cdot\cos\beta_{нс}\cdot\sin\alpha_{нс}-\hat{Z}_{см}.\end{gathered}\tag{6}$$

Кроме этого корреляционная матрица $K_{\hat{X}_{нс}}$ становится не диагональной, а полной с элементами, описываемыми формулами (2) и (5).

Точностные характеристики уточненного и исходного алгоритмов оценивались методом статистического моделирования с использованием данных о реальных эфемеридах четырех навигационных спутников, полученных GPS-приемником Trimble 4000 SSI на перманентной станции в п. Голосеево (г. Киев) 3 августа 2002 г. Значения погрешностей измерения псевдодальности, вызванных шумами приемника и неточным знанием эфемерид, полагались распределенными по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной для всех спутников $\sigma_{iKC}^2=\sigma_{KC}^2=144$ м^2. Рассматривались два варианта наземных средств.

В 1-м варианте рассматривалось пассивное оптическое средство, расположенное в точке с координатами $L = 36$ град, $B = 45$ град и измеряющее угловые координаты ЛА с дисперсией $\sigma_\alpha^2, \sigma_\beta^2 = 100\,мин^2$. Во 2-м варианте рассматривался радиолокатор, расположенный в той же точке и измеряющий дальность с дисперсией $\sigma_D^2 = 100\,м^2$ и угловые координаты ЛА с дисперсией $\sigma_\alpha^2,\ \sigma_\beta^2 = 100\,мин^2$. Координаты ЛА в местной сферической системе координат равны $D = 10$ км, 100 км (для первого и второго вариантов соответственно), $\alpha = 20$ град, $\beta = 3$ град. Итерационный процесс заканчивался при условии $\left|\hat{U}_{K+1}-\hat{U}_K\right| \le 1\,м$, $U=\{X,\ Y,\ Z\}$. При таких исходных данных потенциальная точность оценивания величины $\sqrt{Sp(K_{\hat{X}})}$ при первом варианте равна 12,44 м, а при втором-12,59 м.

Результаты анализа 1000 статистических испытаний рассматриваемых алгоритмов для двух вариантов комплексирования средств и при точности задания начальных условий около 1 км (поскольку точности обоих алгоритмов слабо зависят от точности начальных приближений) приведены в табл. 1.

В качестве характеристик алгоритма рассматривались следующие [5]: среднее количество итераций, необходимое для получения оценки; $\hat{\sigma}=\sqrt{\hat{\sigma}_x^2+\hat{\sigma}_y^2+\hat{\sigma}_z^2}$ – величина, характеризующая среднеквадратическое отклонение оценки; $\hat{C}м=\sqrt{\hat{X}_{см}^2+\hat{Y}_{см}^2+\hat{Z}_{см}^2}$ – величина, характеризующая смещение оценки; $\hat{\sigma}_\Sigma=\sqrt{\hat{\sigma}^2+\hat{C}м^2}$ – величина, характеризующая суммарную погрешность оценки.

Таблица 1

Результаты анализа 1000 статистических испытаний

Характеристика алгоритма	Исходный алгоритм		Уточненный алгоритм	
	Вар. № 1	Вар. № 2	Вар. № 1	Вар. № 2
Среднее кол-во итераций	1	1	1	1
$\hat{C}м$ (м)	0,48	0,58	0,27	0,14
$\hat{\sigma}$ (м)	25,1	33,9	14,48	14,62
$\hat{\sigma}_\Sigma$ (м)	25,16	34	14,48	14,62

Анализ результатов показывает, что уточненный алгоритм (с учетом смещения и корреляции пересчитанных координат) для рассматриваемых условий позволяет повысить точность определения координат ЛА в 1,74 ... 2,32 раза. Естественно, что это справедливо при полностью известных координатах ЛА и дисперсиях измерений наземных средств, значения которых используются при расчете смещений и корреляций. Поскольку координаты ЛА вначале определяются по данным спутников, то получаемая при этом погрешность мало влияет на конечный результат. Дисперсии измерения наземных средств, которые в данной задаче являются эталонными, тоже известны. Поэтому для рассматриваемого случая приведенное допущение можно считать справедливым.

Выводы

Таким образом, в результате использования уточненного алгоритма как при комплексировании спутниковой информации с угломерной информацией наземных средств (оптические станции) на малой дальности, так и при комплексировании спутниковой информации с информацией радиолокационных средств, измеряющих сферические координаты на большой дальности точности координат ЛА могут быть повышены примерно в два раза по сравнению с алгоритмом, не учитывающем смещения и корреляции пересчитанных координат из сферической в местную прямоугольную.

Список литературы

1. Деденок В.П., Писаренок Г.Г., Бондаренко А.Л. Совместное использование информации глобальных радионавигационных систем и наземных измерительных средств при полигонных испытаниях летательных аппаратов // Збірник наукових праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ ЗС, 2007. – Вип. 1 (6). – С. 60-67.

2. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. – М.: Трендс, 2000. – 267 с.

3. Рощупкин Е.С. Ошибки преобразования сферических координат радиолокационных целей в прямоугольные // Збірник наукових праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ ЗС, 2006. – Вип. 1 (3). – С. 155-161.

4. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.

5. Деденок В.П., Писаренок Г.Г., Кузнецова М.Ю., Бондаренко А.Л. Оценка точностных характеристик алгоритмов определения координат летательных аппаратов по данным глобальных спутниковых радионавигационных систем и наземных измерительных средств // Збірник наукових праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ ЗС, 2007. – Вип. 2 (7). – С. 172-178.

Поступила в редколлегию 5.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Деденок, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков.