

УДК 621.396.1

С. В. Ковбасюк, Л. Б. Каневський

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова Національного авіаційного університету

МЕТОД ОБРОБКИ ТРАЄКТОРНИХ ДАНИХ ДЛЯ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ У БАГАТОПОЗИЦІЙНОМУ ОПТИЧНОМУ КОМПЛЕКСІ

Запропоновано метод застосування оптичних засобів контролю космічного простору для оперативного визначення параметрів руху космічних об'єктів з підвищеною точністю в інтересах національного користувача балістико-навігаційних даних. Основна увага приділена математичному забезпеченню спільної обробки траєкторних даних при створенні багатопозиційного оптичного комплексу.

ВСТУП

Сучасна космічна діяльність високорозвинутих держав спрямована на економічний та науково-технічний розвиток, розв'язання глобальних проблем людства, у тому числі проблем безпеки [2]. Такі тенденції сприяють активному пошуку Україною свого місця на космічному ринку, формуванню космічної політики, орієнтованої на задоволення нагальних загальнодержавних потреб.

Будучи космічною державою, Україна активно бере участь у різних космічних програмах, виводячи за допомогою своїх ракет-носіїв на навколоземну орбіту космічні апарати (КА). Важливими питаннями з точки зору розвитку зовнішньоекономічної діяльності, за якими попередньо проводиться тендер щодо надання таких послуг, є:

- об'єктивний контроль процесу виведення КА ракетою-носієм з такою класифікацією: штатний, нештатний, аварійний режими;
- надання послуг із забезпечення управління КА завдяки своєчасній видачі достовірних цілевказівок засобам управління польотом КА.

Для реалізації цих завдань необхідно мати оперативну і достовірну інформацію про навколоземну ситуацію, що потребує ведення національного каталогу космічних об'єктів (КО).

Тому перед балістичними постає актуальне на сьогодні завдання контролю космічного простору (ККП) для безпечного виведення КО, що у свою чергу потребує своєчасних та достовірних даних про кількість і параметри руху як щойно запусканих КО, так і об'єктів, що вже перебувають в навколоземному просторі.

Необхідність ведення національного каталогу КО зумовлена також вимогою:

- високоточного балістико-навігаційного забезпечення планування застосування вітчизняних космічних апаратів з високою роздільною здатністю (у перспективі – угруповань КА);
- контролю наявності в навколоземному космічному просторі великої кількості малорозмірних об'єктів, що становлять загрозу рухові діючих КА.

Результати аналізу циклоїд запуску і виведення на робочу орбіту КА показують, що в цих процесах використовують 6–8 наземних та надводних командно-вимірювальних комплексів з метою максимальної щільності засобів приймання телеметричної інформації та вимірювання параметрів руху на перших витках польоту. За інформацією агентства Xinhua відомо, що при виведенні супутника китайської орбітальної навігаційної системи «Бейдоу-2», який успішно запусканий 27 липня 2011 р. з космодрому Сичан (південно-західна провінція Сичуань), додатково до наці-

ональних були задіяні принаймні два іноземні засоби ККП [http://news.xinhuanet.com/2011].

Однак при виникненні аварійної ситуації оперативність пошуку КА без використання засобів активної радіолокації, оптичних засобів у режимі попереднього прогнозування можливої обстановки значно знижується. Останній приклад — автоматична міжпланетна станція «Фобос-Грунт», коли після аварійного запуску першими на другу добу польоту офіційну інформацію про параметри руху станції надали США за результатами роботи системи ККП.

Система ККП США має змогу вести спостереження протягом більш як 50 % витка польоту КО, що дає можливість за 1–1.5 доби отримати повну інформацію про об'єкт спостереження. Сучасну та територіально розподілену систему контролю космосу має Російська Федерація, активно створює таку систему Китайська Народна Республіка, Франція використовує бістатичний радіолокатор метрового діапазону, а Німеччина отримує портрети КО у навколосемному просторі з використанням системи з двох радіотелескопів у Еффельберзі, характеристики якого близькі до євпаторійського РТ-70, та Вахтаберзі.

Україна також має на своїй території засоби активної радіолокації, які мають можливість безперервно вести спостереження за космічним простором, оптичні засоби, а також унікальний радіотелескоп РТ-70.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Виконання завдань з ККП в Україні покладено на Систему контролю та аналізу космічної обстановки (СКАКО) Державного космічного агентства України (ДКАУ). Існують певні проблеми організації роботи СКАКО з ведення та оновлення каталогу КО.

1. Інформаційні джерела не функціонують у єдиному задумі та під єдиним керівництвом на вирішення завдань ККП.

2. Радіолокаційні станції 5Н86-М «Дніпро» [1] на даний час не використовуються в інтересах ККП, оскільки вони технічно застарілі, модернізація їх відкладена на невизначений термін.

3. Згідно з документами, що планують космічну діяльність держави на термін до п'яти років,

модернізація радіотелескопу РТ-70, який має високі технічні характеристики і потенційно може використовуватись при рішенні задач ККП, не планується.

4. Контрольно-вимірювальні комплекси працюють тільки за КА, якими здійснюють управління.

Таким чином, єдиним на даний час засобом отримання інформації про параметри руху КО в інтересах ККП є оптичні та оптико-електронні засоби. Оптичні засоби ДКАУ, а також обсерваторії Одеси, Херсона, Ужгорода вже використовуються для вирішення задач СКАКО по пріоритетних КО в рамках договорів про науково-технічне співробітництво, ряд інших оптичних засобів додатково може залучатися до вирішення визначених завдань у рамках добових та погодних обмежень на їхнє використання.

Застосування таких засобів для ККП в умовах відсутності вітчизняного каталогу КО має ряд обмежень та особливостей:

- проведення вимірювань не трьох (як в активних радіолокаторах), а лише двох просторових координат;
- імовірний пропуск сеансу супроводження в умовах апріорної невизначеності параметрів руху КО;
- необхідність зав'язування нової траєкторії при супроводженні КО, що потребує накопичення масивів вимірювань за декілька прольотів КО та знижує оперативність отримання вихідної інформації;
- наявність методичних похибок та обчислювальна складність числових методів розв'язку багатоточкових крайових задач, що використовуються для визначення параметрів руху КО.

Незалежно від цього оптичні засоби мають високі точнісні параметри вимірювань кутових координат та перекривають усі висоти польоту КО [4]. Добові та погодні умови не залежать від спостерігача, однак інші недоліки та обмеження в роботі оптичних засобів можуть бути зменшені та враховані шляхом розробки відповідного програмно-алгоритмічного забезпечення.

Для пасивних систем виявлення, а саме таких і є оптичні засоби спостереження (ОЗС), в умовах апріорної невизначеності пошук необ-

хідного КО є складною задачею. Один з варіантів її розв'язання розроблено у роботі [8], де запропоновано метод послідовного аналізу з відсвічним експериментом, який за допомогою методу поблокової обробки вимірювань зводиться до послідовної перевірки багатоальтернативних гіпотез з попередньою ієрархічною селекцією. На основі аналізу задач обробки локаційних даних при синтезі вирішального правила перевірки багатоальтернативних гіпотез знаходиться найкраще розбиття простору спостережень, що дає змогу вирішити проблему пошуку необхідного КО в умовах невизначеності.

Складність ведення каталогу КО полягає в тому, щоб у стислі терміни отримати точні балістико-навігаційні дані. Найбільш оптимальним рішенням цієї проблеми є об'єднання даних з усіх інформаційно-вимірювальних засобів у єдину систему та організація їхньої роботи у два етапи. На першому етапі за результатами функціонування радіолокаційних засобів безперервного спостереження за КА проводиться первинна, груба оцінка параметрів орбіти об'єктів спостереження. На підставі цієї інформації формуються цілевказівки високоточним засобам (наприклад, квантово-оптичній системі «Сажень-С») для локації екстрапольованої просторової області знаходження КО. За результатами роботи цих засобів (чи спільної обробки інформації грубих і точних засобів) на другому етапі відбувається точне визначення параметрів орбіт КО з використанням мінімальної кількості мірних витків і подальше оновлення даних каталогу.

Слід зазначити, що у штатному режимі наявних на території України радіолокаційних станцій інформація може видаватися про КО, що пролітають на висоті до 1500 км, проте модернізація алгоритмів роботи та апаратурної частини потенціалу радіолокаційних систем дозволить контролювати високі орбіти КА. У цих умовах можлива видача цілевказівок і підключення до рішення завдань ККП радіотелескопа РТ-70, який дозволить проводити високоточні вимірювання не лише трьох просторових координат, але, враховуючи можливість роботи на різних частотах, за наявності двох локаторів з різними

характеристиками, отримувати радіолокаційні портрети об'єктів локації.

Перша проблема для реалізації двоетапної процедури в Україні: наявні радіолокаційні станції не працюють у штатному режимі, тобто початкової інформації від національних вимірювальних засобів спостереження немає. Вихід з положення — використання інших джерел інформації, а саме: відкритих офіційних каталогів (наприклад NORAD) і приватних спостерігачів, а також аналітичні розрахунки [8], що дозволять формувати завдання на пошук об'єктів у певних просторових секторах, виходячи з призначення КА, а при нових запусках — з урахуванням апріорної інформації (кутів запуску з конкретного космодрому, типу ракетоносія тощо). Недоліком такого підходу є неможливість використання вихідних даних в алгоритмах обробки вимірювань в якості початкових параметрів руху у зв'язку з грубим характером аналітичних розрахунків та відсутністю інформації про моделі руху КО, атмосфери, методи обробки координат та значення констант, використаних для отримання даних NORAD. В результаті використання таких даних можна отримати розходження алгоритмів уточнення параметрів руху КО. У зв'язку з цим за результатами роботи ОЗС за зовнішніми цілевказівками або методом пошуку необхідно зав'язувати нову траєкторію, для чого при традиційному підході потрібно як мінімум два мірні витки. Це значно знижує оперативність отримання інформації з урахуванням обмежень на роботу і просторову дислокацію вітчизняних ОЗС.

Метою статті є розробка високоточного оперативного (у межах одного витка польоту) методу обробки траєкторних даних в оптичних засобах ККП.

ПОБУДОВА МЕТОДУ ОБРОБКИ ТРАЄКТОРНИХ ДАНИХ

Для розв'язку задачі оперативного (в межах одного витка) методу визначення параметрів руху КА в автономному оптичному засобі авторами був розроблений двоетапний метод [3], який здійснює вагове згладжування одночасно в просторі всіх вимірювань і видає оцінку вектора па-

параметрів руху КА в геоцентричній абсолютній системі координат (ГАСК):

$$\mathbf{X}_{\text{ПУ}} = (x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1), \quad (1)$$

де x_0, y_0, z_0 — координати КА, x_1, y_1, z_1 — швидкості зміни відповідних координат.

Для отримання оцінки параметрів руху КА з максимально можливими точнісними характеристиками у методі траєкторної обробки оптичних вимірів необхідно використовувати динамічну модель руху об'єкта та обробляти вимірювання на усьому часовому інтервалі перебування КА в зоні дії вимірювального засобу. Як метод безумовної оптимізації для статистичної обробки зашумлених вимірів слід використовувати метод найменших квадратів, а для оперативності розрахунків — метод Гаусса — Ньютона.

Підсумкова оперативність роботи (обчислювальна складність) методу траєкторної обробки буде визначатися: вибраним методом розрахунку часткових похідних від вимірюваних функцій за початковими умовами руху КА, що може потребувати до 80 % часових і обчислювальних ресурсів, а також від вибору методу проведення інтегрування відповідних диференціальних рівнянь руху об'єкта [9].

Для усунення суперечності між точністю і оперативністю при використанні в методах траєкторної обробки традиційних кінечно-різницевої схем, що виражається в їхній великій обчислювальній складності і неможливості отримання аналітичного вирішення завдань, — запропоновано використовувати метод диференціальних перетворень, який ґрунтується на переведенні оригіналів в область зображень за допомогою операції диференціювання [6, 7]. Метод дозволяє, при спрощенні процедури проведення математичного моделювання фізичних процесів (об'єктів), які описуються нелінійними інтегродиференціальними рівняннями, отримувати для них в області зображень точні диференціальні моделі завдань і при цьому зберігає потенційну можливість отримання точного рішення (відновлення) в області оригіналів.

Диференціальні перетворення можуть бути різної мірності, що залежить від самої задачі. У розглядуваному випадку застосовуються багато-

вимірні диференціальні перетворення:

$$Z(K_1, \dots, K_L) = P_L \{z(W)\}_{W^*} = \frac{\prod_{l=1}^L H_l^{K_l} \left[\frac{\partial^{\sum_{l=1}^L K_l} z(W)}{\prod_{l=1}^L \partial w_l^{K_l}} \right]_W}{\prod_{l=1}^L K_l!}, \quad (2)$$

$$z(W) = P_L^{-1} \{Z(K_1, \dots, K_L)\}_{T_N} = f(W, C), \quad (3)$$

де W — аргумент (вектор), за яким проводиться перетворення, розміром L , W^* — значення аргументу, за яким проводиться перетворення, $Z(K_1, \dots, K_L)$ — дискретна функція цілочислових аргументів $K_l = 0, 1, 2, \dots$, H_l — відрізок аргументу, на якому розглядається функція $z(W)$, $f(W, C)$ — функція відновлення, або апроксимуюча функція, C — вектор довільних коефіцієнтів.

Пряме перетворення (2) переводить вихідну модель з області оригіналів в область зображень, яка є системою рекурентних рівнянь відносно диференціального спектру моделі. З неї послідовно можна визначити значення дискретного диференціального спектру, задаючи величину цілочислового аргументу, починаючи з $K = 0$. Тоді операцію відновлення оригіналу (3) на великих інтервалах аргументу слід проводити в схемі диференціально-тейлорівських перетворень.

Для отримання початкових наближень, необхідних для роботи метода Гаусса — Ньютона, запропоновано алгоритм, що ґрунтується на методі балансу спектрів із застосуванням математичного апарату диференціальних перетворень [6, 7] та є першим етапом запропонованого методу траєкторної обробки.

З метою підвищення точнісних характеристик визначення параметрів руху КО за результатами супроводу на одному витку польоту пропонується використати великобазовий багатопозиційний оптичний комплекс (БпОК), побудований на основі наявних засобів, де база між вимірювальними засобами буде сумірною з висотою польоту КО.

Концепція такого комплексу для автономних радіолокаційних станцій і його переваги розглянуті в роботі [1]. Основна ідея БпОК полягає в

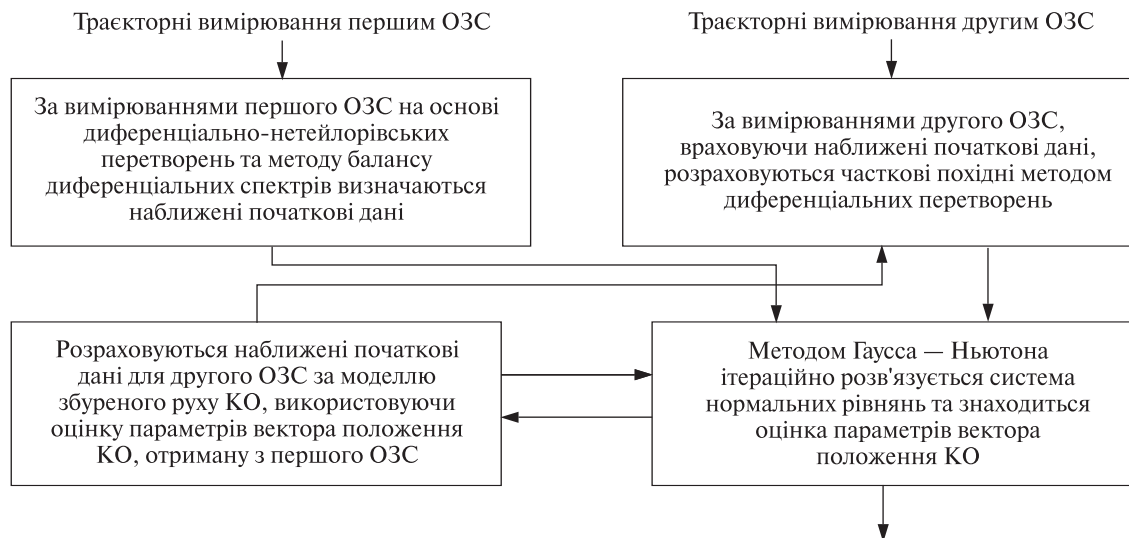


Рис. 1. Структурна схема алгоритму оцінювання параметрів руху динамічної системи у двопозиційному оптичному комплексі

тому, щоб ефективно використати надлишкову інформацію, отриману з суттєво рознесених просторових напрямків спостереження за КА, що дає можливість значно підвищити точність оцінювання параметрів руху об'єктів (див. роботу [5]).

Особливості застосування аналогічного підходу до оптичних засобів такі:

- вимірювання двох просторових координат, що впливає на вибір методу обробки вимірювань (необхідність застосування додатково попереднього етапу визначення початкових наближень) та точнісні характеристики оцінки параметрів руху;

- обмеження ефективного використання БпОК за висотами польоту КА: територіальні розміри України дозволяють це лише для низькоорбітальних об'єктів (розгляд питання про використання БпОК для високоорбітальних і геостационарних КО виходить за рамки роботи).

Як приклад БпОК розглянемо випадок двопозиційної оптичної системи. Припустимо, що зони огляду ОЗС мають спільну зону спостереження, максимальне значення якої становить близько 30 % від розміру зони спостереження одним ОЗС. Відстань між вимірювальними засобами сумірна з дальністю до об'єкта спостереження.

З поставленого завдання випливає, що роботу системи з двох оптичних засобів потрібно організувати в два етапи. На першому етапі за результатами функціонування першого ОЗС слід розрахувати наближені початкові дані для другого ОЗС за моделлю збуреного руху КО, використовуючи оцінку параметрів вектора його положення. Наступним етапом за результатами роботи другого ОЗС необхідно провести точне визначення параметрів руху КО.

Розглядаючи КО в навколосемному просторі як рух динамічної системи, у першу чергу необхідно враховувати, що це є збурений рух, диференціальне рівняння якого в абсолютній прямокутній системі координат має вигляд

$$\begin{aligned} \ddot{X} &= -\mu_3 \frac{X - X_0}{r^3} + \frac{F'_x}{m_{\text{КО}}}, \\ \ddot{Y} &= -\mu_3 \frac{Y - Y_0}{r^3} + \frac{F'_y}{m_{\text{КО}}}, \\ \ddot{Z} &= -\mu_3 \frac{Z - Z_0}{r^3} + \frac{F'_z}{m_{\text{КО}}}, \end{aligned} \quad (4)$$

де X_0, Y_0, Z_0 — координати центра тяжіння основного об'єкта, що притягується, $\mu_3 = 3.986 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ — гравітаційна стала Землі, F'_x, F'_y, F'_z — компоненти збурювальних сил за відповідними осями, $m_{\text{КО}}$ — маса КО.

Створення БПОК для оперативного визначення параметрів руху КО (1) з підвищеною точністю на прикладі двопозиційного оптичного комплексу із заданими умовами у випадку рівнозначності дискрет диференціальних спектрів у цих ОЗС пропонується проводити за алгоритмом оцінки стану динамічної системи, що схематично зображений на рис. 1.

Оскільки процес руху КО описується системою складних нелінійних векторних рівнянь, необхідно розраховувати їхні імовірнісні характеристики поряд з оцінкою вектора параметрів руху об'єкта. Вичерпною імовірнісною характеристикою в рамках кореляційної теорії є кореляційна матриця похибок оцінювання, яка характеризує похибки за відповідними координатами та орієнтацію еліпсоїда похибок у просторі.

Нехай m -вимірний вектор d_i є різницею між вектором розрахованих значень параметрів руху КО, визначених за наближеними даними методом БДС, та дійсними значеннями параметрів руху КО для деякого значення t_i , а послідовність вимірювань $H = (h_1, h_2, \dots, h_N)$, де N — кількість вимірювань, тоді H можна описати співвідношенням

$$H_i = B_i d_k + v_i. \quad (5)$$

Матриця B_i прямо пропорційно показує залежність між перехідною матрицею стану та матрицею частинних похідних вимірюваних функцій за шуканими параметрами моделі:

$$B_i = G(t_i, t_k) \left(\frac{\partial \Phi}{\partial X_i} \right)_{X_i = \hat{X}}.$$

Величина v_i у виразі (5) розподілена у вигляді $N(0, K)$, при цьому K є діагональною кореляційною матрицею похибок вимірювання кутових координат.

Таким чином, оцінка вектора d_k і матриці K буде визначатися формулами

$$\hat{d}_k = \left(\sum_{i=1}^N B_i^T K^{-1} B_i + (G(t_k, t_0) M [d_0 d_0^T] G(t_k, t_0)^T)^{-1} \right)^{-1} \times \sum_{i=1}^N B_i^T K^{-1} H_i,$$

$$\hat{X}_{\text{пу}} = (x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1),$$

$$\hat{K} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - B_i \hat{d}_k)(H_i - B_i \hat{d}_k)^T.$$

Шукані величини є нелінійно залежними, тому потрібно використовувати формули ітераційно для кожної номінальної траєкторії. Лише після того як буде оброблена вся сукупність вимірювань, можна отримати уточнені елементи виразу (1), піддавши отриману сукупність даних обробці методом Гаусса — Ньютона.

Для проведення імітаційного моделювання процесу траєкторної обробки запропонованим методом ітеративного оцінювання вектора стану $X_{\text{пу}}$ та кореляційної матриці похибок оцінювання K необхідно знайти розв'язок векторного диференціального рівняння збуреного руху КО (4) в ГАСК:

$$\dot{X} = \frac{dx}{dt}, \quad (6)$$

де $X = (x_i)^T$ — вектор параметрів руху КО ($i = 1, \dots, 6$).

З урахуванням розв'язку рівняння (6) та ряду збурювальних факторів систему диференціальних рівнянь (4) в ГАСК для проведення короткострокового прогнозу руху КО запишемо у такий спосіб:

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial x} + w_3^2 x + 2w_3 v_y, \\ \dot{v}_y &= \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial y} + w_3^2 y - 2w_3 v_x, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{v}_z = \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial z},$$

$$x = v_x, \quad y = v_y, \quad z = v_z,$$

де $U_{\text{п}}$ — функція, що характеризує гравітаційний потенціал Землі, $w_3 = 0.72992 \cdot 10^{-4}$ рад/с — кутова швидкість обертання Землі навколо власної осі.

Оскільки система є нелінійною системою диференціальних рівнянь, для її розв'язання застосовується апарат диференціальних перетворень. Вираз (2) дозволяє перевести систему в область зображень, де для оперування дискретами диференціального спектру застосовуються тільки алгебраїчні операції. Для переведення розв'язку в область оригіналу доцільно застосувати найпростіший вид (3), а саме диференціально-тей-

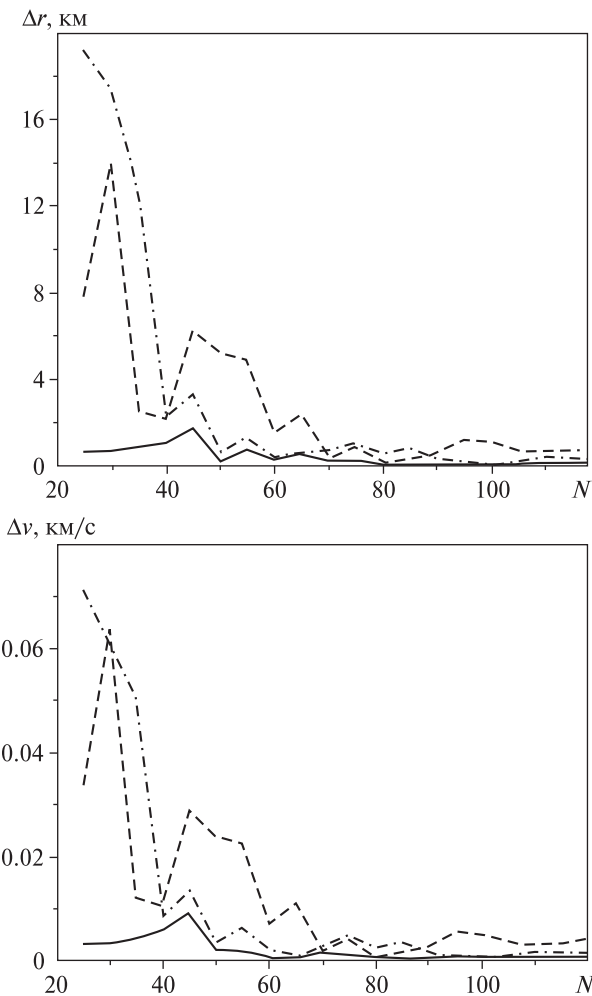


Рис. 2. Похибки визначення місцеположення та швидкості КА: штрихова крива — для першої станції, штрихпунктирна — для другої станції, суцільна крива — для обох станцій

лорівські перетворення [6, 7]:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} X(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

$$y(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} Y(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

$$z(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} Z(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

$$v_x(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} V_x(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

$$v_y(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} V_y(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

$$v_z(t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} V_z(k) \left(\frac{t-t_w}{H} \right)^k,$$

де $X(k), Y(k), Z(k), V_x(k), V_y(k), V_z(k)$ — дискрети відповідних диференціальних спектрів, t_w — інтервал часу на часовій сітці від початку до кінця спостереження, k — номер дискрет $k = 0, 1, 2, \dots, k_{\max}$.

Застосування диференціальних перетворень (2), (3) дає низку переваг:

- результат розрахунку є не сітковою, а кусково визначеною на відрізках між вузлами функцією, що дозволяє проводити прогноз, не прив'язуючись до застосування процедури інтерполяції;

- значно спрощується створення обчислювальних систем з адаптивним кроком за рахунок відсутності строгої необхідності розрахунку на рівномірній часовій сітці.

Для імітаційного моделювання були взяті початкові параметри руху реально діючого КО «Міжнародна космічна станція» станом на 26.08.2011 [<http://spaceflight.nasa.gov>]. У результаті моделювання з використанням програмного пакета Maple було отримано сукупність даних, що містила в собі 100 векторів вимірювань, кожен з яких складається з одиничних дискретних значень азимута ε і кута місця β . Похибки вимірювання кутових координат оптичних засобів ККП становили $\sigma_\varepsilon = \sigma_\beta = 1'' (0.48 \cdot 10^{-5}$ рад).

Дослідження проводились у діапазоні одного мірного витка, результат комп'ютерного моделювання, наведений на рис. 2, визначений часом спостереження як кожним ОЗС окремо, так і при їхній спільній роботі. Відповідно до уточнених значень вектора початкових параметрів руху (1) криві, показані на рис. 2, характеризують похибку положення та швидкості у ГАСК.

ВИСНОВКИ

Для вирішення проблеми оперативного отримання точних балістико-навігаційних даних про КО в умовах неможливості комплексного застосування різнотипних вимірювальних засобів за-

пропоновано обробку вимірювань кутових параметрів об'єктів спостереження, отриманих ОЗС у складі великобазового комплексу, проводити з використанням динамічної моделі руху за допомогою апарату диференціальних перетворень. Одночасний розв'язок багатоточкової крайової задачі у часі і просторі вимірювань зі всіх ОЗС з використанням багатовимірних диференціальних перетворень дозволить підвищити оперативність розв'язку задачі за рахунок зменшення кількості арифметичних операцій, спростити її при обранні складної моделі руху КО, а також підвищити точність визначення параметрів руху КО завдяки надмірності вимірювальної інформації та отримання даних про КО з різних, суттєво рознесених просторових напрямків.

За результатами аналізу імітаційного моделювання можна стверджувати, що точність визначення поточного положення КО в БпОК залежить від бази між вимірювачами, часу спостереження, а також точності розрахунків наближених початкових даних для другого ОЗС та кінцевого методу оцінювання визначених параметрів.

Таким чином, у рамках досліджень запропоновано підходи до оперативного (в межах одного витка) визначення параметрів руху КО в БпОК за допомогою математичного апарату диференціальних перетворень [6, 7], що дає змогу підвищити точність шуканих результатів у середньому у 4.5 рази порівняно з автономним ОЗС.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку оптимальних планів використання наявних оптичних засобів для отримання максимальних точнісних характеристик визначення параметрів руху КО та мінімальному застосуванню технологічного ресурсу.

1. Андреев Ф. М., Ковбасюк С. В. Возможности многопозиционного комплекса, созданного на базе национальных РЛС надгоризонтного обнаружения баллистических и космических объектов // Космічна наука і технологія. — 2009. — № 5. — С. 74—81.
2. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2008—2012 роки [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.nkau.gov.ua/nsau/catalogNEW>.
3. Ковбасюк С. В., Каневський Л. Б. Метод оперативного визначення параметрів руху космічного апарату оптичними засобами спостереження // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць. — Житомир: ЖВІ НАУ, 2012. — № 5. — С. 133—140.
4. Ковбасюк С. В., Писарчук О. О., Пономарьов Ю. В. Алгоритм визначення параметрів орбіт космічних апаратів за вимірами кутових координат // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць. — Житомир: ЖВІРЕ, 2006. — № 10. — С. 34—40.
5. Нахмансов Г. С. Обработка широкополосных сигналов в многопозиционных радиосистемах // 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». — Харьков: ХНУРЕ, 2011. — Т. I (Ч. 1). — С. 252—255.
6. Пухов Г. Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов. — К.: Наук. думка, 1986. — 159 с.
7. Пухов Г. Е. Дифференциальные спектры и модели. — К.: Наук. думка, 1990. — 184 с.
8. Саваневич В. Є. Моделі та методи обробки даних при виявленні та оцінці параметрів траєкторій компактної групи малорозмірних космічних об'єктів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Харків: Харків. нац. ун-т радіоелектроніки, 2006. — 38 с.
9. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. — М.: Наука, 1989. — 432 с.

Надійшла до редакції 15.03.12

S. V. Kovbasiuk, L. B. Kanevskyi

A METHOD OF TRAJECTORY PROCESSING FOR SPACECRAFTS IN MULTIPositional OPTICAL COMPLEX

We propose a method of the application of outer space monitoring optical means for the operative determination of spacecraft movement parameters with extended precision for the benefit of a national user of ballistic-navigational data. The main consideration is given to mathematical support of the cooperative processing of trajectory data during the multipositional optical complex development.