

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТОЧНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С.И. Березина

(представил д.т.н., проф. Д.В. Голкин)

Проводится сравнительная оценка потенциальных точностей определения параметров орбиты космического аппарата (КА) доплеровским, дальномерным и разностно - дальномерным методами на примере орбиты космического аппарата (КА) типа "Січ-1".

Точность определения положения космического аппарата в пространстве существенно зависит от используемых методов измерения вектора наблюдаемых параметров, ошибок измерений и расположения радиотехнических измерительных станций относительно КА. На практике применяются измерения дальномерным и доплеровским методом. Проведем сравнительную оценку точности определения орбит космических аппаратов этими методами и дополнительно разностно - дальномерным методом.

Для решения поставленной задачи введем ряд ограничений, принимаемых обычно при определении орбит КА. Одним из них является наличие достаточно точных начальных условий или априорных данных о значениях элементов орбиты. Измеренные параметры орбиты КА будут состоять из истинных величин и погрешности измерения

$$F_{\text{изм}}(\xi, T) = F_0(\xi, T) + \Delta F(\xi, T),$$

где $F_{\text{изм}}(\xi, T)$ - измеренные величины; $F_0(\xi, T)$ - истинные значения; $\Delta F(\xi, T)$ - погрешность измерения; ξ - вектор параметров орбиты; T - вектор моментов времени измерений.

В окрестности начальных значений $F_0(T)$ и элементов орбиты ξ можно разложить левую и правую части в линейные ряды

$$F_{\text{изм}}(\xi, T) - F_0(\xi, T) = \frac{\partial F(\xi, T)}{\partial \xi} \Delta \xi. \quad (1)$$

Перепишем уравнение (1) в виде

$$F_{\Delta} = A \cdot \Delta, \quad (2)$$

где $A = \left\| \frac{\partial F(\xi, T)}{\partial \xi} \right\|$ - матрица частных производных.

Умножим обе части уравнения (2) на соответствующие транспониро-

ванные матрицы и усредним:

$$\overline{\mathbf{F}_\Delta \cdot \mathbf{F}_\Delta^T} = \overline{\mathbf{A} \cdot \Delta \cdot (\mathbf{A} \cdot \Delta)^T}.$$

После преобразования получим

$$\mathbf{K}_r = \mathbf{A} \mathbf{K}_p \mathbf{A}^T,$$

где \mathbf{K}_r – корреляционная матрица ($\mathbf{N} \times \mathbf{N}$) ошибок измерений; \mathbf{A} – матрица ($\mathbf{N} \times \mathbf{P}$) частных производных от правой части (1) по элементам орбиты КА; \mathbf{A}^T – транспонированная матрица \mathbf{A} ; \mathbf{K}_p – искомая матрица ($\mathbf{P} \times \mathbf{P}$) ошибок определения элементов орбиты КА; \mathbf{N} – число независимых измерений (размерность выборки); \mathbf{P} – число параметров орбиты.

Для случая равноточных и независимых измерений получим окончательное выражение

$$\mathbf{K}_p = \sigma_r^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1},$$

где σ_r^2 – дисперсия ошибок единичных измерений.

Для оценки точности определения орбит КА при дальномерном методе матрица \mathbf{A} будет формироваться с использованием формул невозмущенного движения КА [1, 2].

Для оценки точности определения орбит КА при доплеровском методе матрица \mathbf{A} будет формироваться с использованием формул производных по времени невозмущенного движения КА [3].

Для оценки точности определения орбит КА при разностно - дальномерном методе будем считать, что разность дальностей от выбранного КА измеряется относительно двух наземных пунктов с географическими координатами (λ_i, φ_i) , (λ_j, φ_j) . Выборку независимых измерений разности дальностей представим в виде вектор - столбца [4, 5]:

$$\Delta \mathbf{R}(\mathbf{T}) = \mathbf{R}_1(\xi, \lambda_1, \varphi_1, \mathbf{T}) - \mathbf{R}_2(\xi, \lambda_2, \varphi_2, \mathbf{T}), \quad (3)$$

где вектор - столбцы $\mathbf{R}_1(\xi, \lambda_1, \varphi_1, \mathbf{T})$, $\mathbf{R}_2(\xi, \lambda_2, \varphi_2, \mathbf{T})$ - дальности от КА до первого и второго измерительного пунктов соответственно;

$$\mathbf{R}_i = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2},$$

где x_k, y_k, z_k - координаты КА в геоцентрической системе координат;

x_i, y_i, z_i - координаты i - й станции ($i = 1; 2$).

Для формирования матрицы \mathbf{A} с учетом особенностей разностно - дальномерного метода продифференцируем уравнение (3) по элементам орбиты КА

$$\frac{\partial \Delta \mathbf{R}}{\partial \xi} = \frac{\partial \mathbf{R}_1}{\partial \xi} - \frac{\partial \mathbf{R}_2}{\partial \xi},$$

$$\text{где } \frac{\partial \mathbf{R}_i}{\partial \xi} = \frac{(x_k - x_i) \frac{\partial x}{\partial \xi} + (y_k - y_i) \frac{\partial y}{\partial \xi} + (z_k - z_i) \frac{\partial z}{\partial \xi}}{R_i}.$$

Для расчета возьмем параметры орбиты КА дистанционного зондирования Земли типа «Сич-1», который находится на круговой орбите высотой 600 км. Предположим, что дальность до КА измеряется квантово-оптической станцией (КОС) «Сажень», расположенной в Евпатории, а измерения доплеровским методом проводится контрольно-измерительной станцией (КИС) «Калина», также расположенной в г. Евпатория. Измерения разностно - дальномерным методом проводится гипотетической станцией Евпатория - Дунаевцы. В качестве критерия для сравнения этих методов выберем погрешность определения времени прохождения перигея космического аппарата. В результате исследований установлено, что за 45 витков, сделанных КА, измерения проводились доплеровским методом на 12 витках (2, 7, 8, 15, 16, 22, 23, 30, 31, 36, 37, 45 витки), а дальномерным и разностно - дальномерным методами – на 7 витках (7, 8, 16, 22, 30, 37, 45 витки). На каждом витке проводилось по 8 измерений. Точность первичных измерений зависит от используемой аппаратуры и для доплеровского метода принималась $\sigma^2=1.5625 \cdot 10^{-7} \text{ км}^2/\text{с}^2$, для дальномерного метода – $\sigma^2=1.089 \cdot 10^{-7} \text{ км}^2$, а для разности дальностей будет зависеть от ширины спектра сигнала, излучаемого бортовой аппаратурой и для КА «Сич - 1» будет равна $\sigma^2=1.2 \cdot 10^{-6} \text{ км}^2$. Расчеты также проводились для более широкого полосного сигнала, когда точность первичных измерений сравнивалась с точностью при дальномерном методе. Результаты расчетов представлены на рис.1, где ломаные

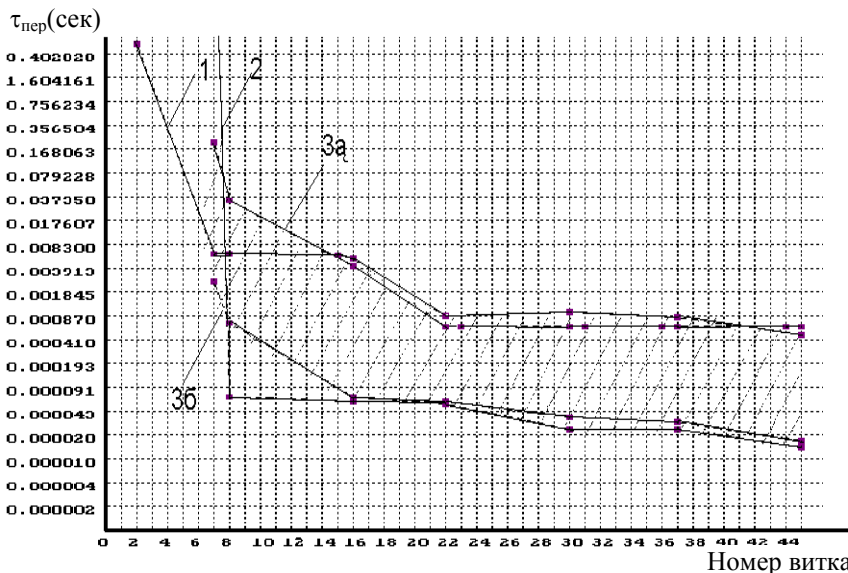


Рис. 1. Точности определения орбиты

обозначены следующим образом: 1 - доплеровский метод; 2 - дальномерный

метод; За - разностно - дальномерный метод при точности первичных измерений для «Січ -1», Зб - он же при точности первичных измерений таких же, как и в дальномерном методе.

Из рис. 1 видно, что при равных точностях первичных измерений дальностей дальномерный и разностно - дальномерный методы дают примерно одинаковые точности определения указанной орбиты. При этом разностно - дальномерным методом можно получить предварительные результаты определения орбиты на один наблюдаемый виток раньше. При увеличении линейной ошибки первичных измерений разности дальностей до 1 км точность определения орбиты КА «Січ -1» разностно - дальномерным методом сравнивается с точностью определения орбиты доплеровским методом при использовании КИС «Калина». Следовательно, разностно - дальномерным методом можно обеспечить точность определения орбиты, достаточную для решения всех практических задач КА «Січ-1». Дополнительное преимущество разностно - дальномерного метода состоит в возможности определения орбит космических аппаратов вне зависимости от времени суток и погодных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Порфирьев Л.Ф., Смирнов В.В., Кузнецов В.И. Аналитические оценки точности автономных методов определения орбит. – М.: Машиностроение, 1987. – 279 с.
2. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Г.С. Нариманова, М.К. Тихонравова. – М.: Машиностроение, 1972. – 607 с.
3. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных / Под ред. П.А. Агаджанова, В.Е. Дулевича, А.А. Коростелева. – М.: Сов. радио, 1969. – 498 с.
4. Космонавтика. Энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1985. – 527 с.
5. Голкин Д.В., Голкина В.В., Бутенко О.С. Точность определения орбит космических объектов по разности дальностей в однобазовом измерительном комплексе // Информационные системы. – Харьков : НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 1999. – Вып. 1(12). – С. 38 - 41.
6. Мельников Ю.П. Методы оценки эффективности воздушной радиотехнической разведки. – С.-П., 1998. – 345 с.

Поступила в редколлегию 27.02.2001
