

УДК 621.396.98

В.П. Деденок<sup>1</sup>, А.Л. Бондаренко<sup>2</sup><sup>1</sup>Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков<sup>2</sup>Полтавский военный институт связи, Полтава

## ТОЧНОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

*Разработана методика оценки точности определения координат летательных аппаратов при совместной обработке измерительной информации наземных и космических средств с использованием реальных эфемерид навигационных спутников, передаваемых в навигационных сообщениях.*

*летательный аппарат, эфемериды, навигационный спутник, 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]. В связи с этим возникает проблема оценки точностных характеристик систем, включающих в себя информацию спутниковых радионавигационных приемников и наземных измерительных средств.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах [2, 3] получено решение навигационной задачи (определение пространственно-временных координат потребителя, а также составляющих его скорости) в спутниковых радионавигационных системах. 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 [4] рассмотрен обобщенный алгоритм совместной обработки на борту летательного аппарата данных от измерителей наземного, воздушного и космического базирования. В [5] синтезирован алгоритм определения координат летательных аппаратов при совместной обработке измерительной информации наземных и космических средств, и в линейном приближении получены выражения для оценки его точностных характеристик.

**Целью работы** является разработка алгоритма и методики оценки точностных характеристик определения координат ЛА при совместной обработке измерительной информации наземных и космических средств.

### Изложение основного материала

В [5] для случая измерений псевдодальности от  $n$  навигационных спутников приемником, установленным на летательном аппарате, координаты которого нам неизвестны и подлежат определению, а также измерений от  $m$  наземных средств, координаты каждого из которых известны, получено следующее выражение (в линейном приближении) для корреляционной матрицы ошибок оценок геоцентрических координат летательного аппарата:

$$K_{\hat{X}} = (A^T K^{-1} A)^{-1}, \quad (1)$$

$$\text{где } A = \frac{dF(\hat{X})}{d\hat{X}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \hat{X}} & \frac{\partial F_1}{\partial \hat{Y}} & \frac{\partial F_1}{\partial \hat{Z}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \hat{X}} & \frac{\partial F_2}{\partial \hat{Y}} & \frac{\partial F_2}{\partial \hat{Z}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_{n+3m}}{\partial \hat{X}} & \frac{\partial F_{n+3m}}{\partial \hat{Y}} & \frac{\partial F_{n+3m}}{\partial \hat{Z}} \end{vmatrix} \quad - \text{ мат-}$$

рица  $3 \times n + 3m$ ;

$$\begin{aligned} F_1 &= D_{\text{ИСТ}1}, F_2 = D_{\text{ИСТ}2}, \dots, F_n = D_{\text{ИСТ}n}, F_{n+1} = \\ &= D_{\text{ИСТ}1}, F_{n+2} = \alpha_{\text{ИСТ}j}, F_{n+3} = \beta_{\text{ИСТ}j}, \dots, F_{n+3m-2} = \\ &= D_{\text{ИСТ}m}, F_{n+3m-1} = \alpha_{\text{ИСТ}m}, F_{n+3m} = \beta_{\text{ИСТ}m}; \end{aligned}$$

$D_{\text{ИСТ}i} = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2}$  – значение дальности от летательного аппарата, имеющего геокоординаты  $X, Y, Z$ , до  $i$ -го навигационного спутника с эфемеридами  $X_i, Y_i, Z_i$ ,  $i=1, \dots, n$ ;

$D_{\text{ИСТ}j} = \sqrt{(X - X_j)^2 + (Y - Y_j)^2 + (Z - Z_j)^2}$  – значение дальности от летательного аппарата, имеющего геокоординаты  $X, Y, Z$ , до  $j$ -го наземного средства с координатами  $X_j, Y_j, Z_j$ , находим уравнения связи для угловых измерений:

$$\alpha_{\text{НИСТj}} = \arcsin \frac{-\sin L_j (X - X_j) + \cos L_j (Y - Y_j)}{\sqrt{M(X, Y, Z) + N(X, Y, Z)}},$$

$$\beta_{\text{НИСТj}} =$$

$$= \arcsin \frac{\cos L_j \cos B_j (X - X_j) + \sin L_j \cos B_j (Y - Y_j) + \sin B_j (Z - Z_j)}{\sqrt{(X - X_j)^2 + (Y - Y_j)^2 + (Z - Z_j)^2}},$$

$$N(X, Y, Z) = (1 - \cos^2 L_j \cos^2 B_j)(X - X_j)^2 +$$

$$+ (1 - \sin^2 L_j \cos^2 B_j)(Y - Y_j)^2 + (1 - \sin^2 B_j)(Z - Z_j)^2,$$

$$M(X, Y, Z) = -2 \cos L_j \sin L_j \cos^2 B_j (X - X_j)(Y - Y_j) +$$

$$- 2 \cos L_j \cos B_j \sin B_j (X - X_j)(Z - Z_j) -$$

$$- 2 \sin L_j \cos B_j \sin B_j (Y - Y_j)(Z - Z_j),$$

$L_j, B_j$  – долгота и широта  $j$ -го наземного средства,

$$K = \begin{vmatrix} K_{\text{КС}} & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & K_{\text{НС1}} & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & K_{\text{НСm}} \end{vmatrix};$$

$$K_{\text{КС}} = \begin{vmatrix} \sigma_{\text{КС}}^2 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{КС}}^2 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \sigma_{\text{КС}}^2 \end{vmatrix}; K_{\text{НСj}} = \begin{vmatrix} \sigma_{\text{Dj}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\alpha j}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\beta j}^2 \end{vmatrix},$$

где  $\sigma_{\text{КС}}^2$  – суммарная дисперсия погрешности измерения псевдодальности с помощью  $i$ -го спутника, вызванная неточным знанием эфемерид и шумами приемника;  $\sigma_{\text{Dj}}^2, \sigma_{\alpha j}^2, \sigma_{\beta j}^2$  – дисперсии погрешностей измерения дальности и соответствующих угловых координат  $j$ -м наземным средством.

С использованием полученных соотношений можно предложить следующую методику расчета потенциальной точности определения угловых координат объектов:

1. Задаются количество навигационных спутников, их координаты в геоцентрической системе координат на фиксированный момент времени и значения дисперсий измерения псевдодальности  $\sigma_{\text{КС}}^2$ , вызванных шумами приемника и неточным знанием эфемерид.

2. Задаются количество наземных измерителей, их координаты ( $L_j, B_j$  – долгота и широта  $j$ -го наземного средства), значения  $\sigma_{\text{Dj}}^2, \sigma_{\alpha j}^2, \sigma_{\beta j}^2$  – дисперсий погрешностей измерения дальности и соответствующих угловых координат  $j$ -м наземным средством.

3. Пересчитываются координаты летательного аппарата ( $X, Y, Z$ ) в геоцентрической системе координат.

4. Согласно предложенному методу [5] происходит расчет результирующей погрешности в определении координат объекта.

Важным при реализации представленной мето-

дики является задание координат навигационных спутников в геоцентрической системе координат на различные моменты времени. Эти данные проще всего получить при первичных навигационных измерениях из специального навигационного файла формата RINEX, который содержит информацию о текущем состоянии эфемерид навигационных спутников. Согласно предложенной методике был разработан программно-алгоритмический аппарат для оценки потенциальной точности определения координат летательного аппарата. Программирование было выполнено в среде DELFI на ПЭВМ Celeron 1000.

Для примера приведем результаты моделирования оценивания координат летательного аппарата со значениями координат  $\alpha = 30^\circ; \beta = 5^\circ$  на дальностях от десяти до ста пятидесяти километров. В качестве наземного средства примем одну оптическую станцию, измеряющую угловые координаты со среднеквадратическими погрешностями  $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 1$  мин.

Использовались реальные эфемериды четырех, семи навигационных спутников, полученные GPS-приемником Trimble 4000 SSI на перманентной станции в поселке Голосеево (Киев) 3 августа 2002 года. Значения среднеквадратических погрешностей измерения псевдодальности, вызванных шумами приемника и неточным знанием эфемерид, полагаются равными для всех спутников  $\sigma_{\text{КС}} = \sigma_{\text{КС}} = 20$  м.

Аналізу подвергалась величина  $\sqrt{\text{Sp}K_{\hat{X}}}$ . Результаты расчетов использования данных от четырех и шести глобальных навигационных спутников (ГНС), а также комплексации данных от ГНС и наземной станции (НС) при получении минимального и максимального значения погрешности приведены на рис. 1 и 2.

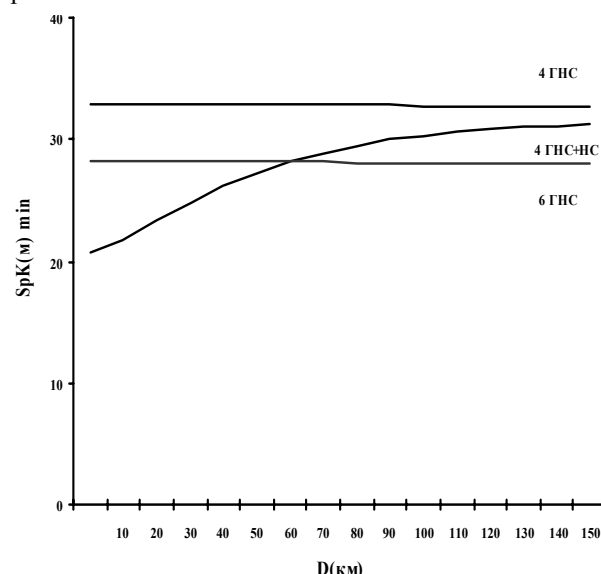


Рис. 1. Зависимость точности местоопределения летательного аппарата от дальности и количества используемых НС (минимальное значение погрешности)

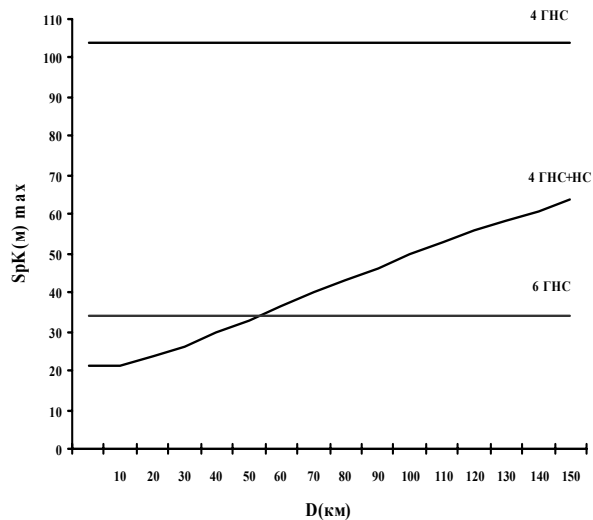


Рис. 2. Залежність точності місцеопределення летального апарата від дальності і кількості використовуваних НС (максимальне значення погрешності)

### Выводы

Таким образом, предложенная методика может лечь в основу решения задач оптимизации состава и расположения наземных внешнетраекторных измерительных средств при обработке их информации совместно с информацией от глобальных спутниковых радионавигационных систем.

### Список литературы

1. Деденок В.П., Вотяков О.И. Особенности использования GPS-технологий при организации полигонных траекторных измерений параметров движения летательных аппаратов // Сб. научн. тр. по мат-м XIII Военно-научн. конф. "Основные направления создания, испытаний и эксплуатации сложных информационных систем". – Житомир: ЖВИРЭ. – 2002. – С. 35.
2. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применения в геодезии. – М.: Геоиздат, 1999. – 264 с.
3. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. – М.: Эко-Трендс, 2000. – 267 с.
4. Огороднійчук М.Д. Узагальнений алгоритм сумісної обробки на борту ЛА навігаційних даних вимірювачів з елементами наземного, повітряного і космічного базування // Зб. наук. пр. Державного науково-дослідного інституту авіації. – К.: ДНДІА, 2005. – Вип. 1 (8). – С. 91-106.
5. Деденок В.П., Писаренко Г.Г., Бондаренко А.Л. Совместное использование информации глобальных радионавигационных систем и наземных измерительных средств при полигонных испытаниях летательных аппаратов // Зб. наук. пр. Об'єднаного науково-дослідного інституту ЗС. – Х.: ОНДІ, 2007. – Вип. 1 (6). – С. 47-53.

Поступила в редколлегию 5.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Г.В. Певцов, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков.