

ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ РУХУ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ В УМОВАХ ОДНОПУНКТНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ

О.М. Загорулько, В.В. Ожінський

(Національний центр управління та випробувань космічних засобів)

У статті розглянуті підходи до оцінювання точності проведення траєкторних вимірів в умовах однопунктної технології управління.

оцінювання точності, траєкторні виміри

Вступ. Задачі балістико-навігаційного забезпечення є одними з найбільш складних та ресурсномістких при управлінні космічними апаратами (КА). Визначення параметрів руху можливо умовно поділити на два етапи: первинної обробки, коли сигнали, які приймаються радіотехнічними чи оптико-електронними засобами, проходять обробку оптимальну з точки зору визначення координат КА та їх похідних; вторинної обробки, коли за цими даними з застосуванням математичного апарату небесної механіки визначаються і прогнозуються параметри руху КА.

Аналіз основних публікацій. Основний зміст теорії радіотехнічних методів вимірювання параметрів руху космічних об'єктів складають питання виділення сигналів в умовах дії збурень випадкового характеру [1 – 4]. Сучасний стан теорії методів виділення сигналів на фоні флуктуаційних перешкод можливо коротко характеризувати таким чином. З одного боку розробляються методи виділення сигналів, що є чисто випадковими процесами, які характеризуються певним законом розподілу (стохастичні сигнали). З іншого боку активно розвивається теорія фільтрації сигналів, основний зміст якої – виділення сигналів регулярного характеру із випадковими параметрами. Математичну основу такого підходу складає теорія оцінок випадкових величин чи процесів, що є розділом математичної статистики.

Формулювання цілей статті. Існуюча теорія космічних вимірювальних комплексів забезпечує вирішення основних задач, які ставляться перед ними, але їй властиві певні обмеження, тому вона не в повній мірі та не в усіх випадках дозволяє дослідити закономірності роботи комплексів, що, як наслідок, призводить до обмежень в вирішенні задач визначення параметрів руху КА, особливо при однопунктній технології управління. Для зменшення похибок випадкового характеру в такому випадку вибирається більша кількість вимірів, щоб зменшити їх вплив на результат вимірів та досягнути потрібної точності.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо загальну картину процесів визначення параметрів руху КА. Основною особливістю параметрів руху КА, тобто величин, які служать кінцевою метою процесу вимірювань, є їх сталість на всьому інтервалі вимірів. Характерно, що безпосередньо вимірювані величини в межах цього інтервалу змінюються досить швидко і в широких межах. Очевидно, що при швидкій зміні вимірюваних величин процес вимірювання ускладнюється.

При розгляді загальної картини процесів визначення параметрів руху КА необхідно використовувати такий опис усього механізму визначення умовно постійних величин, який не вимагав би застосування швидкозмінних топоцентричних координат і при якому весь процес визначення параметрів орбіт описувався в вигляді однієї – єдиної процедури вимірювання. При цьому необхідно зауважити, що абсолютно невірним буде розглядати подібний об'єднаний підхід, як практичну процедуру обробки вимірів. Більш того, розбиття процесу вимірювання на технологічно не пов'язані операції на практиці просто необхідно. Однак при теоретичному аналізованні об'єднаний підхід є корисним, тому що відрізняється мінімальним об'ємом вихідних обмежень та відсутністю будь-яких умов відносно методів вимірювання. Ці особливості запропонованого в статті підходу дають можливість достатньо повний та чіткий розгляд питань про потенційні можливості командно-вимірювальних засобів в умовах однопунктної технології та ряду інших питань, пов'язаних з підвищенням точності роботи методів, які застосовуються у вітчизняній практиці.

Як відомо, насправді параметри руху КА непостійні, з плином часу спостерігаються вікові, періодичні та випадкові зміни цих величин. Таким чином параметри руху є випадковими процесами, математичне очікування яких має віковий та періодичний хід, і для того, щоб правильно інтерпретувати результати вимірювань, необхідно мати уявлення про основні статистичні характеристики цих процесів, однією з яких є тривалість інтервалу кореляції. Значимість цього параметру полягає в тому, що він визначає допустиму тривалість процесу вимірювань, яка може бути досліджена.

При дослідженні флуктуацій КА для орбіт з параметрами: $H_{П1} = 357$ км, $H_{A1} = 2562$ км, $H_{П2} = 634$ км, $H_{A2} = 2583$ км, що направлені на визначення орбітального прискорення та автокореляційних функцій цих КА, отримані такі результати: для КА, з висотами від 350 до 630 км, інтервал кореляції флуктуацій знаходиться в інтервалі від величини трох меншої за добу до 2 діб [1].

Джерелом даних про параметри руху виступає поле сигналу, яким оперує командно-вимірювальний комплекс (КВК). Електромагнітне поле, яке використовується в КВК, є за своєю суттю складним хвильовим

процесом з флюктуючою фазою і амплітудою. Флюктуації параметрів цього процесу відбуваються завдяки, з одного боку, флюктуаційним явищам в самому генераторі, з іншого – випадковою неоднорідністю середовища, в якому цей процес розповсюджується. При цьому флюктуації, які викликані різними фізичними причинами, відрізняються своїми статистичними властивостями. Однак, враховуючи велику тривалість інтервалу спостереження і малу питому вагу швидких флюктуацій невеликої інтенсивності, можливо обмежитись тим, що параметри сигналу флюктують відносно повільно і, в подальшому, мова буде вестись саме про такий сигнал. Тому прийнятий сигнал в космічних радіотехнічних комплексах буде мати такий вигляд [2]:

$$s = s\{\alpha[r(q, t)], \beta, t\}, \quad (1)$$

де α – вектор параметрів сигналу, які змінюються регулярно; β – вектор параметрів сигналу, які є випадковими величинами чи випадковими процесами; q – вектор параметрів руху, які визначаються; r – поточна відстань між КА та КВК, як функція часу та параметрів руху.

Розглядаючи перешкоди, що діють на сигнал, як поля стаціонарні, однорідні та ізотропні, врахувавши те, що практично завжди ширина спектру шумових флюктуацій перевищує ширину спектру сигналу, будемо вважати, що завади мають рівномірний спектр («білий шум»), коефіцієнт часової кореляції яких в цьому випадку буде описуватись δ -функцією.

Тому функціонал густини ймовірності однорідного стаціонарного δ -корельованого випадкового поля буде визначатись формулою

$$\omega[n, r] = K e^{-\frac{1}{N_0} \int_V \int_0^T n^2(t, r) dt dV}, \quad (2)$$

де N_0 – питома спектральна густина флюктуацій, що дорівнює енергії, що розсіюється в одиничному об'ємі за одиницю часу; $n(t, r)$ – миттєве значення завади; K – коефіцієнт, що враховує кореляційну матрицю завад.

В найбільш загальному вигляді для сигналу з незалежно флюктуючими амплітудою і фазою відношення правдоподібності буде мати вигляд

$$l(y/q) = \prod_k \frac{N_0}{\mathfrak{E}_k + N_0} e^{\frac{1}{N_0} \frac{Z_k^2}{\mathfrak{E}_k + N_0}}, \quad (3)$$

де

$$Z_k = \frac{1}{2} \left| \int_T \int_V \dot{Y}(t, r) \dot{A}_a^*(t, r_a) dV dt \right|; \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_k = \int_T \int_V s^2(t, r) dV dt = \frac{1}{2} \int_T \int_V \dot{A} A_a^* dV dt, \quad (5)$$

де T_k – тривалість інтервалу кореляції флуктуацій амплітуди та фази; k – кількість інтервалів кореляції, що потрапляють в інтервал вимірювань. Можна відмітити, що визначення відношення правдоподібності зводиться до визначення просторово-часового кореляційного інтегралу виду (4).

Кореляційний інтеграл будь-якого вигляду складається із двох частин [4]:

$$Z = |Z_s + Z_n|, \quad (6)$$

одна з яких характеризує результат взаємодії прийнятого та опорного сигналів, а інша – результат взаємодії опорного сигналу з завадою. Перша складова

$$Z_s = \frac{1}{2} \int_T \int_V A A_a^* dV dt \quad (7)$$

носить назву автокореляційної функції сигналу (АКФ), друга складова

$$Z_n = \frac{1}{2} \int_T \int_V N A_a^* dV dt - \quad (8)$$

взаємокореляційної функції опорного сигналу та завади. При сильному сигналі друга складова мала в порівнянні з першою. Тому

$$Z \approx |Z_s| = \frac{1}{2} \left| \int_T \int_V A(t, r) A_a^*(t, r_a) dV dt \right|, \quad (9)$$

і про властивості кореляційного інтегралу можливо судити по властивостям автокореляційної функції сигналу (9). Дослідження автокореляційної функції при аналізі потенційної точності космічних вимірювальних комплексів цікаве та важливе тим, що їх отримані результати можна використати в прикладних задачах. На сучасному етапі в умовах однопунктної технології управління для статистичної обробки вимірювань поточних навігаційних параметрів з заданою точністю необхідно набирати велику кількість вимірів [3]. Тому досить гостро стоїть проблема зменшення кількості сеансів з вимірювання ПНП при заданій точності. Одним з варіантів застосування такого підходу є оцінювання інформативності різних ділянок траєкторії. Розглянемо найбільш простий випадок, будемо вважати, що космічний апарат рухається з постійною швидкістю V по прямолінійній траєкторії і що довжина відрізка траєкторії, на якому ведеться вимірювання, рівна $2VT$, де $2T$ – загальний час вимірювання. Така апроксимація вимірювальної ділянки вірна не завжди, але її можна застосувати для усіх існуючих на даний час вітчизняних КА. В якості параметрів руху

для визначення виступатимуть прямокутні координати КА в момент прольоту ним точки, найменш віддаленої від спостерігача (траверзи). Інтервал кореляції флукуацій фази приймемо рівним тривалості вимірювання і приймання сигналів буде вестись на ненаправлену антену.

Очевидно, що питомий приріст інформації про параметри руху, що отримують на різних відрізках мірної ділянки траєкторії КА, повинен бути різним і при подальшій обробці цей фактор буде впливати на точність розрахунків. На величину приросту, певно, повинні впливати і енергетичні умови в момент вимірювання, і швидкість кутової зміни градієнту до площин положення, і точність визначення площин положення, і положення спостерігача відносно вимірювальної ділянки.

На перший погляд найбільш природною мірою оцінки інформативності тієї чи іншої ділянки траєкторії є величина, яка б показувала на скільки зменшуються помилки визначення того чи іншого параметру на відрізьку вимірювання одиничної довжини. Бажано було б, щоб міра інформативності була зростаючою функцією довжини відрізьку і щоб міра інформативності двох відрізьків була рівна сумі мір інформативності кожної з них. Якщо в якості міри вибрати величину, пропорційну зменшенню дисперсії помилок вимірювання на відрізьці одиничної довжини, то така міра умові адитивності відповідати не буде. Другий недолік такої міри полягає в тому, що вона вимагає вибрати за точку відліку дисперсію нескінченно великої величини.

Таким чином, оцінювання інформативності відрізьку траєкторії зменшенням дисперсії помилок на ньому є недоцільним. Більш зручною мірою інформативності може бути величина, яка характеризує приріст точності вимірювань на відрізьці траєкторії одиничної довжини.

Приріст точності можна оцінювати приростом величини, зворотної дисперсії помилок вимірів, на одиничному відрізьку, тобто приростом величини елементів матриці [1]

$$B_{B_i}^{-1} = -\frac{2}{N_0} \sum_k \frac{\partial_k}{N_0 + \partial_k} Z_{ii}''(0). \quad (10)$$

У випадку сигналів, інтервал кореляції початкової фази яких достатньо великий, в якості подібної міри можливо прийняти приріст величини $-Z_{ii}''(0)N_0^{-1}$ або просто величину

$$-\frac{\partial}{\partial x} Z_{ii}''(0), \quad (11)$$

яку позначимо буквою I_i . Ці міри задовольняють умову адитивності, а початок відліку кожної співпадає з нулем. Таким чином, в якості міри інформативності даного відрізьку траєкторії доцільно використовувати похідну за довжиною ділянки вимірювання траєкторії від максимального значення другої похідної автокореляційної функції за параметром, який визначається.

Використовуючи такий підхід можливо достатньо детально, надійно та об'єктивно оцінити інформативність різних ділянок траєкторії для визначення різних параметрів будь-яким методом, що дозволить значно збільшити точність вимірів параметрів руху КА.

Практична цінність запропонованого в тому, що проводячи обробку результатів вимірювання в умовах однопунктної технології управління на декількох витках з урахуванням апріорних даних про орбіту, можливо підібрати такі значення початкових умов, які відносяться до будь-якого моменту часу, що найкращим чином відповідають уточненій орбіті. Приведені матеріали дають можливість дослідити найбільш сприятливі умови визначення різних складових параметрів руху на окремих витках. Отримані результати дають можливість насамперед якісного уявлення про інформативність різних ділянок траєкторії та можуть стати базовими для детального дослідження, наприклад, методами чисельного аналізу.

Тобто даний підхід дозволяє оцінювати потенційну точність конкретного радіотехнічного засобу, враховуючи методи, що використовуються при вимірюванні, стати базовим при розробці нових підходів до технології проведення вимірювань ПНП та їх обробки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Олянюк П.В. *Оптимальный приём сигналов и оценка потенциальной точности космических измерительных комплексов.* – М.: Сов. радио, 1973. – 183 с.
2. Сильвестров С.Д., Васильев В.В. *Структура космических измерительных систем.* – М.: Сов. радио, 1979. – 224 с.
3. *Організація та основи побудови систем управління космічними засобами: Навчальний посібник / С.Т. Черепков, В.І. Богомья, О.М. Загорулько, С.Д. Ставицький.* – К.: НАОУ, 2005. – 57 с.
4. *Космические радиотехнические комплексы / Под общ. ред. Г.В. Стогова.* – М.: МО СССР, 1986. – 626 с.
5. *Моделирование и оценка эффективности применения космических систем: Уч. пособие / Под общ. ред. Н.С. Пастушенко, В.П. Деденка* – Х.: ХВУ, 1997. – 278 с.
6. *Устойчивые статистические методы оценки данных: Пер. с. англ. Ю.И. Малахова / Под ред. Н.Г. Волкова.* – М.: Машиностроение, 1984. – 232 с.
7. *Загорулько А.Н., Явтушенко А.Н., Богомья В.И. Особенности однопункт-ной системы управления КА // Пятая украинская конференция по космиче-ским исследованиям, 4-11 сентября 2005 г., НЦУИКС.* – Евпатория. – 2005. – С. 206.

Надійшла 21.04.2006

Рецензент: доктор технічних наук, професор С.В. Козелков,
Національна академія оборони України, Київ.