

С.В. Ковбасюк, к.т.н., с.н.с.

Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова

В.І. Стефанович

Служба зовнішньої розвідки України

## АЛГОРИТМ ОБ'ЄДНАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ПАРАМЕТРИ РУХУ КОСМІЧНОГО АПАРАТА В АКТИВНОМУ БАГАТОПОЗИЦІЙНОМУ РАДІОЛОКАЦІЙНОМУ КОМПЛЕКСІ

*Розглядається питання можливості підвищення точності визначення положення космічних апаратів за рахунок сумісної обробки інформації в активному багатопозиційному радіолокаційному комплексі на базі радіолокаційних станцій з автономним прийомом сигналів. Обробка інформації базується на розв'язку багатоточкової крайової задачі з використанням диференціальних моделей руху об'єктів.*

**Вступ.** Пріоритетність розвитку космічної діяльності для України визначається рядом факторів у галузях народного господарства, наукових досліджень тощо. Відповідно до Закону України “Про космічну діяльність”, III Національної (Загальнодержавної) космічної програми України на 2003–2007 рр. в Україні проводяться роботи з удосконалення і нарощування космічної інфраструктури, у тому числі й зі створення системи контролю і аналізу космічної обстановки (СКАКО).

Результатом роботи інформаційних джерел СКАКО повинен бути каталог космічних об'єктів, ведення якого зумовлене потребою високоточного балістико-навігаційного забезпечення планування застосування вітчизняних космічних апаратів (КА); оперативного виявлення КА, які виводяться на орбіти; оцінки космічного потенціалу іноземних держав тощо. Вихідна інформація існуючих радіолокаційних станцій (РЛС), дислокованих в Україні, які здійснюють безперервну розвідку космічного простору, характеризується низькими точнісними характеристиками і не задовольняє вимоги з ведення каталогу.

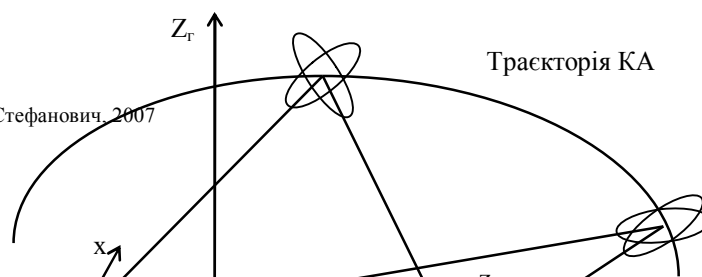
Необхідно зазначити, що більшість з перелічених задач характеризується значними обчислювальними витратами. Тому складність ведення каталогу КА полягає в отриманні в стислі строки балістико-навігаційних даних, від оперативності видачі й вірогідності яких залежить розв'язок задач користувачами інформації.

Таким чином, розробка нового методичного і математичного забезпечення для організації функціонування інформаційних засобів СКАКО з метою отримання високоточного оцінювання параметрів руху КА є проблемним питанням.

**Аналіз останніх досліджень.** Одним з перспективних шляхів удосконалення функціонування інформаційних засобів спостереження за КА є інформаційне об'єднання декількох відносно грубих автономних вимірювачів у багатопозиційні радіолокаційні комплекси (БП РЛК), де завдяки спільній обробці інформації про об'єкт спостереження досягається більш висока точність траєкторних розрахунків порівняно з однопозиційними.

Слід зазначити, що на даний час на практиці використовуються малобазові когерентні багатопозиційні радіолокаційні станції, які функціонують у пасивному або активно-пасивному режимі [1]. Перевагою створення некогерентного великобазового БП РЛК, який складається з автономних РЛС, є отримання кожною із складових комплексу вимірів всіх просторових координат незалежно від інших, відсутність вимог синхронізації роботи РЛС, використання великих баз та надлишкової інформації, що дає змогу підвищити точність визначення оцінок орбітальних параметрів.

Концептуально підхід до створення великобазових БП РЛК запропонований в [2]. Графічне пояснення переваги використання великих баз при вимірюванні кожним елементом комплексу всіх просторових координат КА, яке отримується за рахунок суттєвого зменшення об'єму результуючого еліпсоїду похибок оцінювання положення об'єкта порівняно з вихідними, представлено на рис. 1. Видно, що при порівняних величинах відстаней від РЛС до КА і баз між інформаційними засобами результуючий еліпсоїд похибок оцінювання просторових координат значно менший, ніж у окремій РЛС. Однак алгоритми обробки вимірювальної інформації при підході, запропонованому в [2], розроблені для випадку знаходження КА тільки в спільній зоні огляду простору кількох РЛС. Цей факт значно обмежує область їх застосування, не дозволяє ефективно використати всю вимірювальну інформацію від РЛС та потребує надлишкових економічних витрат на створення великих спільних зон дії радіолокаційних станцій при побудові БП РЛК.



Іншого недоліку – підвищеної обчислювальної складності відомих числових методів – в багатьох практичних задачах позбавитись можливо шляхом використання математичного апарата диференціальних перетворень [3]. В [4] запропоновано вдосконалений алгоритм оперативної і точної траєкторної обробки в РЛС супроводження КА на основі математичного апарата диференціальних перетворень. Відмітною рисою останнього є його орієнтація на впровадження в автономній РЛС.

**Формулювання цілей статті.** З аналітичного огляду існуючих алгоритмів траєкторної обробки для РЛС супроводження КА видно, що для отримання високоточної оцінки траєкторних параметрів КА необхідно в алгоритмі траєкторної обробки використовувати метод найменших квадратів, динамічну модель руху КА, а для оперативності розрахунку – метод Ньютона.

Таким чином, з усіх відомих підходів до проведення вдосконалення алгоритму траєкторної обробки в РЛС супроводження КА, виходячи із основного критерію – забезпечення максимальних (потенційних) точнісних характеристик оцінювання траєкторних параметрів КА, – задаючись критерієм мінімуму дисперсії проведеної оцінки, необхідно обрати підхід, що формулюється наступним чином: *використовуючи* динамічну модель руху КА (векторне диференціальне рівняння руху КА):

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = f(X), \quad (1)$$

де  $X = (x_i)^T$  – вектор параметрів руху КА, з  $i = 1 - 6$ ;

рівняння вимірювання (функціональну відповідність між параметрами, що вимірюються, та поточними параметрами руху КА):

$$Z = \varphi(X), \quad (2)$$

де  $Z$  –  $m$ -вимірний вектор параметрів, що вимірюються; вибірку вимірювань

$$Y = (y_1, \dots, y_{N \cdot m}), \quad (3)$$

з  $K_Y = \text{diag}(K_Y)$ , на  $T_N = (t_1, t_1 + T_{\text{огп}}, \dots, t_N - T_{\text{огп}}, t_N)$ ,

де  $N$  – кількість проведених вимірювань;

$m$  – кількість параметрів, що вимірюється;

$K_Y$  – кореляційна матриця похибок вимірювання;

$T_N$  – часова сітка, на якій проведені вимірювання,

*потрібно* із записаної на основі методу найменших квадратів багатоточкової крайової задачі

$$\hat{X}_0 = \arg \left\{ \min \left[ (Y - Z(X_0))^T K_Y^{-1} (Y - Z(X_0)) \right] \right\} \quad (4)$$

*знайти* методом Ньютона (6) оцінку вектора траєкторних параметрів КА  $\hat{X}_0$ :

$$X_0 = (x_{i0})^T, \quad i = 1 \dots 6, \quad (5)$$

$$X_0^{i+1} = X_0^i - \left[ \left( \frac{\partial Z}{\partial X_0} \right)^T \cdot K_Y^{-1} \cdot \frac{\partial Z}{\partial X_0} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial Z}{\partial X_0}^T \cdot K_Y^{-1} \cdot (Y - Z(X_0)) \Big|_{X_0^i}, \quad (6)$$

де  $\frac{\partial Z}{\partial X_0}$  – матриця часткових похідних від вимірювальних параметрів за вектором початкових умов руху КА.

**Метою** статті є удосконалення існуючого алгоритмічного забезпечення траєкторної обробки в інформаційних засобах розвідки космічного простору для проведення оперативного і точного визначення

траекторних параметрів КА за рахунок надлишкової радіолокаційної інформації при створенні активного багатопозиційного радіолокаційного комплексу на базі однотипних РЛС з автономним прийомом.

**Викладення основного матеріалу.** Питанням створення багатопозиційних систем та розробці математичного забезпечення для них присвячена достатня кількість робіт. В них аналізуються можливі наступні способи об'єднання інформації, отриманої з приймальних позицій:

– з об'єднанням радіосигналів високої та проміжної частоти на виході лінійної частини приймальних траєктів; система в цьому випадку повинна бути просторово когерентною, а для передачі інформації необхідно використовувати широкосмугові лінії з великою пропускну здатністю;

– з об'єднанням відеосигналів, що дозволяє дещо знизити вимоги до пропускну здатності ліній зв'язку, однак приводить до енергетичних втрат у відношенні сигнал–завада;

– з об'єднанням виявлених відміток (одичних вимірів координат), що значно зменшує вимоги до пропускну здатності ліній зв'язку, але призводить до подальшого збільшення енергетичних та інформаційних втрат;

– з об'єднанням траєкторій цілей, побудова яких здійснюється на кожній приймальній позиції, а в результаті спільної обробки відбраковуються хибні траєкторії і уточнюються параметри дійсних траєкторій; вимоги до пропускну здатності ліній зв'язку в цьому випадку мінімальні, але ефективність, як показує досвід, – невелика.

Пропонується вирішувати поставлене завдання – сумісну обробку вимірювальної інформації з декількох РЛС з метою оцінки параметрів орбіт КА – шляхом накопичення одичних вимірів координат КА з кожної РЛС, перерахованих до гринвіцької прямокутної системи координат, та розв'язання багатоточкової крайової задачі методом Ньютона.

Оцінка вектора траекторних параметрів КА  $\hat{X}_0$  в БП РЛК (рис. 1) буде знайдена згідно з виразом:

$$X_0^{i+1} = X_0^i - \left[ \sum_{j=1}^p \left( \frac{\partial Z_j^T}{\partial X_0} K_{Y_j}^{-1} \frac{\partial Z_j}{\partial X_0} \right) \right]^{-1} \left[ \sum_{j=1}^p \frac{\partial Z_j^T}{\partial X_0} K_{Y_j}^{-1} (Y_j - Z_j(X_0)) \right]_{X_0^i}, \quad (7)$$

де  $p$  – кількість РЛС в БП РЛК.

Для отримання найбільш оперативного алгоритму траекторної обробки для РЛС супроводження КА при розв'язку (7) скористаємось розробленими в [4, 5] підходами до проведення обчислення поточних параметрів руху КА і матриці часткових похідних від вимірювальних параметрів за вектором ПУ руху КА, які засновуються на застосуванні математичного апарата диференціальних перетворень [3, 6].

З врахуванням вищевикладеного обчислювальна схема алгоритму траекторної обробки в БП РЛК супроводження КА в постановці (7) може бути представлена у вигляді, що зображено на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм траєкторної обробки в БП РЛК

Запропонований алгоритм траєкторної обробки не потребує розбиття вимірювальної інформації на “хорошу” – з малими похибками вимірювання, та “погану” – з великими похибками вимірювання. При запропонованому підході чим більше вимірювальної інформації залучається до обробки, в тому числі і “поганої”, тим вища результуюча точність отриманої оцінки.

Оскільки вектор вихідної інформації алгоритму траєкторної обробки  $X_0$  є незміщеним та нормально розподіленим, його визначальною характеристикою точності є кореляційна матриця похибок оцінок траєкторних параметрів КА  $K_{X_0}$ , яку можна обчислити за допомогою залежності:

$$K_{X_0} = \sum_{j=1}^p \left( \frac{\partial Z_j^T}{\partial X_0} K_{y_j}^{-1} \frac{\partial Z_j}{\partial X_0} \right)_{X_0}^{-1} \tag{8}$$

Використання залежності (8) для визначення точнісних характеристик алгоритму траєкторної обробки (рис. 2) виявляється дуже зручним, оскільки ці характеристики обчислюються за однією реалізацією роботи алгоритму.

Запропонований алгоритм траєкторної обробки в БП РЛК супроводження КА з використанням методу багатомірних диференціальних перетворень для оперативного і точного визначення траєкторних параметрів КА потребує оцінки ефективності шляхом проведення математичного моделювання. Для можливості порівняння розглядався випадок сумішених зон дії РЛС. На рис. 3 представлено результати моделювання: залежність середньоквадратичної похибки оцінювання вектора просторового положення КА, нормованої до середньоквадратичної похибки окремої РЛС, від кількості РЛС  $p$  у складі БП РЛК. Штрихова крива відповідає випадку великобазового комплексу, суцільна крива – випадку розміщення РЛС в одному пункті.

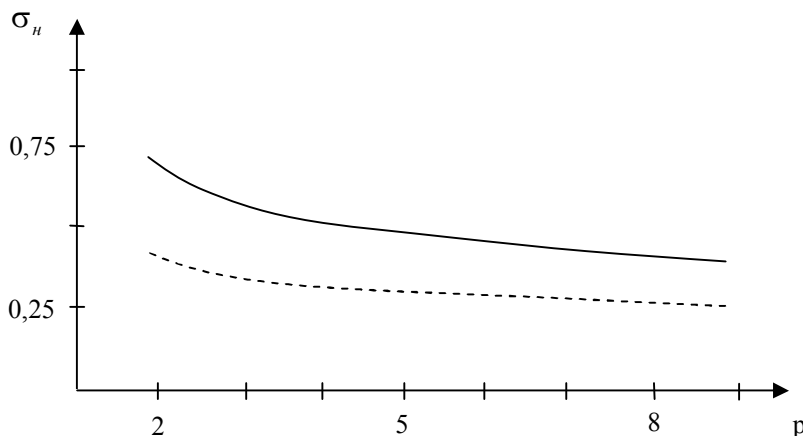


Рис. 3. Залежність похибки визначення положення КА від кількості РЛС

Аналіз наведених результатів показує перевагу від використання великобазового комплексу порівняно до малобазового. Треба зазначити, що подальші дослідження доцільно спрямувати на визначення оптимальної кількості РЛС в БП РЛК (з рис. 3 видно, що кількість РЛС чотири і більше не призводить до суттєвого збільшення точності визначення параметрів руху КА), а також їх оптимального розміщення. Розрахунок обчислювальних витрат показав, що використання багатомірних диференціальних перетворень дозволяє зменшити кількість арифметичних операцій у 3...4 рази порівняно з традиційними кінцево-різницевиими методами.

**Висновки.** Таким чином, в статті розглянуто алгоритм об'єднання вимірювальної інформації про параметри руху КА в активному багатопозиційному радіолокаційному комплексі СКАКО, який дозволяє підвищити точність і оперативність оцінок параметрів траєкторій об'єктів. Отриманий результат базується на наступному:

- використання великих баз між елементами БП РЛК дає змогу з найкращою ефективністю використати надлишкову інформацію, що дозволяє підвищити точність оцінок, які отримуються;
- отримання початкових умов руху КА шляхом розв'язання багатоточкової крайової задачі дає змогу вирішувати поставлене завдання в загальному випадку без обмежень, а використання всієї вимірювальної інформації призводить до підвищення точності оцінок;
- використання методу диференціальних перетворень дає змогу підвищити оперативність розрахунків порівняно з традиційними кінцево-різницевиими методами.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 415 с.
2. Ковбасюк С.В., Шестаков В.І. Оценивание точности определения пространственного положения лоцируемого объекта в многопозиционных РЛС // Известия ВУЗов / Радиоэлектроника. – 1999. – № 10. – С. 18–23.
3. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов. – К.: Наукова думка, 1986. – 159 с.
4. Ковбасюк С.В., Ракушев М.Ю. Прогнозирование неуправляемого движения космического аппарата методом дифференциальных преобразований // Двойные технологии. – 2003. – № 4. – С. 16–20.
5. Ковбасюк С.В., Ракушев М.Ю. Расчет частных производных от текущих элементов орбиты по начальным условиям движения космического аппарата на основе многомерных дифференциальных преобразований // Двойные технологии. – 2004. – № 2. – С. 15–18.
6. Баранов Г.Л., Баранов В.Л., Жуков І.А., Алексеева Л.О. Диференціальні перетворення для комп'ютерного моделювання: Навч. посіб. – К.: Нац. ав. ун-т, 2002. – 106 с.

КОВБАСЮК Сергій Валентинович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу науково-дослідного центру Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– наземні засоби космічної інфраструктури України.

Тел.: 25-84-03.

СТЕФАНОВИЧ Валентин Іванович – помічник начальника відділу служби зовнішньої розвідки України.

Наукові інтереси:

– розробка математичного забезпечення складних інформаційних систем.

Подано 06.03.2007