

УДК 623.462.22:621.371.332.4

І.А. Нос, О.І. Солонець, Б.О. Чумак

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТРАЄКТОРНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЗА РАХУНОК ІНФОРМАЦІЇ З КОСМІЧНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

В статті запропоновані структура застосування засобів полігонного вимірювально-обчислювального комплексу та космічної навігаційної системи, а також алгоритми обробки вимірювальної інформації з метою підвищення точності траєкторних вимірювань полігонного вимірювально-обчислювального комплексу. Проаналізовані похибки космічних навігаційних систем, що виникають за рахунок погрешностей координатно-часового забезпечення наземної апаратури.

**Ключові слова:** полігонний вимірювально-обчислювальний комплекс, космічна навігаційна система, траєкторні вимірювання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Розвиток Збройних Сил України неможливий без проведення тактичних навчань військ з бойовою стрільбою та полігонних випробувань зразків озброєння та військової техніки. Дана обставина вимагає наявності розвинутої системи сучасних полігонів, спроможних вирішувати увесь комплекс задач бойової підготовки військ (сил), забезпечувати виконання програм і методик випробувань озброєння та військової техніки, гарантувати безпеку військової діяльності. У теперішній час характеристики полігонного вимірювально-обчислювального комплексу (ПВОК) значною мірою відстають від тих вимог, що висувуються до них [1, 2].

Особливо це стосується такої характеристики як точність вимірювань параметрів траєкторії літальних апаратів (ЛА). У цьому сенсі одним із шляхів підвищення точності вимірювань є застосування космічних навігаційних систем (КНС) [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У відомих джерелах [4–7] при оцінці точності КНС не враховуються похибки, що вносяться за рахунок координатно-часового забезпечення наземних систем.

**Метою статті** є аналіз похибок КНС за рахунок координатно-часового забезпечення наземної апаратури.

### Виклад основного матеріалу

Можливі два варіанти організації процесу вимірювань параметрів траєкторії [4]. Перш за все, можна здійснити вимірювання сумарної псевдодальності по радіолінії „навігаційний апарат – ретранслятор – наземна система”. При цьому необхідно додатково оцінювати зсув шкали часу наземної апаратури (НА) відносно шкали єдиного часу сукупності навігаційних космічних апаратів (НКА). При вимірюванні сумарної псевдошвидкості в даній радіолінії необхідно оцінювати невідомий зсув частот наземного генератора та генераторів НКА.

Другий варіант організації процесу вимірювань полягає у застосуванні різницево-швидкісних та різницево-далекомірних вимірювань. У цьому випадку часовий та частотний зсуви виключаються.

В обох варіантах вимірювання здійснюються за сигналами мінімум 4-х НКА. Основою вимірювальних каналів НА при цьому є далекомірні-швидкісні вимірники. Принцип використання НКА для контролю траєкторії ЛА наведений на рис. 1. При цьому початок координат топоцентричної системи суміщено з фазовим центром наземної антени.

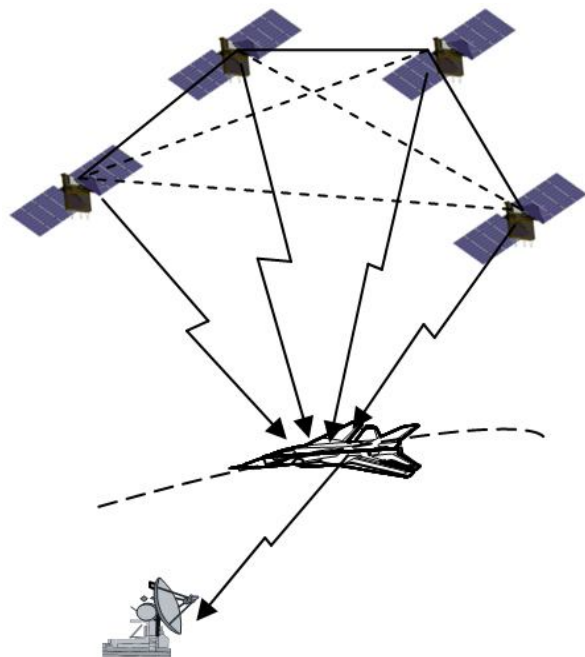


Рис. 1. Застосування НКА для контролю траєкторій

Обробка вимірювань параметрів руху може здійснюватися з використанням різних алгоритмів. Найпростішим є алгоритм оцінки вектору стану ЛА  $\bar{\lambda}_k$  за вибіркою вимірювань мінімального обсягу. Оцінка траєкторії здійснюється на основі вимірювань, отриманих на відповідний момент часу.

Для моделі сумарно-далекомірних вимірів структура засобів для контролю траєкторій ЛА наведена на рис. 2.

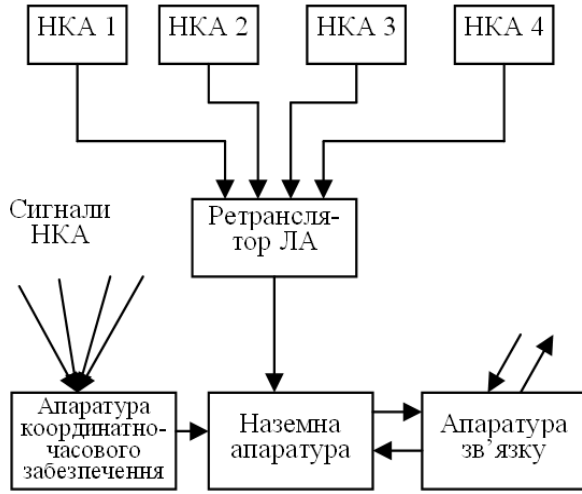


Рис. 2. Структура засобів для контролю траєкторій ЛА

Нехай вибрані чотири НКА. При цьому можливі визначення наступних навігаційних функцій:

$$R_{1k} = D_{1k} + D_k + c\Delta T_k; \quad (1)$$

$$R_{2k} = \dot{D}_{1k} + \dot{D}_k + c \frac{\Delta f}{f_0}; \quad (2)$$

$$R_{8k} = \dot{D}_{4k} + \dot{D}_k + c \frac{\Delta f}{f_0}, \quad (3)$$

де

$$D_{jk} = \sqrt{(x_{sjk} - x_k)^2 + (y_{sjk} - y_k)^2 + (z_{sjk} - z_k)^2};$$

$$j = 1, 2, 3, 4;$$

$$D_k = \sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 + (z_k - z_0)^2};$$

$$\dot{D}_{jk} = \frac{1}{D_{jk}} \left[ (x_{sjk} - x_k)(V_{xsjk} - V_{xk}) + (y_{sjk} - y_k)(V_{ysjk} - V_{yk}) + (z_{sjk} - z_k)(V_{zsjk} - V_{zk}) \right];$$

$$\dot{D}_k = \frac{1}{D_k} \left[ (x_k - x_0)V_{xk} + (y_k - y_0)V_{yk} + (z_k - z_0)V_{zk} \right];$$

$x_{sjk}, y_{sjk}, z_{sjk}$  – координати j-го НКА на момент  $t_k$ ;  
 $V_{xsjk}, V_{ysjk}, V_{zsjk}$  – компоненти швидкості j-го НКА на момент  $t_k$ ;  
 $x_k, y_k, z_k, V_k, V_k, V_k$  – відповідні компоненти ретранслятора.

Передбачається, що погрішностями синхронізації шкал часу та частот генераторів НКА можна знехтувати.

Вектор спостережуваних функцій у першому наближенні можна подати у вигляді:

$$\bar{y}_k = \bar{R}_k + \bar{p}_k. \quad (4)$$

Похибки спостережень залежать від погрішностей траєкторних вимірів, погрішностей геодезичного прив'язування фазового центру наземної антени, погрішностей знання ефемерид НКА, а також погрішностей прив'язування вимірів до шкали часу:

$$\bar{p}_{k\Sigma} = \bar{p}_{kTp} + \bar{p}_{k\Delta Q} + \bar{p}_{k\Delta\lambda} + \bar{p}_{k\Delta t}, \quad (5)$$

де

$$\bar{p}_{k\Delta Q} = \underline{D}_k \cdot \Delta \bar{Q};$$

$$\bar{p}_{k\Delta\lambda} = \underline{F}_k \cdot \Delta \bar{\lambda}_{sk};$$

$$\bar{p}_{k\Delta t} = \underline{E}_k \cdot \Delta \bar{t}_k;$$

$\Delta \bar{\lambda}_{sk}$  – вектор ефемерид НКА.

Систематична погрішність спостереження дорівнює:

$$\delta \bar{p}_{k\Sigma} = \delta_{\bar{p}_{kTp}} + \underline{D}_k \delta_{\Delta \bar{Q}} + \underline{F}_k \delta_{\Delta \bar{\lambda}_{sk}} + \underline{E}_k \delta_{\Delta \bar{t}_k}. \quad (6)$$

Ця погрішність має бути врахована при обробці вимірювальної інформації. Випадкові погрішності характеризуються матрицею дисперсій та коваріацій:

$$\underline{N}_{k\Sigma} = \underline{N}_{kTp} + \underline{D}_k \underline{\Sigma}_{\Delta \bar{Q}} \underline{D}_k^T + \underline{F}_k \underline{\Sigma}_{\Delta \bar{\lambda}_{sk}} \underline{F}_k^T + \underline{E}_k \underline{\Sigma}_{\Delta \bar{t}_k} \underline{E}_k^T, \quad (7)$$

де  $\underline{\Sigma}_{\Delta \bar{Q}}, \underline{\Sigma}_{\Delta \bar{\lambda}_{sk}}, \underline{\Sigma}_{\Delta \bar{t}_k}$  – матриці дисперсій та коваріацій випадкових погрішностей координатного, ефемеридного та часового забезпечення відповідно.

При обробці вимірів за вибіркою мінімального обсягу оцінка вектору стану ЛА знаходиться методом послідовних наближень [8]:

$$\bar{\lambda}_{k(\alpha+1)} = \bar{\lambda}_{k(\alpha)} + \underline{C}_{k(\alpha)}^{-1} \left[ \bar{y}_k - \bar{R}_{k(\alpha)} \left( \bar{\lambda}_{k(\alpha)}, \bar{Q} \right) - \bar{\delta}_{nk\Sigma} \right], \quad (8)$$

де  $\alpha$  – номер ітераційного циклу.

Точність оцінки вектору стану визначається з виразу:

$$\underline{\Sigma}_{\bar{\lambda}_k} = \underline{C}_k \underline{N}_k \underline{C}_k^{-1T} = \left[ \underline{C}_k^T \underline{N}_k^{-1} \underline{C}_k \right]^{-1}. \quad (9)$$

Матриця  $\underline{C}$  характеризує чутливість вимірюваних параметрів руху до визначуваних компонентів вектору стану.

При використанні попередніх вимірів та алгоритму фільтра Калмана оцінка вектору стану  $\bar{\lambda}_k$  визначається з виразу [9]:

$$\bar{\lambda}_k = \bar{\lambda}_k + \underline{H}_k \left[ \bar{y}_k - \bar{R}_k \left( \bar{\lambda}_k, \bar{Q} \right) - \bar{\delta}_{nk\Sigma} \right], \quad (10)$$

де  $\bar{\lambda}_k$  – прогнозна оцінка на момент  $t_k$ , причому:

$$\bar{\lambda}_k = \Phi_{k,k-1} \cdot \bar{\lambda}_{k-1}, \quad (11)$$

де  $\Phi_{k,k-1}$  – перехідна матриця;  $H_k$  – матриця посилення фільтра Калмана, яка визначається з виразу:

$$H_k = \hat{\Sigma}_k C_k^T N_k^{-1}, \quad (12)$$

де  $\hat{\Sigma}_k$  – матриця дисперсій та коваріацій результативних похибок фільтрації:

$$\hat{\Sigma}_k = \left\{ \Phi_{k,k-1} \hat{\Sigma}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + Q_k \Delta t \right\}^{-1} + C_k^T N_k^{-1} C_k. \quad (13)$$

Попередні розрахунки показують, що точність оцінок вектору стану об'єкту при застосуванні вимірювань за допомогою КНС підвищується на 7 – 12 %.

## Висновки

Таким чином, в статті проаналізовані похибки КНС, що виникають за рахунок погрешностей координатно-часового забезпечення наземної апаратури. Ці похибки характеризуються сумарною матрицею дисперсій та коваріацій (7) та мають бути враховані при обробці вимірювальної інформації в ході оцінки вектору стану об'єкта навігації.

## Список літератури

1. Бархударян М.В. Принципи побудови та структура перспективного полігонного вимірювально-обчислювального комплексу як елемента системи випробувань озброєння та військової техніки / М.В. Бархударян, К.К. Кулагін, Б.О. Чумак // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2008. – Вип. 2 (6). – С. 55-59.

2. Кулагін К.К. Сучасний стан системи полігонних випробувань, проблемні питання та шляхи їх вирішення / К.К. Кулагін // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2009. – Вип. 3 (11). – С. 177-183.

3. Солонець О.І. Напрямки застосування інформації космічних та спеціальних засобів при проведенні полігонних випробувань / О.І. Солонець, Б.О. Чумак, К.К. Кулагін // Новітні технології – для захисту повітряного простору: тез. доп. П'ятої наук. конф. ХУПС 15 – 16 квітня 2009 р. – Харків, 2009. – С. 199.

4. Можливості використання апаратури супутникової навігації для балістико-навігаційного забезпечення космічних апаратів / С.В. Козелков, В.М. Тупкало, В.І. Богомья, О.А. Моргунов, С.Д. Ставицький // Труды академії. – К.: НАОУ, 2006. – № 69. – С. 144-148.

5. Беляевский Л.С. Обработка и отображение радионавигационной информации / Л.С. Беляевский, В.С. Новиков, П.В. Олянюк. – М.: Радио и связь, 1990. – 232 с.

6. Ярлыков М.С. Статистическая теория радионавигации / М.С. Ярлыков. – М.: Радио и связь, 1985. – 344 с.

7. Хомяков Э.Н. Полигонные измерительные комплексы / Э.Н. Хомяков. – МО СССР, 1992. – 426 с.

8. Чумак Б.О. Математична модель оптимальної обробки вимірювальної інформації при управлінні космічними апаратами по програмній траєкторії / Б.О. Чумак, І.Г. Лисаченко, О.М. Роянов // Моделювання та інформаційні технології. – К.: ППМЕ, 2005. – Вип. 32. – С. 131-136.

9. Чумак Б.О. Математична модель обробки вимірювальної інформації засобами полігонного вимірювально-обчислювального комплексу / Б.О. Чумак, О.М. Мішуков, К.К. Кулагін // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2010. – Вип. 3(23). – С. 19-21.

Надійшла до редколегії 19.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗА СЧЕТ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

И.А. Нос, А.И. Солонец, Б.А. Чумак

В статье предложены структура применения средств полигонного измерительно-вычислительного комплекса и космической навигационной системы, а также алгоритмы обработки измерительной информации с целью повышения точности траекторных измерений полигонного измерительно-вычислительного комплекса. Проанализированы погрешности космических навигационных систем, которые возникают за счет погрешностей координатно-временного обеспечения наземной аппаратуры.

**Ключевые слова:** полигонный измерительно-вычислительный комплекс, космическая навигационная система, траекторные измерения.

## INCREASE OF THE TRAJECTORY MEASUREMENTS EXACTNESS DUE TO APPLICATION OF SPACE NAVIGATIONALS

I.A. Nos, A.I. Solonets, B.A. Chumak

In the article structure of application of ground instrumentation-calculable complex facilities and space navigational offered, and also algorithms of treatment of measuring information with the purpose of increase of the trajectory measurements exactness of ground instrumentation-calculable complex. The errors of space navigational which arise up due to the errors of the XY-temporal providing of surface apparatus are analyzed.

**Keywords:** ground instrumentation-calculable complex, space navigational, trajectory measurings.