УДК 629.78

А.О. Ткаченко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПЕРВИННЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДАНИМИ ВИМІРЮВАНЬ ОПТИЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ В РЕЖИМІ „BEAM-PARK"

Наведені результати первинного визначення параметрів руху низькоорбітальних космічних об'єктів, що спостерігалися оптичними засобами Одеської астрономічної обсерваторії в режимі «beam-park» (нерухомого телескопу), з використанням багатоетапного методу, що заснований на апроксимації результатів спостережень круговою моделлю. Показна доцільність використання методу при ототожненні результатів вимірювань з даними каталогів космічних об'єктів.

космічний об'єкт, оптичні спостереження, первинне визначення параметрів орбіти

Постановка проблеми

Вирішення задач контролю космічного простору (ККП) в Національній системі контролю і аналізу космічної обстановки (СКАКО) здійснюється на підставі даних національних засобів спостереження, одними з яких є оптичні засоби (ОЗ). Основним напрямком застосування ОЗ є спостереження поодиноких космічних об'єктів (КО) на високих орбітах при наявності цілевказівок для наведення оптичних інструментів. Контроль КО на низьких орбітах здійснюють національні радіолокаційні станції (РЛС), які використовують для зондування космічного простору радіохвилі метрового діапазону. Однак сучасні КО здебільшого мають невеликі габарити, що робить їх фактично непомітними для РЛС. Тому є актуальним вирішення питань залучення ОЗ до виявлення і спостереження низькоорбітальних КО. Для цього необхідно розробляти методики масового спостереження КО без цілевказівок, а також алгоритмів обробки результатів вимірювань. Фахівцями Одеської астрономічної обсерваторії запропонована методика проведення спостережень в режимі «beam-park» (нерухомий телескоп) [1], яка дозволяє отримувати дані про параметри руху всіх КО, що знаходяться у зоні огляду ОЗ, незалежно від висоти орбіти без залучення початкових даних (цілевказівок). Реалізація такої методики дозволить використовувати ОЗ при виявленні та первинному визначенні орбіт КО на будь-яких висотах.

Первинне визначення орбіти є однією з найбільш складних задач в процесі супроводження КО, оскільки відсутність початкових даних щодо параметрів орбіти не дозволяє використовувати універсальні числові методи. Тому методи первинного визначення орбіти, як правило, ґрунтуються на закономірностях динаміки польоту КО та суттєво залежать від складу вектору вимірювань [2].

Особливістю оптичних вимірів, отриманих в ході експерименту в режимі «beam-park», є відносно невеликий (15 – 120 сек) час спостереження КО, тобто ділянка орбіти, що спостерігається, складає 0,25 – 0,2% орбіти КО. При цьому використання відомих методів первинного визначення орбіт (Лапласа, Гауса і т.д.) практично неможливе внаслідок значних похибок цих методів на надкоротких дугах [3].

В таких умовах, зважаючи, що 80% низькоорбітальних КО мають ексцентриситет орбіти до 0,02, може застосовуватись багатоетапний метод первинного визначення орбіти КО за вимірами кутових координат, що заснований на апроксимації результатів спостережень круговою моделлю та послідовній оцінці площинних (нахил орбіти I та довгота висхідного вузла Ω) та внутрішньоплощинних параметрів (період обертання T та аргумент широти U). В роботах [4, 5] наведений алгоритм методу та проведений аналіз точнісних характеристик методу для геосинхронних та низькоорбітальних КО.

Метою статті є аналіз результатів експериментального відпрацювання багатоетапного методу первинного визначення орбіти КО за даними оптичних вимірювань, отриманих в режимі «beam-park».

Результати досліджень

В ході експерименту на інтервалі спостереження $t_н \approx 1$ година загалом було отримано 39 серій вимірів кутових координат по 39 низькоорбітальних КО. Тривалість спостереження кожного КО склала від 15 до 123 сек., при цьому в серіях було отримано від 3 до 10 векторів вимірюваних параметрів. Отримані серії вимірювань були ототожнені з КО, дані про параметри орбіт яких містяться у відкритих каталогах NORAD [6]. Дані каталогу NORAD вважалися еталонними. Для ототожнення був обраний каталог, актуальний на день проведення вимірювань, який містив координатну інформацію по 11 462 КО.

Ототожнення проводилось по критерію сукупного кутового відхилення між виміряним та екстрапольованим (на підставі даних каталогу) на момент вимірювання напрямками на КО

© А.О. Ткаченко

$$\left(\sum_{j=1}^{W}\left|\bar{y}_j - \bar{p}_{ij}\right|\right) = C_i, \qquad (1)$$

де C_i – показник „наближення" орбіти i-го КО до вимірів; $\bar{y}_j = \begin{vmatrix}\alpha_j \\ \beta_j\end{vmatrix}$ – j-й вектор результатів вимірювань; α_j, β_j – виміряні значення азимуту та кута місця відповідно; $\bar{p}_{ij}$ – вектор екстрапольованих параметрів вимірювань на момент j-го виміру за даними про параметри орбіти i-го КО; W – кількість вимірів в серії.

Серія вимірів вважалась ототожненою з f-м КО ($f \in K$, K – множина КО каталогу), якщо його показник C_f є найменшим серед всіх КО каталогу, а найближчий до C_f показник n-го КО C_n ($n \neq f$) не менше ніж в ψ разів більше за C_f, тобто за умови

$$C_f \le \psi C_n; \qquad (2)$$

$$f = \arg\min_{(i\in K)} C_i; \quad n = \arg\min_{(i\in K,\ i\neq f)} C_i.$$

В результаті ідентифікації 35 серій вимірів були ототожненні з об'єктами каталогу (при $\psi = 2$), в 4 серіях рішення щодо ототожнення не було прийняте. В цих серіях „претендентами" були низькоорбітальний (з радіус-вектором $|\bar{R}| \approx 7000$ км) та навігаційний КО ($|\bar{R}| \approx 20000$ км). Це стало можливим внаслідок дуже короткого інтервалу спостереження, на якому не є відчутною різниця в швидкості видимого руху КО на різних висотах.

Обробка результатів вимірювань з метою первинного визначення орбіти КО, що спостерігався, проводилась з використанням багатоетапного методу [4]. Для кожної серії вимірів отримані оцінки параметрів орбіти $\hat{\bar{X}} = \left(\hat{I}, \hat{\Omega}, \hat{T}, \hat{U}\right)$. На рис. 1 наведені значення відхилення оцінок параметрів від еталонних (з каталогу) значень

$$\Delta y = \hat{y} - y(\bar{X}_э), \ (y = I, \Omega, T, U),$$

де $y(\bar{X}_э)$ – параметри еталонної орбіти.

Аналіз даних рис. 1 показав, що похибки кутових параметрів не перевищують $0{,}2°$ (при $t_н > 40$ сек), а при $t_н < 30$ сек (такі серії на рис. 1 знаходяться в зоні обмеженою пунктиром) ці похибки різко зростають до одиниць градусів.

Середні квадратичні відхилення (СКВ) оцінок параметрів (при $t_н > 40$ сек):

$\sigma(I) = 0.11°$, $\sigma(\Omega) = 0.16°$, $\sigma(U) = 0.2°$, $\sigma(T) = 23"$,

а при $t_н < 30$ сек :

$\sigma(I) = 0.89°$, $\sigma(\Omega) = 1.2°$, $\sigma(U) = 0.83°$, $\sigma(T) = 36"$.

При цьому остаточна нев'язка вимірювань в середньому становила $|\Delta\bar{y}| = 0.07°$. Значення $|\Delta\bar{y}|$ для кожної серії наведені на рис. 2.

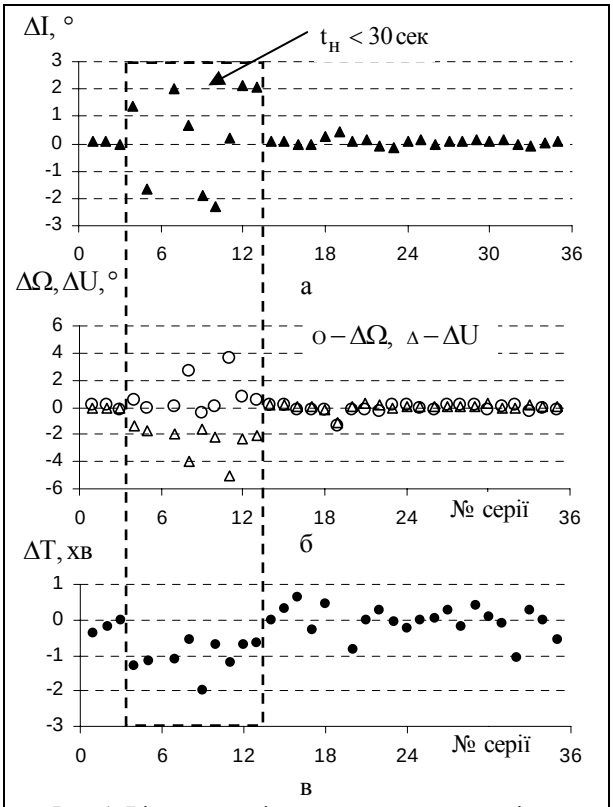

Рис. 1. Відхилення від еталонних значень оцінок параметрів орбіти: нахилу (а), довготи висхідного вузла та аргументу широти (б), періоду (в)

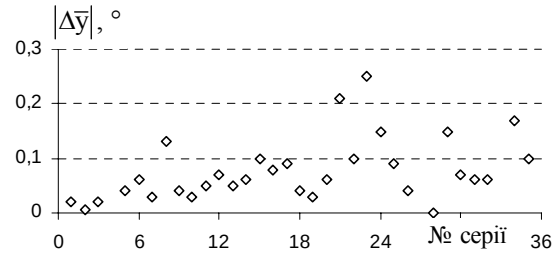

Рис. 2. Остаточна нев'язка вимірювань

Слід відзначити, що при $t_н > 40$ сек оцінене положення КО мало похибку по відношенню до еталонного не більше 30 км, а відстань до іншого найближчого КО була більшою в 3...20 разів за цю величину. Враховуючи цей факт, в якості додаткового критерію ототожнення запропоновано використовувати лінійну відстань між оціненим положенням КО $\hat{\bar{R}}$ та екстрапольованим на момент оцінювання $\bar{R}_i$,

$$f = \arg\min_{(i\in K)} \Delta R_i, \quad \Delta R_i = \left|\bar{R}_i - \hat{\bar{R}}\right|. \qquad (3)$$

Використання критерію (3) дозволило прийняти однозначне рішення щодо ототожнення всіх серій вимірювань за рахунок того, що оцінка радіус-вектора об'єкта дозволила обмежити діапазон можливих висот орбіт КО.

Висновки

Таким чином, результати експериментального відпрацювання багатоетапного методу первинного

визначення параметрів руху КО стосовно низьких орбіт по результатам оптичних спостережень в режимі «beam-park» дозволили визначити нижню межу інтервалу спостережень в цьому режимі, яка складає ≈40 сек. При цьому СКВ похибок оцінок кутових параметрів орбіти не перевищують $0,2°$, а періоду – $23"$. При ототожненні вимірів з даними каталогу КО доцільно використовувати первинні оцінки параметрів руху, зокрема, оцінку радіус-вектора КО. Використання методики спостереження в режимі „beam-park" [1] та алгоритму первинного визначення параметрів орбіти [3] дозволяють організувати залучення ОЗ до масового спостереження та виявлення низькоорбітальних КО (при виконанні астробалістичних та метеорологічних умов проведення оптичних спостережень).

Список літератури

1. *Сухов П.П., Волков С.К., Карпенко Г.Ф., Губин Е.Г., Титенко В.В., Ямницкий В.А., Ткаченко А.А. О применении широкопольных линзовых объективов для задач ККП [Электр. ресурс]. – Режим доступа: http://www.lfvn.astronomer.ru/main/report.htm*

2. *Брандин В.Н., Васильев А.А., Куницкий А.А. Экспериментальная баллистика космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.*

3. *Саврасов Ю.С. Методы определения орбит космических объектов. – М.: Машиностроение, 1981. – 174 с.*

4. *Деденок В.П., Ткаченко А.А. Определение параметров околокруговых орбит космических объектов по измерениям угловых координат в условиях отсутствия априорной информации // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ? 2003. – Вип. 6. – С. 3-12.*

5. *Ткаченко А.А. Погрешности многоэтапного метода первоначального определения параметров орбиты при обработке результатов оптических наблюдений низкоорбитального околокругового космического объекта // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2007. – Вип. 9 (67). – С. 95-97.*

6. *Сайт CelesTrak (NORAD) [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: http://www.celestrak.com/NORAD/elements.*

Надійшла до редколегії 3.12.2007

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

якості поляризаційних відмінностей доцільним є використання статистичних закономірностей розподілу в багатомірному просторі поляризаційних векторів (ПВ) об'єктів різних класів, а також ПВ АШЗ,