

**І.Д. Варламов, к.т.н.**  
**А.М. Воронін, д.т.н., проф.**  
**Ю.І. Міхєєв, ад'юнкт**

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

### ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ПОЛЬОТОМ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ОПТИКО- ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

*Проведено аналіз методів управління космічними апаратами відповідно до способу формування та виконання програми функціонування бортової апаратури. Обґрунтовано необхідність використання координатно-часового методу управління як одного з можливих шляхів удосконалення процесу управління польотом космічних апаратів оптико-електронного спостереження.*

**Актуальність досліджень.** На сьогоднішній день засіб отримання інформації з космосу про поверхню Землі за допомогою космічної системи (КС) оптико-електронного спостереження (ОЕС) залишається затребуваним завдяки врахуванням її переваг перед іншими. Для вирішення цільового завдання до космічних апаратів (КА) таких систем висуваються високі вимоги щодо розрізненості цільової апаратури. Це, в свою чергу, призводить до зменшення полів зору цієї апаратури [1].

Така тенденція розвитку КС ОЕС призводить до підвищення вимог до точності визначення положення КА на орбіті. В табл. 1 наведено вимоги до положення КА на орбіті вздовж напрямку польоту  $\Delta L$ , яке безпосередньо впливає на ефективність виконання цільового завдання КА ОЕС.

Таблиця 1

*Характеристики КА спостереження Землі з оптико-електронною апаратурою*

КА	Січ-1М	МС-1-ТК	МС-2-8	Січ-3
Дата запуску КА	2004	2005	2006	2008
Смуга огляду, км, (поле зору, км x км)	800	352-367	46,6	10x8,8
Вимоги до $\Delta L$ (км)	$\leq 106,4$	$\leq 47,88$	$\leq 6,19$	$\leq 1,33$

Особливості однопунктної технології управління (мала тривалість сеансів зв'язку та часу радіоконтролю орбіти), яка обумовлена географічними умовами України, створює причини, які знижують ефективність розв'язання цільової задачі, а для КА високої розрізненості, в існуючих умовах управління при використанні програмно-часового методу, взагалі можуть призвести до її невиконання. Такі умови потребують у визначенні перспективних напрямків удосконалення процесу управління польотом КА ОЕС. Враховуючи вищезазначене, тему статті слід вважати актуальною.

**Аналіз стану питання.** В роботах відомих вчених та спеціалістів досить детально розглянуто питання організації процесу балістико-навігаційного забезпечення (БНЗ) управління польотом КА. Роботи [2, 3, 4], перш за все, присвячені теоретичним та практичним питанням експериментальної космічної балістики та визначенню руху центра мас КА за результатами траєкторних вимірювань. Представлені авторами рекомендації щодо ефективного управління КА в польоті на практиці реалізовані за допомогою програмно-часового методу управління КА. Однак тенденція зменшення полів зору КА ОЕС з високою розрізненістю призводить до неможливості застосування програмно-часового методу в умовах однопунктної технології управління КА, у зв'язку з необхідністю проведення вимірів параметрів руху КА на малих інтервалах часу. До числа принципових питань, які потребують рішення для удосконалення процесу управління КА, відноситься перехід на координатні методи управління на відміну традиційному програмно-часовому. Впровадження такого методу управління в умовах однопунктної технології управління та сучасного стану БНЗ потребує удосконалення останнього.

Таким чином, **мета роботи** полягає в обґрунтуванні необхідності вибору координатних методів управління в умовах однопунктної технології та сучасного стану БНЗ управління польотом КА ОЕС.

**Постановка задачі.** Результатом функціонування КС ОЕС є отримання інформації про поверхню Землі у вигляді знімків. Виконання цільового завдання відбувається шляхом наведення візирної осі бортової апаратури у центр району зйомки. Якість отриманого зображення при цьому буде залежати від багатьох факторів (технічних, економічних, політичних і т. д.), основні з яких представлені:

характеристиками апаратури (спектральні характеристики, світлочутливість, розрізненість); умовами спостереження (рівень освітленості, хмарність, стан атмосфери, світлотіньова структура району спостереження, висота Сонця над місцевістю); просторово-часовими характеристиками положення КА (відхилення від розрахункової орбіти).

Враховуючи, що розрізненість апаратури спостереження конструктивно реалізується в КА, в подальшому будемо вважати її заданою, що задовольняє виконанню цільового завдання. Умовимося, що зйомка поверхні Землі проводиться в умовах спостереження, які не впливають на якість знімка. При таких допущеннях якість отриманого зображення КС ОЕС значною мірою буде залежати тільки від точності визначення КА на орбіті.

Якість рішення цільового завдання КА ОЕС в загальному випадку буде визначатися площею перекриття запланованого і реально знятого районів  $S_{пр}$  [5]. При цьому  $S_{пр} \rightarrow \max$ . Величина  $S_{пр}$  є функцією:

$$S_{пр} = f(\theta_{цм}, \theta_{ос}), \quad (1)$$

де  $\theta_{цм}$  – помилка визначення координат центра мас (ЦМ) КА;

$\theta_{ос}$  – помилка орієнтації і стабілізації візирної осі бортової спеціальної апаратури.

Загальний критерій ефективності накриття району зйомки визначається площею перекриття знятої реально і запланованої для зйомки ділянок земної поверхні  $S_{пр}$  з визначеною ймовірністю накриття

$P_{накр}$  [6, 7]:

$$S_{пр}(P_{накр} \geq P_{вим}) \geq S_{ер}, \quad (2)$$

де  $P_{вим}$  – ймовірність накриття запланованого району зйомки, яка вимагається;

$S_{ер}$  – граничне значення площі перекриття.

На сьогоднішній час значення  $P_{вим}$  та  $S_{ер}$  відповідно становлять  $P_{вим} = 0,95 \dots 0,98$ ,  $S_{ер} = 70\%$ , що обумовлено переліком відповідних причин (технічних, економічних тощо).

Враховуючи вищезазначене, критерій ефективності накриття району зйомки сучасними КА ОЕС буде мати вигляд [7]:

$$S_{пр}(P_{накр} \geq 0,92 \dots 0,95) \geq 70\%. \quad (3)$$

Для забезпечення цієї умови доцільно, перш за все, зменшувати помилки поступального руху КА. Тому необхідно визначити такий метод управління, при якому буде забезпечуватись критерій (3).

**Виклад основного матеріалу.** Географічне положення України обумовлює використання однопунктної технології управління. Це значно обмежує умови видимості КА радіотехнічними засобами. Для перспективних українських КС ОЕС з висотою орбіти порядку 600–700 км КА попадають в зону радіовидимості наземного пункту 4–5 раз на добу, часові інтервали між сеансами зв'язку можуть досягати 11 годин. Мінімальний час уточнення параметрів руху КА при однопунктній технології управління складає 2–3 доби, що пояснюється особливістю використання математичних методів визначення параметрів орбіти за наявністю траєкторних вимірювань. Традиційно використовують програмно-часові методи управління КА, які знайшли своє широке застосування, пов'язане з відносною легкістю технічної реалізації бортових засобів управління. Практична реалізація даного методу полягає в тому, що на основі прогнозування руху КА формується програма роботи бортового комплексу, яка закладається на борт КА в сеансі зв'язку, при цьому сигнали управління на борту виконуються як функції часу. Ефективність виконання цільової задачі, що стосується БНЗ, залежить від мінімізації нев'язки між дійсними параметрами руху та прогнозованими  $\Delta Q$  на момент виконання цільового завдання:

$$\Delta Q = Q_{прог} - Q_{дійсн}, \quad (4)$$

$$\Delta Q \rightarrow \min. \quad (5)$$

Похибка прогнозу поточних параметрів руху з часом буде зростати в процесі виконання польотного завдання та на момент виконання цільового завдання вже буде мати місце похибка  $\Delta Q_{пу}$  (рис. 1). Мінімальне значення нев'язки  $\Delta Q_{мін}$ , яке можливо забезпечити при періоді уточнення початкових умов згідно з технологічним циклом управління  $T_{цу}$  показано на рис. 1. Щоб забезпечити критерій (3), час виконання цільового завдання  $T_{цз}$  повинен бути менший, ніж час  $T_{цу}$ , що не є можливим в умовах однопунктної технології управління.

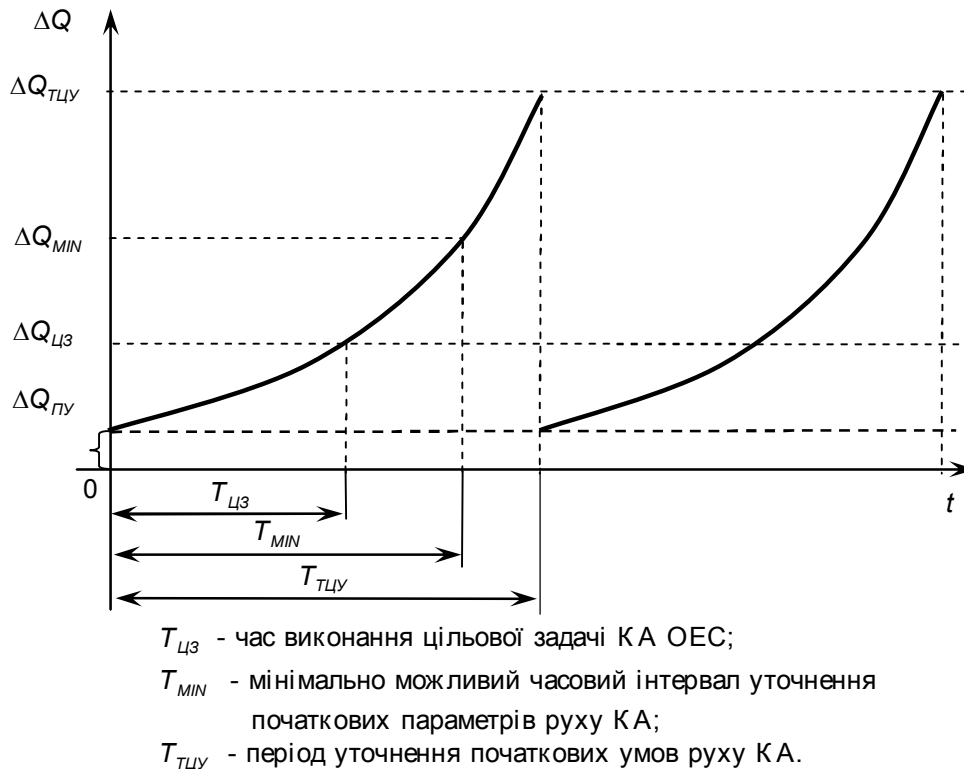


Рис. 1. Похибка у визначенні просторового положення КА на момент виконання цільової задачі при програмно-часовому методі управління

Практика БНЗ управління польотом КА з великими полями зору («Океан-О», «Січ-1», «Січ-1М») за однопунктною технологією показала, що відхилення за часом прогнозованого і псевдореального положення КА на орбіті за 0,5 доби досягали значень близько 6 секунд, відповідно зміщення КА уздовж орбіти буде становити 15 км, що задовольняє критерію (3) по накриттю району зйомки для таких КА.

Для сучасних КС ОЕС, при умовах однопунктної технології управління та існуючому стані БНЗ, похибки визначення параметрів руху КА ОЕС з високою просторовою розрізненістю сумірні з розмірами ділянок зйомки. В результаті чого якість накриття району перспективними КА в таких умовах при використанні програмно-часового методу управління КА становить  $S_{пр} (P_{накр} \geq 0,92...0,95) \leq 30 \%$ , тобто критерій (3) не виконується. Це вимагає визначення параметрів руху КА на момент виконання цільової задачі з високою точністю.

Можливо виділити два основні шляхи вирішення даної проблеми.

Перший – це удосконалення моделі руху, тобто повніший і адекватніший облік збурюючих чинників. Це досить складне завдання, до того ж при проведенні різного роду маневрів і корекції орбіти, а також при дії неврахованих збурень реальне положення апарата все одно певною мірою відрізнятиметься від прогнозованого. І чим більше часовий інтервал, на який проводиться розрахунок балістико-навігаційної інформації, тим більші похибки одержуваних результатів.

Другий – це підвищення оперативності отримання уточнених параметрів руху  $t_{уточн} \rightarrow \min$  і, як наслідок, – проведення балістико-навігаційних розрахунків з використанням початкових умов, які більш точно відповідають реальним параметрам руху КА. Практична реалізація другого напрямку в умовах однопунктної технології управління потребує впровадження координатних методів управління, які в залежності від зміної управління поділяються на програмно-координатний та координатно-часовий.

Суть **програмно-координатного методу** полягає в тому, що польотне завдання на борт закладається як координати районів зйомки, пунктів прийому та передачі інформації. Програма робіт бортової апаратури виконується при умові:

$$\begin{cases} X_{II}(t) \in [X_{поч}; X_{поч} + \varepsilon_X], \\ Y_{II}(t) \in [Y_{поч}; Y_{поч} + \varepsilon_Y], \\ Z_{II}(t) \in [Z_{поч}; Z_{поч} + \varepsilon_Z], \end{cases} \quad (6)$$

де  $X_{\Pi}(t), Y_{\Pi}(t), Z_{\Pi}(t)$  – поточні координати руху центра мас КА у відповідній системі координат, які визначаються бортовими засобами навігації;

$X_{\text{поч}}, Y_{\text{поч}}, Z_{\text{поч}}$  – координати початку виконання програм, що закладаються на борт КА;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – інтервали допустимої точності приналежності координат.

Оцінка поточних навігаційних параметрів при програмно-координатному методі управління проводиться весь час у процесі виконання цільового завдання. Тому похибка у визначенні просторового положення КА на момент виконання цільового  $t_{\text{пцз}}$  завдання  $\Delta Q_{\text{пцз}}$  залишається на рівні похибки визначення поточного положення КА на орбіті бортовими засобами навігації  $\Delta Q_{\text{пу}}$  та залишається незмінною  $\Delta Q_{\text{кцз}}$  до кінця виконання цільового завдання  $t_{\text{кцз}}$  (рис. 2).

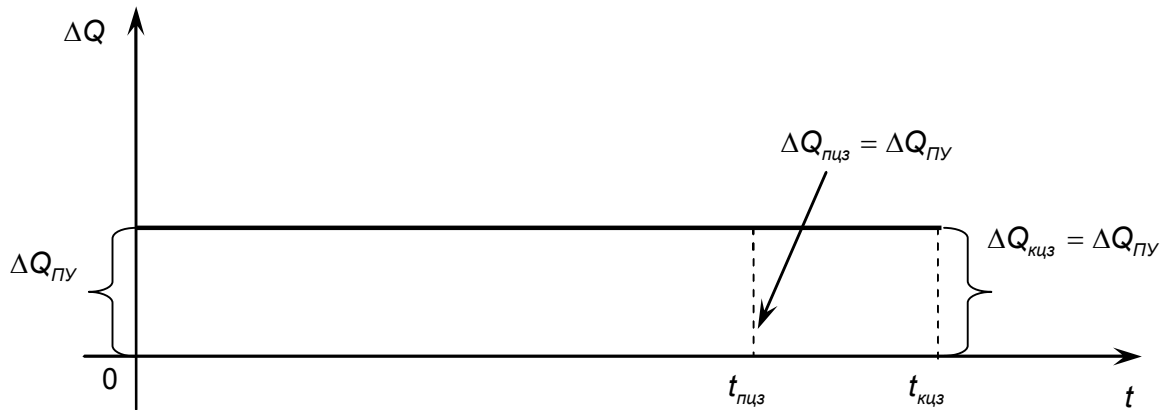


Рис. 2. Похибка визначення просторового положення КА на момент виконання цільової задачі при програмно-координатному методі управління

Труднощі, які виникають при використанні програмно-координатного методу, пов'язані з неможливістю створення на борту КА рівномірної шкали змінної управління, а також зв'язаною з цим складністю формування умов управління. Ці труднощі знімаються при використанні координатно-часового методу управління. Однак залишається необхідність застосування на борту КА високопродуктивних обчислювальних засобів і достатньо складних бортових алгоритмів управління.

**Координатно-часовий метод** управління містить в собі елементи програмно-часового та програмно-координатного методу управління. В процесі управління координатно-часовим методом початок роботи по запланованих об'єктах також визначається з умови (6). В подальшому виконання програми роботи по обслуговуванню відповідного району зйомки проходить на основі часової змінної, що дає значну легкість його реалізації на борту КА. Очевидно, що даний метод управління на момент виконання цільової задачі має похибку визначення поточного положення КА рівною похибці розв'язання крайової задачі на борту  $\Delta Q_{\text{пу}}$  (рис. 3). На час закінчення виконання цільового завдання  $t_{\text{кцз}}$  значення похибки стане більшим, але не досягатиме значення  $\Delta Q_{\text{цз}}$ , що задовольняє критерію (3).

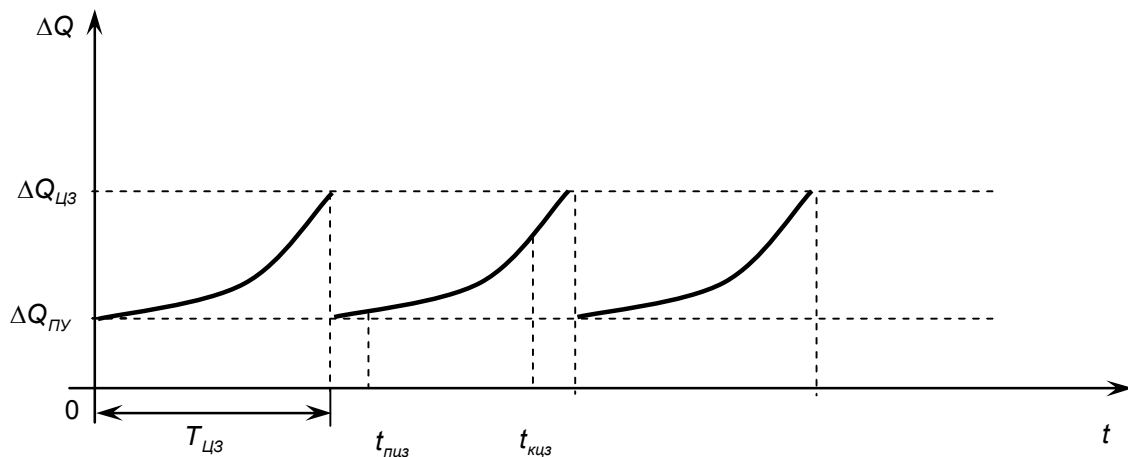


Рис. 3. Похибка визначення просторового положення КА на момент виконання цільової задачі при координатно-часовому методі управління

Таким чином, для забезпечення високої цільової ефективності КС ОЕС при допустимих технічних характеристиках бортових засобів управління та умовах управління, необхідно обирати координатні методи управління КА. Результат аналізу методів управління показує, що найбільш доцільно застосовувати координатно-часовий метод управління КА, що обумовлено можливістю його практичної реалізації при забезпеченні критерію ефективності накриття району зйомки (3).

Із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) з'явилася можливість широкого застосування навігаційних супутникових технологій в інтересах розв'язання задач координатно-часового забезпечення польотів КА [8]. Однак ці системи повною мірою не можуть забезпечити надійність розв'язання задачі навігації у зв'язку з низькою оперативністю інформації про відкази на навігаційних супутниках. Тому для надійності координатно-часового управління потрібно використовувати вимірювальну інформацію від різних джерел. Такий підхід потребує визначення відносного ступеня достовірності даних, які поступають по різних каналах в поточний момент часу [9]. При представленні масиву початкових даних у вигляді матриці-стовпця:

$$A^T = \left\| \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_m \right\|, \quad (7)$$

де  $\alpha_j, j \in [1, m]$  – дані про деяку числову величину  $\alpha$ , отримані по  $j$ -х каналах (компоненти системи комплексуювання).

Завдання буде вирішено, якщо отримати найбільш достовірну оцінку  $\alpha^*$  величини  $\alpha$ .

З метою отримання максимальної інформації з наявної сукупності різнотипових даних використовують синергетичну концепцію комплексуювання даних. При цьому за допомогою певних механізмів отримання даних відбувається по всіх каналах, на відміну від концепції домінанти. В результаті вся належна інформація буде використана належним чином [9].

Такий підхід розв'язання задачі визначення параметрів руху КА в цьому випадку потребує рішення часткових завдань:

- вибір декількох джерел вимірювальної інформації;
- сумісна обробка інформації з врахуванням характеристик вимірів;
- визначення поточних координат КА по зменшеному обсязі вимірів.

Розв'язання даних задач дає змогу значно підвищити якість виконання цільової задачі КА ОЕС, а в деяких умовах є єдиним шляхом її розв'язання.

Таким чином, традиційний програмно-часовий метод управління КА ОЕС з малими полями зору не в усіх умовах забезпечує виконання цільового завдання з заданою якістю, в значному випадку при умові однопунктної технології управління КА. Тому основною причиною цього є недоліки, які пов'язані з БНЗ управління польотом КА. В сучасних умовах є можливість покращення існуючого стану БНЗ управління польотом КА, що дає змогу реалізувати перспективні напрямки удосконалення БНЗ шляхом впровадження координатних методів управління. Аналіз можливостей реалізації координатних методів управління показує, що практично може бути реалізований координатно-часовий метод управління.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Волошин В.И., Драновский В.Й., Бушуев Э.И. ГП “Днепрокосмос”, ГКБ “Южное”, Состояние, перспективы и проблемы рынка услуг дистанционного зондирования Земли из космоса // Space-Infom, Kiev, 2001.- <http://space.com.ua>.
2. Иванов Н.М., Дмитриев А.А., Лысенко Л.Н. и др. Баллистика и навигация космических аппаратов: Учебное пособие для технических вузов. – М.: Машиностроение, 1986.– 296 с.
3. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.
4. Шептун А.Д., Жечев М.М., Воронкова И.В., Ижско В.А., Тутубарин В.Н. Особенности определения параметров движения КА при однопунктовой технологии измерений // Международная конференция «Научно-технические проблемы космонавтики и ракетостроения»: тезисы и аннотации докладов. – Калининград: ЦНИИМАШ, 1996. – С. 291–292.
5. Лебедев А.А., Нестеренко О.П. Космические системы наблюдения: Синтез и моделирование. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
6. Ярмольчук Е.Д., Борщева Г.А. Точностные показатели целевой эффективности космической системы наблюдения Земли // НТ сборник “Космическая техника – ракетное оружие”.– 2006.– С. 89–106.

7. Пясковский Д.В., Варламов И.Д., Манько О.В. Критерии точности определения пространственного положения космических аппаратов оптико-электронного наблюдения // Збірник наукових праць. – ЖВІРЕ, 2004. – Вып. 8. – С. 13–23.
8. Щелоков И.Д. Интерфейсный контрольный документ // 3-я редакция, ГЛОНАСС. – М.: 1995. – <http://www.w3.org>.
9. Воронин А.Н. Синергетические аспекты математической статистики // Проблемы управления и информатики. – 2005. – Вып. 6. – С. 79–87.

ВОРОНИН Альберт Миколайович – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– багатокритеріальна оптимізація складних технічних та ергономічних систем.

ВАРЛАМОВ Ігор Давидович – начальник факультету Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– балістико-навігаційне забезпечення управління космічними апаратами.

МІХЄЄВ Юрій Іванович – ад'юнкт Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– статистична обробка траскторних вимірювань.

E-mail: [yuramiheev@ukr.net](mailto:yuramiheev@ukr.net).

Подано 04.09.2007