

УДК 621.396.98

О.М. РОЯНОВ, Б.О. ЧУМАК, В.А. ЯМНИЦЬКИЙ*Об'єднаний науково-дослідний інститут Збройних Сил, Україна***ПРОГНОЗ РУХУ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАНЬ СУМІЩЕНОЮ РАДІОТЕХНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ**

Проведено прогнозування руху космічного апарату (КА) по даним вимірювальної інформації, одержаної при моделюванні функціонування суміщеної радіотехнічної системи (СРТС). В статті на прикладі супроводу КА «Січ-1М» проведено оцінку якості функціонування СРТС. Показана необхідність забезпечення заданої точності вимірювальної інформації для одержання заданої точності прогнозованих оцінок вектору стану КА в реальному масштабі часу.

суміщена радіотехнічна система, прогнозування руху космічного апарату

Вступ

Аналіз літератури. Задача визначення радіотехнічною системою параметрів руху КА з апіорно заданою точністю викликана необхідністю забезпечення високої якості виконання задач, які покладаються на автоматизовану систему управління КА в цілому [1].

Основними задачами такої системи є:

- планування застосування бортової апаратури КА за призначенням;
- розрахунок цілевказівок для системи контролю параметрів руху КА з метою його супроводу з урахуванням корекції орбіти, що проводиться;
- розрахунок необхідного коректуючого імпульсу протягом сеансу з метою забезпечення оперативного функціонування КА за цільовим призначенням;
- контроль виконання корекції орбіти КА.

Можливість виконання вищеназаних задач із заданими точнісними характеристиками визначається наступними основними чинниками:

- ступенем наближеності математичної моделі, яка описує відносний і прогнозний рух КА, на підставі якої приймається рішення на управління КА;
- точністю роботи вимірників параметрів руху і самим складом вимірювальних параметрів;
- точністю відпрацювання отриманих управляючих дій.

Оскільки рух КА описується системою з шести диференціальних рівнянь, то для однозначного визначення орбіти необхідно оцінити шість параметрів, які вимірюються незалежно і є початковими умовами (ПУ) руху. Проте, обчислення вектора ПУ звичайно проводиться з великими похибками, які в процесі прогнозу руху КА по програмній траєкторії можуть накопичуватися, і в результаті можливий зрив супроводу КА.

При однопунктній технології управління і обмеженій кількості засобів спостереження превалюючий вплив на якість прогнозного руху КА надають похибки вимірювань параметрів його руху. Так, наприклад, для досягнення прийнятної якості прогнозу руху КА з використанням сучасних СРТС проводиться накопичення вимірювань 7-добового супроводу КА. В той же час, при управлінні і прогнозуванні руху КА, особливо військового призначення, вимагається забезпечувати високу оперативність [2].

Аналітичний опис процесів, що протікають в системі управління рухом КА по програмній траєкторії і існуючих як результат суперечності між забезпеченням заданої якості (точності) прогнозу при високій оперативності, з одного боку, і малим об'ємом і невисокою точністю вимірювальної інформації, з другого боку, ускладнений.

Для з'ясування можливостей розв'язання даної суперечності проведені моделювання процесу супро-

воду і прогноз руху реального КА «Січ-1М» (міжнародний номер – 95046А, номер за каталогом НОРАД-23657). Первинні дані про рух КА отримані з офіційного сайту НАСА (www.space-track.org) за період з 23 по 29.01.2006.

Сформулюємо **мету і основні задачі** моделювання, які в процесі аналізу якості контролю траєкторії у вищезгаданій системі зводяться до наступного [1, 3]:

- оцінити вплив якості (точності) вимірювальної інформації на якість (точність) прогнозу;
- оцінити вплив величини інтервалу прогнозу на якість прогнозу;
- оцінити вплив кількості вимірювальної інформації, отриманої на сусідніх мірних витках, на якість прогнозу;
- визначити достатні умови (кількість і якість вимірювальної інформації) для досягнення необхідної якості прогнозу.

Результати досліджень

При моделюванні руху КА характеризувався відомими диференціальними рівняннями в інерційній прямокутній системі координат [4]:

$$\begin{cases} \frac{d\dot{D}_x}{dt} = \frac{dU}{dD_x} + A_{ax} + A_{sx} + A_{px}; \\ \frac{d\dot{D}_y}{dt} = \frac{dU}{dD_y} + A_{ay} + A_{sy} + A_{py}; \\ \frac{d\dot{D}_z}{dt} = \frac{dU}{dD_z} + A_{az} + A_{sz} + A_{pz}; \\ \frac{dD_x}{dt} = \dot{D}_x, \frac{dD_y}{dt} = \dot{D}_y, \frac{dD_z}{dt} = \dot{D}_z, \end{cases} \quad (1)$$

де t – час; D_x, D_y, D_z – координати КА в геоцентричній ІСК; $\dot{D}_x, \dot{D}_y, \dot{D}_z$ – швидкості КА в геоцентричній ІСК; U – геопотенціал Землі; A_{ax}, A_{ay}, A_{az} – прискорення, які викликані взаємодією з верхньою атмосферою Землі в ІСК; A_{sx}, A_{sy}, A_{sz} – прискорення, які викликані світловим тиском в ІСК; A_{px}, A_{py}, A_{pz} – пертурбаційні прискорення, які викликані впливом Місяця та Сонця.

Для розрахунку руху КА в полі тяжіння Землі використовувалось розкладання геопотенціалу за сферичними геогармоніками в ГПСК [4]:

$$U = \frac{fm}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^m J_n \left(\frac{r_0}{r} \right)^n p_n(\sin \varphi) + \sum_{n=2}^m \sum_{k=1}^n I_{nk} \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \times p_{nk}(\sin \varphi) \times \cos [k(\lambda - \lambda_{nk})] \right\}, \quad (2)$$

де $J_n, I_{nk}, \lambda_{nk}$ – безрозмірні коефіцієнти; p_n – функція Лежандра; p_{nk} – приєднаний поліном Лежандра; r_0 – середній екваторіальний радіус Землі $R_3 = 6\,371$ км; r – геоцентричний радіус-вектор зовнішньої точки; fm – постійна тяжіння Землі; φ – геоцентрична широта зовнішньої точки; λ – геоцентрична довгота зовнішньої точки.

Для врахування впливу атмосфери були використані параметри статичної атмосфери і «Параметри динамічної атмосфери» відповідно до ГОСТів (ГОСТ 25645.101–83, ГОСТ 22721–77 і ГОСТ 25645.115–84).

Моделювався вимірювальний комплекс з точкою стояння в м. Севастополь з такими точностними характеристиками при оптимальних значеннях параметрів вимірювальних каналів:

- похибка азимуту – $0,06^\circ$;
- похибка кута місця – $0,06^\circ$;
- похибка далькості – 3 м;
- похибка радіальної швидкості – 0,3 м/с;
- похибка азимутальної швидкості – $0,009^\circ/\text{с}$;
- похибка швидкості за кутом місця – $0,009^\circ/\text{с}$.

Помилки вимірювань для розрахунків були взяті за результатами оцінок точності СРТС зі складним шумоподібним сигналом [5, 6] для оптимальних значень параметрів далекомірно-швидкісних каналів.

В процесі визначення параметрів руху КА проводилося уточнення апріорно відомого вектора початкових умов на початок сеансу зв'язу. В протилежному випадку при прогнозі руху КА на одну добу вектор початкових умов визначався з похибками по складових вектора дальності і вектора швидкості:

$$\delta_{D_x} = 3263,46 \text{ м}; \delta_{D_y} = 2333,20 \text{ м};$$

$$\delta_{D_z} = 1176,02 \text{ м}; \delta_{\dot{D}_x} = -2,40353 \text{ м/с};$$

$$\delta_{\dot{D}_y} = 2,01907 \text{ м/с}; \delta_{\dot{D}_z} = 3,68878 \text{ м/с},$$

а похибки результуючого вектору за дальністю:

$$\delta_{|D|} = 4180,55 \text{ м};$$

за швидкістю:

$$\delta_{|\dot{D}|} = 4,84362 \text{ м/с}.$$

В процесі моделювання виконувалися розрахунки для таких варіантів супроводу і прогнозування руху КА:

- за апіорних (грубих) початкових умов і вимірювальної інформації, отриманої на одному витку, прогнозувалася траєкторія КА на час через 10 хв. після сеансу зв'язку, а також на час через добу після сеансу зв'язку;

- до початкових даних першого варіанту додавалися 4 вимірювання, отримані на початку другого мірного витка. Потім проводився прогноз траєкторії КА на час через 10 хв. після сеансу зв'язку, а також на час через добу після сеансу зв'язку;

- до початкових даних першого варіанту додавалася вся вимірювальна інформація, отримана на другому мірному витку. Потім проводився прогноз траєкторії КА на час через 10 хв. після сеансу зв'язку, а також на час через добу після сеансу зв'язку. Такий підхід необхідний для якнайкращого наближення оцінюваного вектора стану КА до реального:

$$\hat{\lambda}_{\text{це}}^T(t) = \underline{B} \left[\hat{\lambda}_{\text{ну}}^T(t) \right],$$

де $\hat{\lambda}_{\text{ну}}^T(t)$, $\hat{\lambda}_{\text{це}}^T(t)$ – оцінки векторів початкових умов та за даними цілевказівок відповідно; $\underline{B}$ – оператор прогнозу вектора стану КА [1].

При цьому похибки прогнозу

$$\underline{\Sigma} \hat{\lambda}_{\text{це}}^T(t) = \underline{B} \left[\underline{\Sigma} \hat{\lambda}_{\text{ну}}^T(t) \right].$$

Розрахунки для всіх варіантів здійснювалися для випадків, коли:

- надходило 4, 8, 16 і 25 траєкторних вимірювань за сеанс;

- використовувалися 1, 2, 4 і 8-кратні похибки вимірювань вектора поточних навігаційних параметрів КА по відношенню до похибок РТС при оптимальних значеннях параметрів вимірювальних каналів [5, 6].

Результати моделювання прогнозу руху при різних варіаціях вимірювань, точності і кількості сеансів зв'язку наведені на рис. 1 – 4.

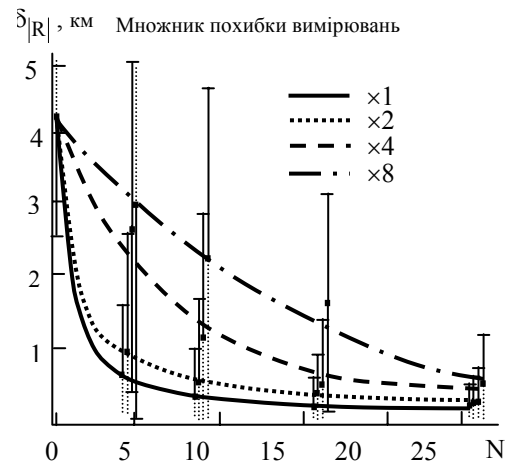


Рис. 1. Результати прогнозу на 1 добу при обробці вимірювальної інформації двох сеансів зв'язку

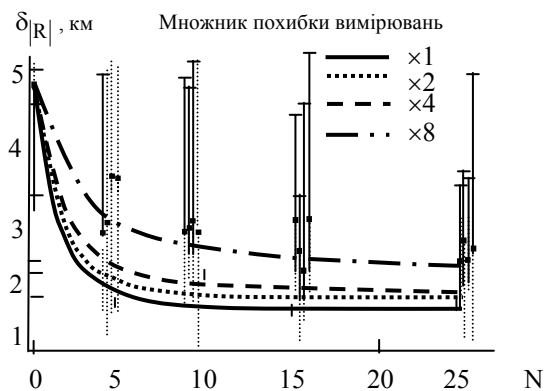


Рис. 2. Результати прогнозу на 1 добу при обробці вимірювальної інформації одного сеансу зв'язку

Аналіз отриманих результатів показав:

- при застосуванні вимірювальної інформації підвищеної точності в реальному масштабі часу здійснюється уточнення вектора початкових умов, що дає можливість під час сеансу істотно підвищувати точність прогнозу руху КА;

- використання високоточних вимірів дозволяє підвищити оперативність прогнозу вектора стану КА при таких же показниках точності прогнозу. Так

задана якість прогнозу забезпечується за 2 – 5 годин замість 7 діб.

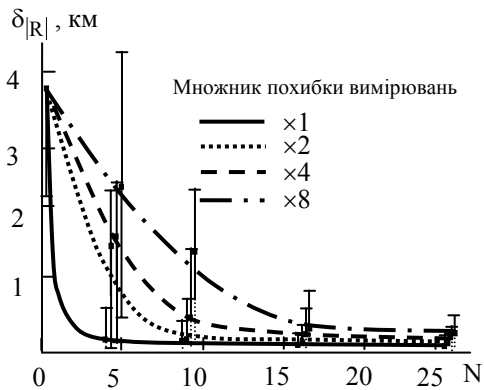


Рис. 3. Результати прогнозу на 10 хвилин після 2-го сеансу зв'язку при обробці вимірювальної інформації двох сеансів

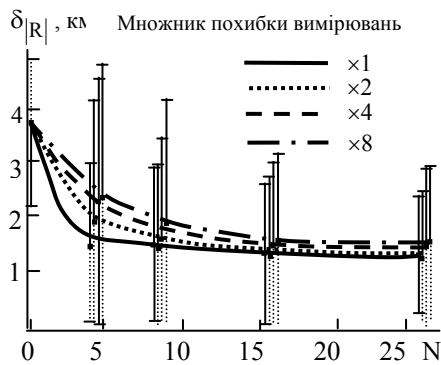


Рис. 4. Результати прогнозу на 10 хвилин після сеансу зв'язку при обробці вимірювальної інформації одного сеансу

Висновки

Таким чином, запропонований підхід дозволить підвищити точність і оперативність при визначенні вектора стану КА і прогнозуванні його руху. Оскільки в процесі отримання вимірювальної інформації прогноз вектора початкових умов і цілевказівок для СРТС уточнюється в реальному масштабі часу, то і супровід КА по програмній траєкторії буде більш точним. Результати моделювання показали, що досить істотне поліпшення якості прогнозу спостерігається у тому випадку, коли використовуються результати спосте-

режень на двох витках – низхідному і висхідному. Уточнення вектора початкових умов КА після двох витків дає вииграш в точності визначення параметрів руху КА на добовому інтервалі в 1,5 – 2 рази.

Література

1. Аналіз впливу якості оцінок параметрів руху на оцінки прогнозу вектору стану космічного апарату / О.В. Дремлюга, І.Г. Лисаченко, О.М. Роянов, Б.О. Чумак, В.М. Попов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 4 (53). – С. 38-45.
2. Закон України №203-IV від 24.10.2002 р. Про Загальнодержавну (Національну) космічну програму України на 2003 – 2007 роки.
3. Лисаченко І.Г., Роянов О.М., Чумак Б.О. Математична модель оптимальної обробки вимірювальної інформації при управлінні космічними апаратами по програмній траєкторії // Моделювання та інформаційні технології. – К.: НАНУ, ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова, 2005. – Вип. 32. – С. 131-136.
4. Навигационное обеспечение полета орбитального комплекса «Салют-6»-«Союз»-«Прогресс» / И.К. Бажинов, В.П. Гаврилов, В.Д. Ястребов и др. – М.: Наука, 1985. – 376 с.
5. Метод оцінки флуктуаційної похибки вимірювань параметрів руху космічного апарату з визначенням її достовірності / Т.С. Деденок, І.Г. Лисаченко, О.М. Роянов, Б.О. Чумак, О.М. Богдановський // Збірник наук. праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ, 2005. – Вип. 3. – С. 200-207.
6. Лисаченко І.Г., Роянов О.М., Чумак Б.О. Метод оцінки динамічної похибки вимірювань параметрів руху космічного апарату з визначенням її достовірності // Збірник наукових праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ, 2005. – Вип. 2. – С. 86-91.

Надійшла до редакції 18.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Сухаревський, Об'єднаний науково-дослідний інститут Збройних Сил, Харків.