

УДК 521.6:629.78.015.016.4

М.В. Бровко, аспір.

І.О. Ємельянова, нач.гр.

П.Г. Хорольський, с.н.с.

Державне конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля

## ОЦІНКА ПОМИЛОК ПРОГНОЗУ ОРБИТ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДАНИМИ КАТАЛОГІВ NASA

(Представлено д.т.н., проф. Грабаром І.Г.)

*Ця робота присвячена вирішенню задачі визначення якості довільного каталога параметрів руху космічних об'єктів на прикладі Internet-каталога NASA.*

Прогноз орбит космічних об'єктів (КО) зараз використовується в багатьох технічних додатках. Найбільш повні каталоги КО, що спостерігаються, є в США та РФ. Природно, що параметри орбит тих самих КО у різних каталогах різняться [1]. Основною причиною такої різниці є похибки визначення параметрів орбит КО, які включають помилки вимірів, оцінювання та прогнозування на момент представлення даних у каталозі.

Перші дві групи помилок визначають похибку початкових умов руху (ПУР). Помилка прогнозу визначається помилкою реалізації методу розрахунку траєкторії КО, зокрема, використовуваної моделі руху, та помилками параметрів моделі. Усі розглянуті похибки незалежні.

Особливістю каталога КО може бути представлення даних адаптованих до деякої моделі руху, наприклад, з метою підвищення точності прогнозу за його даними. В цьому разі зазначені похибки, взагалі, не можна розглядати як незалежні.

Для проведення коректних розрахунків на основі якого-небудь каталога необхідно знати якість його даних, в нашому випадку – їх точність. Для цього необхідно мати набір еталонних даних як бази для порівняння. При їх відсутності оцінка якості, у загальному випадку, буде неточною, особливо, якщо досліджувані дані адаптовані до цієї моделі, оскільки необхідно врахувати також і невідому похибку цієї моделі.

Тому в цій статті ставиться завдання розробки методики оцінки якості довільного каталога параметрів орбит КО за умов відсутності еталонних даних та при невідомій методології його формування. Таке завдання актуальне для України, яка має безсумнівні інтереси у космосі і має на дійсний момент тільки параметри орбит лише свого першого супутника "Січ-1".

Оцінці якості каталогів РФ та США присвячені деякі роботи [1, 2, 3], але в них передбачається обробка первинних даних відомого для дослідження походження.

Оцінка якості даних каталога КО регулярно проводиться у системах контролю космічного простору [4, 1]. Однак тільки автори каталога в змозі точно визначити якість його даних, оскільки спираються на первинні виміри пунктів спостереження. Тому задача у тій постановці, що розглядається, ще потребує вирішення.

Нехай дані параметри орбит КО  $\{\bar{\Pi}_i, i = \overline{1, N}\}$ , де  $t_i, \bar{\Pi}_i$  – час та відповідний йому вектор параметрів орбіти  $i$ -го КО,  $N$  – число каталогізованих об'єктів. Неповторювана сукупність ідентифікаторів КО і параметрів їх орбит відомої структури, відповідної певному джерелу даних і приведення на якийсь момент часу, створює каталог.

Розглядаючи  $\bar{\Pi}_i(t_i)$  як узагальнений вимір  $i$ -го КО [2], в основу методики оцінки якості природно покласти статистичну обробку таких вимірів і якість оцінювати за величинами систематичного зсуву (вибіркового математичного очікування)  $M$  і середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  [2, 3], а також кореляції нев'язок прогнозованих і відповідних моменту  $t_i$  значень з каталога компонент вектора  $\bar{\Pi}_i$ .

$$\Delta \bar{\Pi}_i(t_i) = P(\bar{\Pi}_i(t_i - \Delta t_i), \Delta t_i) - \bar{\Pi}_i(t_i), \quad (1)$$

де  $P(\bullet)$  – функція прогнозу вектора параметрів орбіти  $\bar{\Pi}_i(t_i)$  уперед на інтервал часу  $\Delta t_i$ ;

$\Delta t_j$  – інтервал часу між суміжними даними каталога.

Нагадаємо, що ці оцінки, як відзначалося вище, характеризують якість власне даних  $\overline{P}_i(t_j)$ , але не містять інформації про модель, яка використана для одержання наведених даних.

Для визначення моделі руху, погодженої (яка має мінімальне відхилення) часової послідовності  $\overline{P}_i(t_j)$ , використаємо наявність достатньо великої часової послідовності каталогів даних руху КО. Це можна здійснити шляхом проведення відомої у балістико-навігаційному забезпеченні космічних апаратів [2] операції узгодження моделей руху, що полягає в адаптації параметрів моделі до часового ряду вимірів оптимізацією якогось критерію  $I$ :

$$\{P_j, \overline{S}_j\} = \min_{j=1, \dots, K, i=1, \dots, m} I(\Delta \overline{P}_i^j(t_j)), \quad (2)$$

де  $P_j, \overline{S}_j$  – функція прогнозу і параметри для  $j$ -ої моделі;

$K$  – кількість розглянутих моделей руху;

$m$  – кількість вимірів часового ряду;

$i, j$  – індекси порядкових номерів КО у каталозі і номера моделі відповідно.

Наступні особливості методики пов'язані з:

- видом критерію оптимізації і при адаптації моделей;
- методом адаптації (оптимізації);
- вибором обмеженої множини моделей руху КО, що адаптуються;
- відомими конкретними особливостями каталога КО.

Очевидно, що критерій оптимізації повинен мати точністний характер.

Оцінки точності  $M$  та  $\sigma$  утворюють векторний критерій, який незручний для практичного застосування, тому його необхідно привести до скалярного виду, що можна реалізувати двома шляхами:

- прийняти

$$I = I_1 = \sigma, \quad (3)$$

а систематику  $M$  враховувати як постійні поправки. Однак цей підхід виправдовує себе при достатньо точних оцінках  $M$ , які будуть залежати, як показано далі, від достатньо погано прогнозованих параметрів сонячної активності;

- визначити  $I$  як функцію  $M$  та  $\sigma$ , що виправдано при недостатній точності визначення  $M$ , і в нашому випадку як критерій прийнята середня помилка:

$$I = I_2 = \sqrt{M^2 + \sigma^2}. \quad (4)$$

Вибір критерію визначається досвідом досліджень та евристичними міркуваннями. Оскільки критерій  $I_2$  використовується до кожної компоненти вектора параметрів руху, то його векторний характер не усунуто, хоча розмірність і зменшена вдвічі.

Оскільки на практиці важливо контролювати точність декількох компонент  $\overline{P}_i$ , і, до того ж, їх склад та важливість залежать від конкретних розв'язуваних задач, має сенс зберегти по компонентні оцінки критерію:

$$I_{ji} = I_j(\overline{P}_i), \quad i = \overline{1, 6}, \quad j = 1 \vee 2. \quad (5)$$

Для прийняття рішення необхідно упорядкувати  $I_{ji}$  за важливістю компонент  $\overline{P}_i$  та рішення про вибір моделі, якщо воно не очевидно, прийняти на евристичних підставах.

Вибір моделей руху КО визначається характером і параметрами їх орбіт, а також залученням додаткової апіорної інформації – і він буде стосуватися вибору числа гармонік, що враховуються, гравітаційного потенціалу Землі (ГПЗ), моделі атмосфери, врахування місячно-сонячних збурювань та світового тиску. В залежності від об'єму каталога можуть виникнути додаткові вимоги у часті обмеження потрібних ресурсів ЕОМ (пам'яті та швидкодії).

Торкаючись методу адаптації, можна сказати, що у нашому випадку, оскільки множина розглянутих моделей дискретна і обмежена, достатньо використати прямий перебір варіантів.

Далі множина моделей може бути обмежена шляхом перевірки на однорідність вибірки по  $M$  і  $\sigma$  з використанням  $t$ -критерію Стьюдента та критерію Фішера.

Звернемося тепер до врахування особливостей каталогів КО. У каталогах РФ та США кількість об'єктів перевищує 6000 [1]. Серед усіх КО можна виділити групу активних КА, орбіти яких відображають поточні інтереси людини у космосі. Серед активних КА необхідно виділити групу об'єктів, що маневрують, як правило, на основі додаткової некоординатної інформації та шляхом ідентифікації стрибкоподібних змін траєкторії польоту. Цю групу необхідно виключити з розгляду, оскільки невідомі їх закони активного управління рухом.

Послідовний у часі ряд каталогів ПУР КО дозволяє одержати часові ряди параметрів руху, які вважаються незалежними для різних моментів часу. В той же час можна виділити групи об'єктів, які мають схожі орбіти, наприклад, близькі до кругових на низьких висотах. Якщо відомі їх параметри на якийсь момент часу, то ми маємо достатньо великі вибірки ізохронних незалежних вимірів.

На практиці в системі контролю космічного простору орбіти різних за важливістю КО уточнюються в каталогах з різною періодичністю, замінюючи їх параметри руху в поточних каталогах прогнозованими значеннями. Тому значення компонент часового ряду перетерплюють стрибкоподібні зміни кореляції сусідніх даних, яку необхідно врахувати в обробці, що, зрозуміло, її ускладнює і потребує додаткових досліджень. Оцінки, що проводяться для ізохронних вибірок порівняно великих об'ємів, позбавлені цього недоліку.

Таким чином, дослідження повинні бути проведені для великих асамблей траєкторій КО. Велика кількість КО в каталогах дозволяє без особливих методичних зусиль та обчислювальних витрат отримувати оцінки якості каталогів на основі ізохронних вибірок, якими ми в даній роботі обмежимося.

Враховуючи істотний вплив на щільність атмосфери зміни сонячної активності, необхідно врахувати часовий фактор і одержати оцінки для кількох рівнів активності в межах її 11-літнього циклу: мінімуму, максимуму і проміжного значення.

Для апробації запропонованої методики були використані дані Internet-каталогів NASA у вигляді так званих TLE (дворядкових)-файлів. Ці каталоги оновлюються не менше двох разів на добу. Для прогнозу за цими даними рекомендується використовувати вільно розповсюджену програму TRAKSTAR2.

ПУР каталогів враховують гальмування КО і не містять даних про поточну сонячну активність, до того ж TRAKSTAR2 їх також не використовує. На підставі такого аналізу структури каталогів можна зробити висновок про врахування в моделі прогнозу цієї програми статичної атмосфери, що і підтверджується її описом.

Необхідно відзначити, що моделей точного прогнозу сонячної активності на даний момент не існує, тому для прогнозів на інтервали часу більше однієї доби, особливо в умовах високої сонячної активності, можливо можуть мати місце надзвичайно великі непрогнозовані помилки.

Вторинним результатом апробації методики стало одержання оцінок точності прогнозу TRAKSTAR2 на інтервалі більше однієї доби, в даному випадку – двотижневому. Величина інтервалу була обрана, виходячи з практики проведення балістико-навігаційного забезпечення КА "Січ-1".

В обробку бралися КО на навколосезонних орбітах з ексцентриситетом  $e < 10^{-2}$  та висотами у діапазонах 200–500 км, 600–800 км, 1000–1200 км.

Таке поєднання у генеральну сукупність різновисотних КО пояснюється близькістю висот і однаковим часом прогнозу, що забезпечує близькість похибок прогнозу, а також тим, що на висотах до ~ 800 км суттєвий вплив похибки прогнозу щільності атмосфери. На висотах порядку 1000–1500 км мова фактично вже йде про вплив атмосфери на рівні молекул.

Таким чином, отримані оцінки мають усереднений за висотою характер і дозволяють розрізнити особливості впливу атмосфери.

Вибір прийнятих діапазонів висот пояснюється наступним. Висоти 200–500 км характеризуються відносно великою для польотів космічних об'єктів щільністю атмосфери і є в цьому змісті визначальними для розрахунку часу їх існування. На висотах понад 1000 км починає виявлятися вплив світового тиску, який порівнюється із впливом атмосфери.

Висоти 600–800 км є найбільш заселеними КО, дуже привабливі для сонячно-синхронних орбіт, які використовуються КА дистанційного зондування Землі, на яких спеціалізується Україна, і тут вплив атмосфери не настільки істотний, як в першому діапазоні висот, але ще не виявляється вплив світового тиску, дані для розрахунку якого також відсутні в ПУР TLE-файлів.

Модель руху TRAKSTAR2, згідно з її Internet-опису, що складається з чотирьох окремих моделей, враховує до 8 гармонік розкладання ГПЗ по сферичних функціях.

Для апробації методики використовувались моделі руху, що враховують в розкладанні ГПЗ від 4 до 16 зональних, секторіальних та тессеріальних гармонік, а також варіанти моделей атмосфери: статичну (стандартна ГОСТ 4401-81 та CIRA-61) і динамічну (ГОСТ 25645-84) з використанням фактичних середньорічних і середніх параметрів сонячної активності  $F_{10.7}$  та геомагнітної напруженості  $A_p$  на дату початку прогнозу.

Середні параметри  $F_{10.7}^c$  та  $A_p^c$  спеціально підбиралися для отримання найбільш точного прогнозу. Фактичні добові параметри  $F_{10.7}^c$  та  $A_p^c$  приймалися постійними на всьому інтервалі прогнозу.

В результаті досліджень були визначені набори моделей, що мають найкращі результати для розглянутих діапазонів висот.

З метою їх уніфікації для всього діапазону висот 200–1500 км була вибрана єдина модель  $P_{4 \times 0}(F_{10.7}^c, A_p^c)$ , яка дала найкращі результати прогнозування для всіх розглянутих діапазонів висот і рівнів сонячної активності. Ця модель враховує динамічну атмосферу з використанням середніх параметрів сонячної активності та чотири зональних гармоніки розкладання ГПЗ.

Оцінка точності прогнозування проводилась за наступними параметрами:

- період обігу ( $\Delta P$ );
- ексцентриситет ( $\Delta e$ );
- аргумент широти КО ( $\Delta U$ );
- нахилення ( $\Delta i$ );
- довгота висхідного вузла ( $\Delta \Omega$ ).

Для порівняння проводився аналітичний прогноз із використанням TRAKSTAR2. Результати оцінок наведені у таблицях.

Таблиця 1

Середня помилка прогнозування орбіт КО

Модель	$\Delta P, *10^{-1}$ сек.	$\Delta e, *10^{-4}$	$\Delta U,$ град.	$\Delta i, *10^{-2}$ град.	$\Delta \Omega,$ град.
Діапазон висот 300–500 км					
$P_{4 \times 0}(F_{10.7}^c, A_p^c)$	2,90	6,18	4,06	8,0	0,042
TRAKSTAR2	2,90	1,37	3,68	3,4	0,023
Діапазон висот 600–800 км					
$P_{4 \times 0}(F_{10.7}^c, A_p^c)$	9,00	2,59	0,42	3,1	0,022
TRAKSTAR2	8,00	0,75	0,10	3,1	0,023
Діапазон висот 1000–1200 км					
$P_{4 \times 0}(F_{10.7}^c, A_p^c)$	0,18	1,57	0,51	0,21	0,0049
TRAKSTAR2	0,04	0,86	0,05	0,21	0,0072

Таким чином фіксований характер параметрів сонячної активності підтверджує використання у TRAKSTAR2 статичної моделі атмосфери (різниця тільки в її параметрах).

Ті ж обставини і підвищений, в порівнянні з TRAKSTAR2, рівень помилок прогнозу  $P_{4 \times 0}(F_{10.7}^c, A_p^c)$  дозволяють з високою долею впевненості говорити про те, що дані TLE-файлів не є первинними, а здобуті шляхом їх адаптації до моделі руху цієї програми. Щоб достовірно підтвердити цей висновок можна запропонувати наступні методичні рішення: перекодувати у форматі TLE-файлів відомі параметри орбіт КА, отримані за первинними вимірами, і провести

за ними оцінку якості прогнозу TRAKSTAR2. Використання чотирьох зональних гармонік також не суперечить моделі руху TRAKSTAR2.

Таким чином, розроблена методика оцінки якості (точності) каталогів ПУР на прикладі даних Internet показала свою працездатність, дозволила одержати оцінки точності даних каталогів на основі TLE-файлів і зробити висновки про їх характер.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оцінку точності даних для інтервалів прогнозу більшої тривалості та інших типів орбіт.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Андреев О.В., Вениаминов С.С., Дикий В.И., Завалин В.Н. Каталог космических объектов российской системы контроля космического пространства // Космонавтика и ракетостроение. – 2000. – № 18. – С. 40–49.
2. Бажинов И.К., Ястребов В.В. Навигация в совместном полете космических кораблей "Союз" и "Аполлон". – М.: Наука, 1978. – 224 с.
3. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978. – 348 с.
4. Хуторовский З.Н. Ведение каталога космических объектов // Космические исследования. – 1993. – № 4. – С. 101–114.

БРОВКО Михайло Віталійович – аспірант Державного конструкторського бюро “Південне”.  
Наукові інтереси:

- дослідження проблеми техногенного засмічення навколоземного космічного простору;
- вдосконалення задач балістичного забезпечення виведення КА у космос;
- вивчення причин руйнування об’єктів штучного походження у космосі.

ЄМЕЛЬЯНОВА Ірина Олександрівна – начальник групи Державного конструкторського бюро “Південне”.

Наукові інтереси:

- вдосконалення задач балістичного забезпечення виведення КА у космос.

ХОРОЛЬСЬКИЙ Петро Григорович – старший науковий співробітник відділу Державного конструкторського бюро “Південне”.

Наукові інтереси:

- дослідження проблеми техногенного засмічення навколоземного космічного простору;
- вдосконалення задач балістичного забезпечення виведення КА у космос;
- вивчення причин руйнування об’єктів штучного походження у космосі.

Подано 24.09.2002