

УДК 629.78.018

С.Д. Ставицький

Національна академія оборони України, Київ

## МЕТОДИКА ПОПЕРЕДНЬОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТА ЗА ВИМІРЮВАЛЬНОЮ ІНФОРМАЦІЄЮ НЕДОСТАТНЬОГО ОБСЯГУ

*Запропоновано методику визначення похибки позовжнього руху КА, а також спосіб її прогнозування, використовуючи мінімальний набір експериментальних даних.*

*космічний апарат, поточні навігаційні параметри, вимірювальна інформація*

### Вступ

На Україні управління рухом космічного апарату (КА) здійснюється на основі реалізації одно-пунктної технології, що накладає жорсткі вимоги до балістико-навігаційного забезпечення (БНЗ) цього управління [1].

Якість БНЗ управління КА визначається точністю прогнозу руху, що залежить від якості визначення параметрів руху КА і від адекватності математичної моделі руху – реальному руху КА. Визначення параметрів руху КА здійснюється на підставі обробки вимірів поточних навігаційних параметрів (ВПНП), отриманих на радіотехнічних засобах наземного комплексу управління [1, 2].

Для рішення задачі визначення поточних навігаційних параметрів КА з орбітою близькою до кругової і висотою 600-700 км необхідно одержати ВПНП на 6-8 суміжних радіовидимих витках. Для накопичення вибірки вимірів необхідного обсягу потрібно від півтора до двох діб [1].

Для перспективних КА, до яких пред'являються підвищені вимоги щодо оперативності і точності супроводу їхнього польоту (наприклад, для КА подвійного призначення, оснащених апаратурою високої розрізної здатності) актуальною стає задача зменшення числа сеансів ВПНП зі збереженням необхідної точності балістичних розрахунків.

Аналіз БНЗ управління національними КА показав, що самі значимі помилки за часом виходу об'єкта на екватор і по періоду звертання виникають через випадкові варіації щільності верхньої атмосфери Землі, що прогноуються з низькою точністю [1]. Такі помилки істотно зростають у періоди підвищеної сонячної активності. Це приводить до наростання згодом помилок прогнозу місця розташування КА уздовж орбіти. БНЗ польотів національних КА показало, що уточнення за результатами вимірів координат КА уздовж орбіти більш ніж на порядок перевищує величини уточнень координат у площині, нормальної до траєкторії.

Істотне перевищення однієї складової погрешностей прогнозу над іншими дозволяє побудувати

спрощену методику її оцінки.

Вважаючи на вищенаведене, метою даної статті є розробка методики визначення помилки часу виходу КА на екватор (надалі іменовану часовою помилкою) за мінімальним обсягом ВПНП, що дозволить підвищити оперативність визначення положення КА.

### Результати досліджень

У якості експериментальних даних будемо використовувати вибірку ВПНП, що отримана на одному витку. Розглянемо вираз вимірюваного параметра в зоні радіовидимості (ЗРВ) у лінеаризованому вигляді:

$$\xi_i = S_{\text{при}} + \xi_{\text{ci}} + \xi_{\text{оши}} + \dot{S}_i \Delta t + \delta \xi_i, \quad (1)$$

де  $i = 1 \dots n$ ,  $n$  – кількість вимірів у сеансі;  $\xi_i$  – значення вимірювання;  $S_{\text{при}}$  – прогнозоване значення на момент виміру;  $\xi_{\text{ci}}$  – систематична помилка, що виникає через різницю частот КА і вимірювального засобу (ВЗ), а також через тропосферну затримку радіосигналу (у ЗРВ можна вважати постійною);  $\xi_{\text{оши}}$  – відхилення, що виникають через помилки в опорних ПУ;  $\dot{S}_i$  – прогнозоване значення похідної вимірюваного параметра на момент виміру;  $\Delta t$  – помилка в часі виходу на екватор;  $\delta \xi_i$  – випадкова помилка виміру (визначається характеристиками точності ВЗ).

Відхилення вимірюваного параметра, що виникають через помилки у початкових умовах (ПУ) руху КА, оцінити по одному сеансі вимірів важко через погану обумовленість матриці часток похідних [3, 4].

Тому, знайдемо середнє значення  $\xi_{\text{оши}}$  у сеансі вимірів поряд із систематичною помилкою і введемо позначення:

$$\Delta \xi_{\text{при}} = \xi_{\text{ci}} + \xi_{\text{оши}}.$$

Обчислимо відхилення обмірюваних значень параметра від прогнозованих:

$$\Delta \xi_i = \xi_i - S_{\text{пр}i} . \quad (2)$$

Тоді (1) можна переписати у вигляді:

$$\Delta \xi_i = \Delta S_{\text{пр}i} + \dot{S}_i \Delta t + \delta \xi_i$$

або в матричній формі:

$$\Delta \xi_{[n]} = A_{[n,2]} \Delta \xi_{[2]} + \delta \xi_{[n]},$$

де  $\Delta \xi_{[n]}$  – вектор-стовпець відхилень обмірюваних і прогнозованих значень параметра;  $A_{[n,2]}$  – матриця спостереження;  $\Delta \xi_{[2]}$  – вектор-стовпець невідомих параметрів  $[\Delta S_{\text{пр}}, \Delta t]$ ;  $\delta \xi_{[n]}$  – вектор стовпець погрішностей вимірів.

При роботі радіотехнічних засобів (РТЗ) у ЗРВ пункту управління виміри можна вважати незалежними і рівними по точності, а випадкові помилки вимірів відносяться до нормального закону розподілу [5, 6]. Тоді математичне очікування помилок вимірів:

$$M[\delta \xi] = 0, \quad M[\Delta \xi] = \Delta \xi,$$

а кореляційна матриця помилок вимірів:

$$K[\delta \xi] = K[\Delta \xi] = \sigma^2 E_{[n,n]},$$

де  $\sigma^2$  – дисперсія вимірів;  $E_{[n,n]}$  – одинична матриця.

Оцінимо невідомі значення  $\Delta S_{\text{пр}}$  і  $\Delta t$  за методом найменших квадратів (МНК).

Однак перед цим необхідно зробити відбракування аномальних вимірів. Для цього виключаємо з масиву виміри, що по абсолютному значенню більше теоретично можливих для даного вимірюваного параметра. Наприклад, для КА типу "Сич – 1" радіальна швидкість не може перевищувати значення 7,5 км/с. Також виключаємо виміри, для яких кут місця менше  $7^\circ$ , а тому велике значення тропосферної затримки.

Далі визначимо математичне очікування відхилень дорівнює [3]:

$$\Delta \bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta S_i) , \quad (3)$$

і їх середньоквадратичне відхилення (СКВ):

$$S_{\Delta S} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta S_i - \Delta \bar{S})^2} . \quad (4)$$

Виміри, для яких

$$\Delta S_i \geq \mu S_{\Delta S} , \quad (5)$$

виключимо з подальшого розгляду. Величина  $\mu$  підбирається експериментальним шляхом і звичайно складає  $\mu = 2,5$ .

Для знаходження оцінок  $\Delta S_{\text{пр}}$  і  $\Delta t$  по МНК для прийнятої моделі спостереження необхідно мінімізувати квадратичну форму [2, 4, 6]:

$$V(\Delta q) = (\Delta S - A \Delta q)^T (\Delta S - A \Delta q) .$$

Нормальне рівняння прийме вид:

$$A^T A \Delta q - A^T \Delta S = 0 .$$

Тоді шукана оцінка:

$$\Delta q = (A^T A)^{-1} A^T \Delta S . \quad (6)$$

Вираз (6) можна переписати в скалярному вигляді, більш зручному для реалізації на ЕОМ:

$$\Delta t = \frac{n_1 \sum_{i=1}^{n_1} \Delta S_i - \sum_{i=1}^{n_1} \dot{S}_i \sum_{i=1}^{n_1} \Delta S_i}{n_1 \sum_{i=1}^{n_1} \dot{S}_i^2 - (\sum_{i=1}^{n_1} \dot{S}_i)^2} ; \quad (7)$$

$$\Delta S_{\text{пр}} = \frac{1}{n_1} (\sum_{i=1}^{n_1} \Delta S_i - \Delta t \sum_{i=1}^{n_1} S_i) , \quad (8)$$

де  $n_1$  – число вимірів після відбракування.

У зв'язку з тим, що в якості вихідної була прийнята лінеризована модель (1), для одержання шуканих оцінок варто організувати ітераційний процес, при якому на кожній наступній ітерації прогнозовані значення вимірюваного параметра варто розраховувати на моменти часу вимірів плюс виправлення за часом, знайдена на попередній ітерації, тобто:

$$S_{\text{пр}i}^{(\gamma+1)} = f(t_i + \Delta t^{(\gamma)}) ,$$

де  $f$  – вимірювана функція;  $\gamma$  – номер ітерації.

Для формування вектора  $\Delta S$  на  $\gamma+1$  ітерації, треба з вимірів віднімати значення  $\Delta S_{\text{пр}}^{(\gamma)}$ . Подальші обчислення на кожнім зближенні виконуються за формулами (2) – (8). Тоді значення оцінюваних параметрів знаходяться таким чином:

$$\Delta t = \sum_{i=1}^k \Delta t^{(v)} ; \quad \Delta S_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^k \Delta S_{\text{пр}}^{(v)} ,$$

де  $k$  – номер ітерації, на якому  $\Delta t^{(\gamma)}$  менше наперед заданої величини.

Одержувані згідно вищевикладеного алгоритму результати по вимірах радіальної швидкості станціями "Калина" і "Краб" свідчать про те, що помилка за часом, розрахована по одному масиві ВПНП, відрізняється від уточненої помилки по 6 масивам, не більше ніж на 0,15 секунди в залежності від обраного витка вимірів. Для одержання членів розкладання в ряд оцінки помилки за часом з точністю 0,0001 секунди при чисельній реалізації потрібно від 2 до 5 ітерацій.

## Висновки

Таким чином, розроблений алгоритм визначення часового зсуву уздовж орбіти КА по вимірах поточних навігаційних параметрів руху одним наземним пунктом в одному сеансі радіовидимості дозволить розраховувати необхідні виправлення до прогнозу руху і цілевказівкам.

Практична реалізація розробленої методики при БНЗ управління космічними апаратами "Сич-1", "Океан-О" і "АУОС-СМ-КФ", "Сич-1М" показала, що точність прогнозування (максимальні погрішності не перевищують 3-4 секунд), є достатньою для надійного проведення сеансів управління КА.

Корекція розрахункового часу проходження висхідного вузла істотно (у деяких випадках на порядок) зменшує розбіжність розрахункового місця розташування КА від фактичного на правій границі інтервалу прогнозу.

Зближення прогнозованих початкових умов до фактичного збільшує надійність рішення задачі визначення параметрів руху КА при однопунктній технології управління.

При цьому застосування розробленої методики підвищує надійність функціонування космічних систем, що особливо важливо для наземних контурів однопунктного управління КА.

## Список літератури

1. Козелков С.В., Явтушенко А.Н., Ставицький С.Д., Богомья В.І. Дослідження БНЗ управління перспективними національними космічними апаратами // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС. – 2005. – Вип.3 (43). – С. 134-138.
2. Ломако Г.И. Определение и анализ движения по экспериментальным данным. – М.: МО СССР, 1983. – 263 с.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. школа, 1977. – 563 с.
4. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.
5. Козелков С.В., Явтушенко А.М., Ставицький С.Д., Коваль І.М. Основи БНЗ управління КА. – К.: НАОУ, 2004. – 52 с.
6. Брандин В.Н., Васильев А.А., Худяков С.Т. Основы экспериментальной космической баллистики М.: Машиностроение, 1974. – 340 с.

Надійшла до редколегії 17.04.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління, Київ.