

А.А. Завада, к.т.н.
С.В. Ковбасюк, к.т.н., с.н.с.
М.Ю. Ракушев, к.т.н., с.н.с.

*Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Національного авіаційного університету*

ПІДХОДИ ДО ВДОСКОНАЛЕННЯ БАЛІСТИКО-НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УПРАВЛІННЯ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ

Запропоновано підходи щодо вдосконалення розв'язання основних задач балістико-навігаційного забезпечення управління космічними апаратами в умовах однопунктної технології управління без використання інформації від супутникових навігаційних систем, а саме: підвищення точності визначення параметрів руху космічних апаратів за результатами траєкторних вимірів та зниження обчислювальної складності прогнозування руху космічних апаратів.

Вступ. На сучасному етапі застосування та експлуатації космічних систем спостерігається чітка тенденція постійного зростання вимог з точності та оперативності на всіх етапах застосування космічних засобів. Ця тенденція безпосередньо розповсюджується і на вимоги щодо якості балістико-навігаційного забезпечення (БНЗ) управління космічними апаратами (КА). При цьому, саме показники точності та оперативності БНЗ суттєво впливають на ефективність функціонування та кінцеві результати роботи всієї космічної системи [1]. Особливо, такий вплив значний в умовах однопунктної технології управління КА, що реалізована в Україні, виходячи з об'єктивних особливостей територіальних обмежень на розташування наземного сегменту космічної системи. Слід зазначити, що на показники точності БНЗ один з найбільших впливів створюють похибки моделі руху КА, що обумовлені похибками моделі атмосфери, останні, в свою чергу, суттєво зростають в умовах підвищеної сонячної активності. Враховуючи те, що 2011–2013 роки є саме роками підвищеної сонячної активності, питання якісного БНЗ управління перспективними вітчизняними КА ще більш загострюється.

Аналіз останніх досліджень. Одним із перспективних напрямків удосконалення БНЗ управління КА є реалізація координатних методів їх управління, прикладом є європейський КА оптико-електронного спостереження земної поверхні «ПРОБА» [2]. Безпосередня реалізація зазначеного методу управління вимагає розв'язання двох підзадач: високоточного визначення поточного положення КА на його борту та реалізацію відповідних (відносно великих за обчислювальною складністю) алгоритмів на бортовому обчислювальному засобі КА (що не має надто великих обчислювальних потужностей) [1, 2]. Так, у перспективних вітчизняних КА, вирішити питання високоточного визначення поточного положення КА пропонується шляхом використання інформації від супутникових навігаційних систем – GPS «Navstar» та «ГЛОНАС» [3]. Однак, незважаючи на те, що такий шлях за своєю точністю не має на даний час альтернатив, він характеризується суттєвим недоліком – повною залежністю від наявності вільного доступу до навігаційної інформації іноземних супутникових навігаційних систем.

Формулювання цілей статті. Можливим варіантом визначення поточного положення КА на його борту, який не залежить від роботи іноземних супутникових навігаційних систем, є організація навігації на основі геофізичних полів [3] та навігація на основі оптичних траєкторних вимірів (використання знімків земної поверхні або знімків зоряного неба) [4]. Однак практична реалізація зазначених варіантів пов'язана із необхідністю розв'язання цілої низки завдань і одна з них – практична реалізація високоточного визначення параметрів руху КА за вимірювальною інформацією отриманою від вітчизняних наземних засобів та подальше прогнозування руху КА на борту. Однак зараз реалізувати зазначений підхід неможливо, через недосконалість рішення основних задач БНЗ – низьку точність визначення параметрів руху КА та високу обчислювальну складність прогнозування руху КА [3].

Метою статті, виходячи з викладеного вище є розробка підходів до вдосконалення рішення основних задач БНЗ управління КА – підвищення точності визначення параметрів руху КА за вимірювальною інформацією та зниження обчислювальної складності прогнозування руху КА.

Виклад основного матеріалу. Основними завданнями БНЗ управління КА є визначення за вимірювальною інформацією параметрів його руху та прогнозування положення КА на заданий момент часу [1]. Причина (що вимагає), умова (що ускладнює) та напрямки вдосконалення рішення зазначених задач БНЗ для реалізації перспективних координатних методів управління КА, без використання інформації від супутникових навігаційних систем наведено на рисунку 1.



Рис. 1. Напрямки вдосконалення рішення основних задач БНЗ управління КА для реалізації координатних методів управління КА, без застосування супутникових навігаційних систем

Виходячи з аналізу структури, наведеної на рисунку 1, можна зазначити, що для реалізації координатних методів управління на вітчизняних КА, без використання іноземних супутникових навігаційних систем, необхідно:

- підвищити точність визначення параметрів руху КА;
- зменшити обчислювальну складність прогнозування руху КА.

Кожна із зазначених задач має свої певні особливості і тому доцільно подальший розгляд провести для кожної із них окремо.

Перша задача – підвищення точності визначення параметрів руху КА за вимірювальною інформацією від наземних вимірювальних засобів.

У загальному вигляді задача визначення параметрів (початкових умов) руху КА – X_0 , за вимірювальною інформацією формулюється у наступний спосіб [5]:

- за проведеними, у визначені моменти часу – T , наземними вимірювальними засобами зовнішньотраєкторними вимірюваннями орбітального руху КА – Y (можливі вимірювання: похилої дальності, радіальної швидкості, кутових координат тощо);

- за прийнятою моделлю похибок вимірювання (як правило приймається, що виміри є незалежними і мають адитивні нормально розподілені похибки вимірювань з відомими статистичними характеристиками);

- за заданою моделлю руху КА – $X = X(T, X_0)$ (на практиці найчастіше використовується динамічна модель руху КА – диференціальне рівняння руху КА у деякій системі координат, в якій враховані основні збурення, що впливають на рух КА), яка дозволяє зв'язати положення КА на моменти часу T з шуканими параметрами руху КА X_0 ;

- за відомою моделлю вимірювання – $Z = Z(X)$ (це відповідні перерахунки між системами координат, від тієї системи, в якій задана модель руху КА до тієї, в якій представлені траєкторні вимірювання);

- на основі визначеного критерію оптимальності – Λ (на практиці найчастіше використовується метод найменших квадратів чи метод максимальної правдоподібності), записується багаточотокова крайова задача – $\Lambda[Y, Z(X(T, X_0))]$, рішення якої знаходиться у вигляді:

$$\hat{X}_0 = \arg \text{opt } \Lambda[Y, Z(X(T, X_0))], \tag{1}$$

де \hat{X}_0 – оцінка шуканих параметрів (початкових умов) руху КА.

Розв'язати (1) можливо одним з методів безумовної оптимізації, застосування якого зводиться до розробки відповідного алгоритму оптимізації (як правило, $\Delta[Y, Z(X(T, X_0))]$) є складною нелінійною залежністю відносно X_0 і тому алгоритм оптимізації числовий (ітераційний).

Для дослідження точності рішення (1) необхідно проаналізувати механізми, що визначають похибку визначення початкових умов руху КА. Для цього розглянемо узагальнену структурну схему, що розкриває вплив трьох основних факторів на результуючу похибку визначення початкових умов руху КА, що надана на рисунку 2.



Рис. 2. Фактори, що впливають на результуючу похибку визначення початкових умов руху КА

Аналіз схеми на рисунку 2 показує, що вплив перших двох факторів є протирічним, а третій виступає обмеженням. Таким чином, для отримання найменшої похибки визначення параметрів руху КА необхідно обробляти деяку оптимальну кількість вимірювальної інформації, що врівноважує вплив випадкової і динамічної складової похибки, тобто, забезпечує достатнє компенсування випадкових похибок та, одночасно, не дає суттєво вплинути динамічній похибці на результуючу похибку [6]. Але, при цьому, слід враховувати, що кількість вимірювальної інформації не може бути меншою за необхідну кількість, що забезпечує збіжність алгоритму оптимізації при розв'язку (1).

В цілому, якщо для зовнішньотракторних вимірювань використовуються задані (відомі) наземні засоби, то змінювати (збільшувати чи зменшувати) кількість вимірювальної інформації для подальшої обробки можливо лише шляхом зміни (збільшення чи зменшення) часового інтервалу накопичування вимірювань. Це пояснюється технічними характеристиками наземних засобів вимірювання [1, 5]. Зазначений часовий інтервал, найкраще подавати у кількості мірних витків.

У таблиці 1 наведено значення випадкової та динамічної складових похибки визначення початкових умов руху КА від кількості мірних витків для вітчизняних КА «Січ-1» та «АУОС-СМ-КФ» у період підвищеної сонячної активності. Зазначені похибки отримані з аналізу балістичних даних з управління КА «Січ-1» та «АУОС-СМ-КФ» та виражені у похибці часу виходу КА на екватор, саме таке подання найчастіше використовується при оцінюванні точності початкових умов руху КА [6].

Таблиця 1

Кількість мірних витків	1	2	3	4	5	6	7	8
Випадкова похибка, с	0,182	0,851	4,784	6,515	8,196	9,252	11,093	12,446
Динамічна похибка, с	0,165	0,161	0,150	0,108	0,095	0,081	0,078	0,054

Визначення оптимальної кількості вимірювальної інформації для оцінювання параметрів руху КА можливо провести на основі подання даної задачі як багатокритеріальної, розв'язок якої шукається з використанням нелінійної схеми компромісів професора А.М. Вороніна [7], так [6]:

- випадкова та динамічна похибки подаються як узагальнені критеріальні функції у вигляді ступеневих багаточленів шостого ступеня від кількості мірних витків;
- формується узагальнена цільова функція у вигляді згортки середньозважених критеріальних функцій;
- шукається мінімальне значення сформованої цільової функції на множині цілих значень мірних витків.

Аналіз даних в таблиці 1 показав, що оптимальна кількість мірних витків у період підвищеної сонячної активності становить 3 витки. Для порівняння при нормальній сонячній активності оптимальна кількість витків – 6 [6].

У вітчизняній практиці БНЗ, при визначенні параметрів руху КА використовуються градієнтні методи оптимізації (як правило метод Ньютона) і проводиться накопичення вимірювальної інформації на 5–6 мірних витках [6]. Зазначені методи характеризуються невеликою областю збіжності [5]. Досліджені можливості проведення визначення параметрів руху КА за трьома-чотирма мірними витками за допомогою градієнтних методів оптимізації, 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 задачі (1), тобто, є недієвими за такої кількості вимірювальної інформації [8]. Отже, традиційно, при визначенні параметрів руху КА кількість необхідної вимірювальної інформації визначається не вимогами результуючої точності визначення параметрів руху КА, а кількістю вимірів, що забезпечує збіжність алгоритму визначення цих початкових умов, тобто характеристикою використовуваного математичного методу.

Пропонується при визначенні параметрів руху КА замість градієнтних методів використовувати пошуковий метод оптимізації з побудовою області початкових наближень. Цей метод визначення параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів реалізує нелокальний підхід до розв'язку (1), що обумовлює йому значно ширшу область збіжності, порівняно зі штатним алгоритмом. Були досліджені можливості проведення визначення параметрів руху КА за трьома-чотирма мірними витками за допомогою запропонованого методу. Встановлено, що пошуковий метод оптимізації з побудовою області початкових наближень, за рахунок значно ширшої області збіжності (порівняно зі штатним алгоритмом) дозволяє забезпечити збіжність ітераційного процесу оцінювання параметрів руху КА при скороченому об'ємі вимірювальної інформації [8].

Таким чином, впровадження у вітчизняну практику БНЗ управління КА пошукового методу оптимізації з побудовою області початкових наближень забезпечить підвищення точності визначення початкових умов руху КА, що необхідно для реалізації координатних методів управління на перспективних вітчизняних КА без застосування інформації від іноземних супутникових навігаційних систем.

Друга задача – зменшення обчислювальної складності прогнозування руху КА.

У штатних вітчизняних програмних комплексах БНЗ управління КА розв'язання задачі прогнозування руху КА проводиться шляхом числового інтегрування диференційного рівняння збуреного руху КА. Для цього використовуються числові методи інтегрування диференційних рівнянь руху КА – метод Адамса 7-го порядку та метод Рунне–Кутта 4-го порядку [1, 5]. Ці традиційні числові методи інтегрування диференційних рівнянь мають підвищену обчислювальну складність, а спроби її зменшення призводять до суттєвих втрат у точності розрахунків.

Слід окремо зазначити, що особливо актуальним є питання зменшення обчислювальних витрат на прогнозування руху КА та впровадження перспективних координатних методів управління, коли всі обчислення або їх значну частину необхідно проводити на борту КА, що висуває суттєві вимоги до потужностей бортових обчислювальних засобів за допомогою яких проводяться розрахунки.

Розв'язати протиріччя «точність–обчислювальна складність» можливо шляхом використання математичного апарату диференціальних перетворень [9]. Застосування формалізованого операційного методу диференціальних перетворень дає змогу розробити алгоритм прогнозування руху КА, у порівнянні зі штатними алгоритмами, з меншими в 3–4 рази обчислювальними витратами при забезпеченні заданої точності за рахунок точного рекурентного визначення відрізка ряду Тейлора розв'язку диференційного рівняння руху КА [10]. 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.

Для підвищення оперативності (зменшення обчислювальної складності) прогнозування руху КА, необхідно суттєво зменшення обчислювальних витрат на прогнозування його руху. Таке зменшення можна досягти використовуючи математичний апарат диференціальних перетворень.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Мамон В.А.* Баллистическое обеспечение космических полетов / *В.А. Мамон, В.И. Половников, С.К. Слезкинский.* – Л. : ВИКК им. А.Ф. Можайского, 1990. – 622 с.
2. European Space Agency. Observing the Earth. Project for On-Board Autonomy. – Режим доступу : http://www.esa.int/esaMI/Proba_web_site/ESAQ9KTHN6D_0.html. – Дата доступу : 10.02.11. – About Proba-1.
3. *Иванов Н.М.* Баллистика и навигация космических аппаратов : учебн. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2004. – 544 с.
4. *Лебедев А.А.* Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование / *А.А. Лебедев, О.П. Нестеренко.* – М. : Машиностроение, 1991. – 346 с.
5. *Жданюк Б.Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений / *Б.Ф. Жданюк.* – М. : Советское радио, 1978. – 384 с.
6. *Завада А.А.* Методика визначення параметрів руху космічних апаратів оптико-електронного спостереження за скороченим об'ємом траекторних вимірювань / *А.А. Завада* // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – № 2 (53). – С. 86–92.
7. *Воронин А.Н.* Многокритериальный синтез динамических систем / *А.Н. Воронин.* – К. : Наук. думка, 1992. – 160 с.
8. *Пясковский Д.В.* Алгоритм уточнения параметров движения космических аппаратов по сокращенному объему измерительной информации / *Д.В. Пясковский, И.Д. Варламов, А.А. Завада* // Проблемы управления и информатики. – 2003. – № 5. – С. 98–106.
9. *Пухов Г.Е.* Дифференциальные спектры и модели / *Г.Е. Пухов.* – К. : Наук. думка, 1990. – 184 с.
10. Прогнозування руху КА у гринвіцькій прямокутній системі координат методом диференціально-тейлорівських перетворень / *М.Ю. Ракушев, А.А. Завада, С.В. Ковбасюк, В.І. Болотніков* // Системи озброєння і військова техніка. – Харків : ХУПС, 2009. – № 1(18). – С. 109–114.

ЗАВАДА Андрій Анатолійович – кандидат технічних наук, начальник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- автоматизована обробка інформації в складних інформаційних системах;
- захист інформації на об'єктах інформаційної діяльності.

РАКУШЕВ Михайло Юрійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- балістико-навігаційне забезпечення управління польотом космічних апаратів;
- математичне моделювання та диференціальні перетворення.

КОВБАСЮК Сергій Валентинович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- автоматизована обробка інформації в складних інформаційних системах;
- наземні засоби космічної інфраструктури України.

Подано 11.10.2010

Завада А.А., Ракушев М.Ю., Ковбасюк С.В. Підходи до удосконалення балістико-навігаційного забезпечення управління космічними апаратами

Завада А.А., Ракушев М.Ю., Ковбасюк С.В. Подходы к усовершенствованию баллистико-навигационного обеспечения управления космическими аппаратами

Zavada A.A., Rakushev M.Yu., Kovbasyuk S.V. Approach to improving ballistic-navigation software control of spacecraft

УДК 629.7.05:621.391.268

Подходы к усовершенствованию баллистико-навигационного обеспечения управления космическими аппаратами / А.А. Завада, М.Ю. Ракушев, С.В. Ковбасюк

Предложены подходы к усовершенствованию решения основных задач баллистико-навигационного обеспечения управления космическими аппаратами в условиях однопунктной технологии управления без использования информации от спутниковых навигационных систем, а именно: повышения точности определения параметров движения космических аппаратов по результатам траекторных измерений и снижения вычислительной сложности прогнозирования движения космических аппаратов.

УДК 629.7.05:621.391.268

Approach to improving ballistic-navigation software control of spacecraft / A.A. Zavada, M. Yu. Rakushev, S.V. Kovbasyuk

Approaches to improve fundamental solutions of problems ballistic-navigational support for spacecraft control in 1-post management technology without the use of information from satellite navigation systems, namely: improving the accuracy of the motion parameters of spacecraft on the results of trajectory measurements and reduce the computational complexity of predicting the motion of spacecraft.