

УДК 621.39

М.Ф. Пічугін<sup>1</sup>, Д.В. Карлов<sup>1</sup>, О.О. Клімішен<sup>1</sup>, О.Ю. Чернявський<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

<sup>2</sup> Національний технічний університет «ХПІ», Харків

## БАЛІСТИКО-НАВІГАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УПРАВЛІННЯ ПЕРСПЕКТИВНИМИ ВІТЧИЗНЯНИМИ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ

*Розглянуто результати досліджень з удосконалення балістико-навігаційного забезпечення при однопунктній технології управління космічними апаратами та розкриті основні причини, умови та напрямки удосконалення рішення основних задач балістико-навігаційного забезпечення управління вітчизняними космічними апаратами.*

**Ключові слова:** балістико-навігаційне забезпечення, космічні апарати, координатні методи управління, прогнозування руху, пошуковий метод.

### Вступ

**Загальна постановка проблеми і аналіз літератури.** На сучасному етапі застосування та експлуатації космічних систем спостерігається чітка тенденція постійного зростання вимог з точності та оперативності балістико-навігаційного забезпечення (БНЗ) управління польотом космічних апаратів (КА) [1]. При цьому саме показники точності та оперативності балістико-навігаційного забезпечення суттєво впливають на ефективність функціонування та кінцеві результати роботи всієї космічної системи. Особливо такий вплив значний в умовах однопунктної технології управління КА, яка реалізована в Україні, виходячи з об'єктивних особливостей територіальних обмежень на розташування наземного сегменту космічної системи [1 – 3].

Тому актуальним є питання розробки та удосконалення балістико-навігаційного забезпечення управління перспективних вітчизняних КА.

Одним з напрямків удосконалення балістико-навігаційного забезпечення є реалізація координатних методів управління КА.

Основними задачами балістико-навігаційного забезпечення управління КА є визначення за вимрювальною інформацією параметрів його руху та прогнозування його положення на заданий момент часу.

Характеристики оперативності і точності рішення саме цих задач визначають оперативність і точність всього балістико-навігаційного забезпечення управління КА. Причина необхідності, умова та напрямки рішення основних задач балістико-навігаційного забезпечення наведено на рис. 1.



Рис. 1. Напрямки вирішення задач БНЗ управління КА

Виходячи з аналізу структури, наведеної на рис. 1, можна зазначити, що підвищення ефективності балістико-навігаційного забезпечення управління

КА за такими показниками, як оперативність та точність, забезпечується шляхом розв'язку двох підзадач:

1. Підвищення точності (зменшення похибки) визначення параметрів руху КА.

2. Підвищення оперативності (зменшення обчислювальної складності) прогнозування руху КА.

Таким чином, **метою** статті є визначення підходів з підвищення точності обчислення параметрів руху КА та оперативності їх прогнозування на задані моменти часу при розв'язанні задач балістико-навігаційного забезпечення управління перспективними вітчизняними КА.

### Розв'язання задачі підвищення точності визначення параметрів руху КА

Узагальнену структурну схему, що розкриває вплив трьох основних факторів на результуючу похибку визначення початкових умов руху КА, подано на рис. 2.

Аналіз схеми, поданої на рис. 2 показує, що перші два фактори є суперечливими, а третій є обмеженням. Так, для отримання найменшої похибки визначення параметрів руху КА необхідно обробляти

оптимальну кількість вимірювальної інформації, яка забезпечує достатнє компенсування випадкових похибок та, одночасно, не дає суттєво вплинути динамічній похибці. Але при цьому слід враховувати, що для визначення параметрів руху КА кількість вимірювальної інформації не може бути меншою за необхідну для забезпечення збіжності алгоритму визначення цих параметрів руху.

У ході досліджень авторами розроблено спосіб визначення оптимальної кількості мірних витків для оцінювання параметрів руху КА за критерієм мінімуму похибки оцінки, обумовленої випадковою і динамічною складовими. В основу такого способу покладено подання вихідної задачі як багатокритеріальної та її розв'язок з використанням нелінійної схеми компромісів.

У сформованій багатокритеріальній задачі в якості суперечливих функцій якості обрані саме залежності динамічної та випадкової похибок від об'єму вимірювальної траєкторної інформації, що виражений у кількості мірних витків.

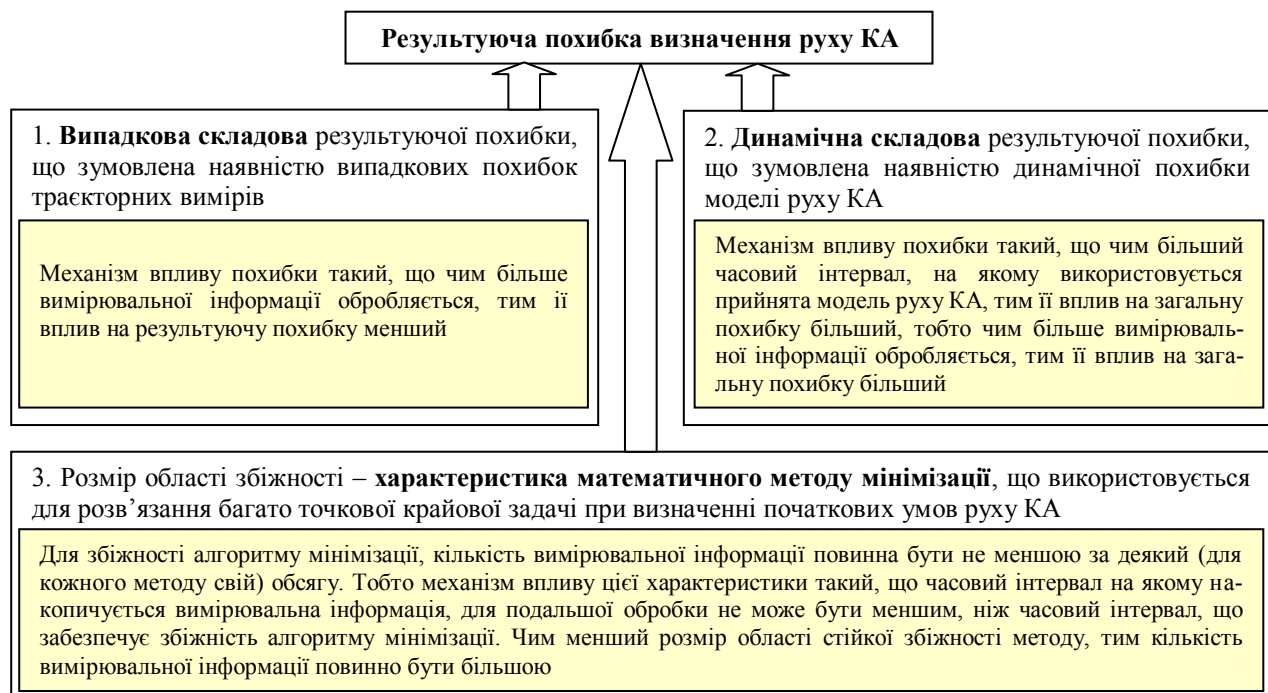


Рис. 2. Фактори впливу на точність визначення параметрів руху КА

В основі розробленого способу визначення оптимальної кількості мірних витків лежить апріорна оцінка точності визначення параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів. При цьому задача апріорного оцінювання вирішується так само, як і крайова задача. Відмінність полягає у відсутності реальної вимірювальної інформації. Траєкторні виміри моделюються з урахуванням наявних даних про фактичну точність роботи вимірювальних засобів і просторово-часові похибки моделі руху КА, обумовлені поточними діями збурюючих чинників. Остання інформація може бути одержана з аналізу

поправок до опорних параметрів руху КА на попередньому циклі отримання їх оцінки, а також з аналізу відхилення розрахункового часу знаходження КА в точці траверсу (на параметрі) від значення, визначеного за результатами останнього сеансу зв'язку з супутником.

Аналіз балістичних даних з управління КА "Січ-1" та "АУОС-СМ-КФ" показав, що оптимальна кількість мірних витків у залежності від ступеня поточної сонячної активності становить від 3 (в період підвищеної сонячної активності) до 6 (при нормальній сонячній активності).

У вітчизняній практиці балістико-навігаційного забезпечення при визначенні параметрів руху КА використовуються градієнтні методи мінімізації, які характеризуються невеликою областю збіжності і потребують накопичення вимірювальної інформації на 5-6 мірних витках. Отже, традиційно, при визначенні параметрів руху КА кількість необхідної вимірювальної інформації обумовлюється не вимогами результуючої точності визначення параметрів руху КА, а кількістю вимірів для забезпечення збіжності алгоритму визначення цих початкових умов, тобто характеристикою математичного підходу, що використовується.

Досліджені можливості проведення визначення параметрів руху КА по 3-4 мірним виткам за допомогою градієнтних методів мінімізації, що реалізовані у штатних вітчизняних програмних комплексах БНЗ управління КА.

Встановлено, що градієнтні методи визначення параметрів руху КА за рахунок реалізації локального підходу до мінімізації цільової функції не забезпечують збіжності розв'язку поставленої задачі, тобто є недієздатними при такій кількості вимірювальної інформації.

Пропонується при визначенні параметрів руху КА замість градієнтних методів використовувати пошуковий метод мінімізації з побудовою області початкових наближень [2, 3]. Цей метод визначення параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів реалізує нелокальний підхід до мінімізації цільової функції, що обумовлює йому значно ширшу область збіжності у порівнянні зі штатним алгоритмом, і це дозволяє забезпечити збіжність ітераційного процесу оцінювання параметрів руху КА при скороченому об'ємі траєкторних вимірів. Тобто впровадження у вітчизняну практику балістико-навігаційного забезпечення управління КА пошукового методу оптимізації з побудовою області початкових наближень забезпечить підвищення точності визначення початкових умов руху КА, що необхідно для перспективних вітчизняних космічних систем.

Розроблений алгоритм визначення параметрів руху КА на основі пошукового методу мінімізації включає наступні етапи:

1. Побудова області початкових наближень.

Для застосування методу оптимізації Нелдера-Міда необхідно  $w = 7$  значень вектора початкових наближень (на одиницю більше числа оцінюваних параметрів). Для формування області початкових наближень пропонується два підходи: перший - область початкових наближень формується відповідно до граничних значень похибок виведення КА на орбіту (при первинному визначенні параметрів руху після запуску); другий - область формується відповідно до максимального відхилення розрахункового

часу знаходження КА в точці траверсу від моменту часу, визначеного за результатами сеансу зв'язку з КА.

Таким чином, область початкових наближень має вигляд:

$$\bar{Q}_i^{(k)} = \left\{ \bar{q}_i^{(k)}, \dots, \bar{q}_i^{(k)} \right\},$$

$$\text{де } \bar{q}_i^{(k)} = \left\{ \bar{x}_i^{(k)}, \bar{y}_i^{(k)}, \bar{z}_i^{(k)}, \bar{v}_{x_i}^{(k)}, \bar{v}_{y_i}^{(k)}, \bar{v}_{z_i}^{(k)} \right\}$$

$w = \overline{1,7}$  – індекс відповідної вершини області початкових наближень;

$k$  – номер ітерації.

2. Обчислення мінімізованої функції відповідно до методу найменших квадратів для всіх вершин області початкових наближень

$$F_w^{(k)}(\bar{q}_i^{(k)}) = \sum_{i=1}^n \left( d_i - \tilde{d}_i(\bar{q}_i^{(k)}) \right)^2, \quad w = \overline{1,7} \quad (1)$$

де  $\tilde{d}_i(\bar{q}_i^{(k)})$  – розрахункові значення вимірюваного параметра.

3. Визначення  $\bar{q}_{\min}^{(k)}$  та  $\bar{q}_{\max}^{(k)}$  – вершин області початкових наближень, в яких функція (1) приймає відповідно найменше і найбільше значення.

4. Визначення центру тяжіння всіх вершин, включаючи  $\bar{q}_{\max}^{(k)}$

$$\bar{q}_{cj}^{(k)} = \frac{1}{6} \left[ \sum_{w=1, i \neq h}^7 \bar{q}_i^{(k)} \right], \quad j = \overline{1,6},$$

де  $j$  – індекс, що означає координатний напрямок;

$h$  - номер вершини  $\bar{q}_{\max}^{(k)}$ .

5. Обчислення значення критерію закінчення пошуку

$$\left\{ \frac{1}{7} \sum_{w=1}^7 \left[ F_w(\bar{q}_i^{(k)}) - F(\bar{q}_c^{(k)}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \leq \epsilon, \quad (2)$$

де  $\epsilon$  – порогове значення критерію закінчення пошуку;

$F(\bar{q}_c^{(k)})$  – значення цільової функції в центрі тяжіння.

Від величини  $\epsilon$  залежить кількість ітерацій  $k$  при пошуку мінімуму цільової функції, а також точність знаходження даного мінімуму. При виборі значення величини  $\epsilon$  необхідно враховувати, що через неминучу наявність систематичних і випадкових похибок нульове значення мінімізованої функції не може бути досягнуто, отже недоцільно задавати дуже мале значення  $\epsilon$ .

Результати досліджень показали, що кращим з

погляду обчислювальних витрат і точності одержуваного рішення є значення  $\varepsilon = 10^{-7}$ .

6. Якщо умова закінчення пошуку (2) не виконується, то відповідно до методу Нелдера-Міда здійснюється перетворення області початкових наближень  $\tilde{Q}_{i\delta}^{(k)}$  із застосуванням однієї з операцій: віддзеркалення, розтягнення, стиснення і редукції. Потім робота алгоритму повторюється з пунктом 2, при цьому  $k = k + 1$ .

В результаті роботи алгоритму мінімізації область початкових наближень стискається, наближаючись до точки з мінімальним значенням функції (5). Тобто в результаті мінімізації отримуємо

$$\tilde{q}_{i\delta L} = \arg \min_{\tilde{q}_{i\delta} \in \tilde{Q}_{i\delta}} \sum_{i=1}^n \left[ d_i - \tilde{d}_i(\tilde{q}_{i\delta}) \right]^2,$$

де  $\tilde{q}_{i\delta L} = \tilde{q}$  – результат уточнення параметрів руху КА на момент часу  $t_0$ .

Проведено експериментальне дослідження розробленого алгоритму оцінювання параметрів руху КА з використанням пошукового методу оптимізації Нелдера-Міда. На рис. 3 приведена візуалізація процесу оцінювання параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів при різних відхиленнях початкових наближень від шуканого результату з використанням штатного і розробленого алгоритмів.

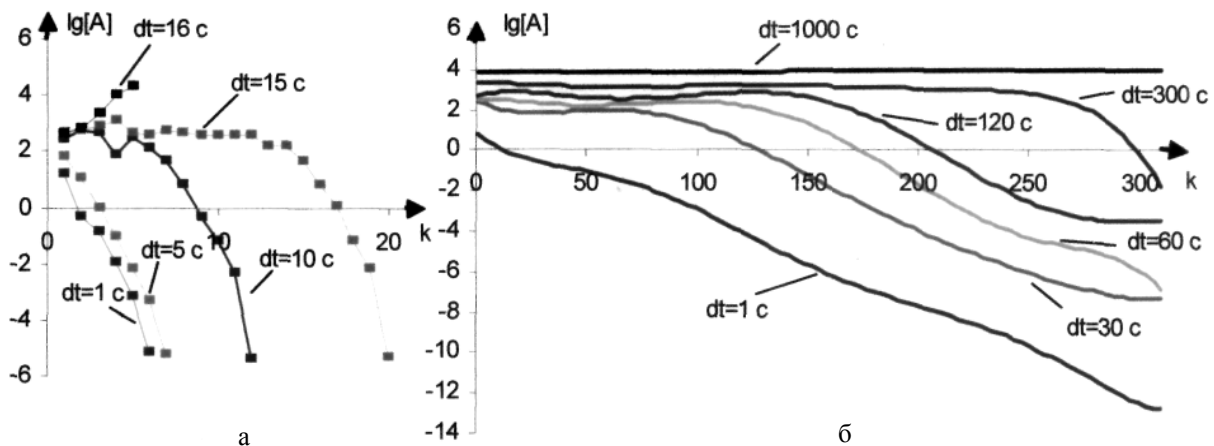


Рис. 3. Приведена візуалізація процесу оцінювання параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів:  
а – на основі методу Ньютона;  
б – на основі методу Нелдера-Міда

На рис. 3 використані позначення:  $k$  – кількість ітерацій процесу мінімізації цільової функції;  $dt$  – часове відхилення вектора початкових наближень від результату уточнення, яке характеризує розміри області збіжності;  $\dot{\Lambda} = \left| \tilde{q}^* - \tilde{q} \right|$ . З аналізу отриманих результатів видно, що штатний алгоритм має значно більшу швидкість збіжності, проте розроблений алгоритм має істотно ширшу область збіжності, що дозволяє успішно вирішувати задачі визначення початкових умов руху КА при значних відхиленнях розрахункових параметрів орбіти від реальних, що підтверджує теоретичні положення.

### Розв'язання задачі підвищення оперативності прогнозування руху КА

У штатних вітчизняних програмних комплексах БНЗ управління КА рішення задачі прогнозування руху КА проводиться шляхом інтегрування диференційного рівняння збуреного руху КА. Для цього ви-

користуються числові метода інтегрування диференційних рівнянь руху КА - метод Адамса 7-го порядку та метод Рунге-Кутта 4-го порядку. Ці традиційні числові метода інтегрування диференційних рівнянь мають підвищену обчислювальну складність, а спроби її зменшення призводять до суттєвих втрат у точності розрахунків [2, 3].

Слід окремо зазначити, що особливо актуальним є питання зменшення обчислювальних витрат на прогнозування руху КА при впровадженні перспективних координатних методів управління, коли всі обчислення або їх значну частину необхідно проводити на борту КА, що накладає обмеження на характеристики обчислювальних засобів, за допомогою яких проводяться розрахунки.

Розв'язати протиріччя "точність-обчислювальна складність" можливо шляхом використання математичного апарату диференціальних перетворень. Застосування формалізованого операційного методу диференціальних перетворень дає змогу розробити алгоритм прогнозування руху КА, з меншими в 3-4 рази, у порівнянні з штатни-

ми алгоритмами обчислювальними витратами при забезпеченні заданої точності за рахунок точного рекурентного визначення відрізка ряду Тейлора розв'язку диференційного рівняння руху КА. Такий підхід дозволить суттєво знизити вимоги до необхідної швидкодії бортового обчислювального засобу при проведенні прогнозування руху КА.

### Висновки

Для забезпечення необхідної точності (зменшення похибки) визначення параметрів (початкових умов) руху КА слід оптимізувати необхідну кількість мірних витків, що при підвищеній сонячній активності призводить до їх зменшення та вимагає розробки нового алгоритму для визначення параметрів руху КА, зі значно ширшою областю збіжності, ніж штатний алгоритм.

Такий алгоритм, можна розробити на основі пошукового методу оптимізації з побудовою області початкових наближень.

Суттєве розширення області збіжності алгоритму визначення параметрів руху КА за результатами зовнішньотраєкторних вимірювань є додатковою перевагою запропонованих підходів при первинному визначенні початкових умов руху перспективних вітчизняних супутників після їх виведення на орбіту.

При впровадженні перспективних координатних методів управління КА для підвищення оперативності (зменшення обчислювальної складності) прогнозування руху КА необхідно суттєво змен-

шення обчислювальних витрат на прогнозування його руху. Таке зменшення можна досягти використовуючи математичний апарат диференціальних перетворень.

Одним з можливих варіантів впровадження в практику балістико-навігаційного забезпечення управління КА нових наукових підходів визначення початкових умов руху КА та прогнозування руху КА для України є розробка програмного комплексу балістико-навігаційного забезпечення управління вітчизняних супутників з використанням запропонованих способів.

### Список літератури

1. Застосування космічних систем для забезпечення дії збройних сил: навчальний посібник / За ред. В.І. Ткаченка. – Х.: ХВУ, 2001. – 192 с.
2. Андреев В.П. Програмне та математичне забезпечення обчислювальних засобів АСУ / В.П. Андреев. – ЖВІРЕ, МО України, 1998. – 164 с.
3. Загорюлько А.Н. Особенности программных способов управления космическими аппаратами при однопунктной технологии / А.Н. Загорюлько // Моделирование та інформаційні технології: Збірник наукових праць. – Х.: НАНУ, Інститут проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова, 2005. – Вип. 32. – С.80-87

Надійшла до редколегії 1.02.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫМИ ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

М.Ф. Пичугин, Д.В. Карлов, А.О. Климишен, О.Ю. Чернявський

*Рассматриваются результаты исследований по усовершенствованию баллистико-навигационного обеспечения при однопунктной технологии управления космическими аппаратами и указаны основные причины, условия и направления усовершенствования решения основных задач баллистико-навигационного обеспечения управления отечественными космическими аппаратами.*

**Ключевые слова:** баллистико-навигационное обеспечение, космические аппараты, координатные методы управления, прогнозирование движения, поисковый метод.

### BALLISTIC AND NAVIGATION PROVIDING OF MANAGEMENT PERSPECTIVE DOMESTIC SPACE VEHICLES

M.F. Pichugin, D.V. Karlov, O.O. Klimishen, O.Yu. Chernjavsky

*The results of researches are examined on the improvement of the ballistic and navigation providing at "one point" technologists of management space vehicles and principal reasons, terms and directions of improvement of decisions of basic tasks of the ballistic and navigation providing of management domestic space vehicles, are indicated.*

**Keywords:** ballistic and navigation providing, space vehicles, co-ordinate methods of management, prognostication of motion, searching method.