УДК 621.396

М.В. Бархударян, К.К. Кулагін, Б.О. Чумак

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ВИБІР ПОКАЗНИКІВ ДОСТОВІРНОСТІ ТРАЄКТОРНОГО КОНТРОЛЮ РУХУ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Розглянуто методи оцінки в реальному масштабі часу достовірності траєкторної інформації, отриманої за допомогою вимірювальних радіотехнічних систем (РТС) при спостереженні літаючих апаратів. Визначені умови, на підставі яких при статистичній незалежності вимірюваних параметрів та погрішностей вимірів виноситься рішення про знаходження вимірюваного параметру в межах допуску. Визначені ймовірнісні показники достовірності траєкторного контролю руху літальних апаратів.

***Ключові слова**: параметри руху, показник ефективності, радіотехнічна система комплексів контролю і управління.*

Вступ

Аналіз літератури і постановка задачі. Для забезпечення контролю і управління рухом різноманітних літальних апаратів (ЛА) під час визначення та прогнозування їх траєкторій використовуються наземні радіотехнічні системи. Однак, на цей час жодна з існуючих систем при визначенні параметрів руху ЛА не оцінює достовірність отриманої інформації в реальному масштабі часу. Процес контролю траєкторії ЛА є поетапним. При цьому мають бути вирішеними такі основні задачі: одержання інформації про значення навігаційних функцій ЛА, порівняння їх з допустимими; видача результатів порівняння (обробка одержаної інформації).

Аналіз показує, що засоби контролю, в яких реалізується вирішення другої та третьої задач, відсутні [1 – 3]. Таким чином, для вірного вирішення наведених задач слід виконати такі функції: вибір показників якості функціонування системи в цілому, або її окремих (найбільш важливих в конкретному випадку) елементів; визначення допустимих значень меж величин параметрів руху ЛА та допустимих похибок їх визначення; розроблення методики порівняння зазначених (або перерахованих у визначений простір) величин з урахуванням вимог оперативності визначення результату та прийняття певного рішення; дослідження корисності результатів виконання операцій; визначення кількісної оцінки показників ефективності системи контролю.

Мета статті: визначення показників достовірності траєкторного контролю руху ЛА.

Основна частина

Для виявлення особливостей роботи РТС комплексів контролю і управління ЛА, як засобів траєкторного контролю, розглянемо модель її функціонування в штатному режимі роботи (рис. 1).

Вимірювальний канал РТС пов'язаний з пристроєм реєстрації та прив'язки отриманих вимірів до шкали системи єдиного часу (СЄЧ).

Перетворені виміри у форматі, зручному для подальшої обробки, надходять до системи обробки інформації. Інформація про супроводжуваний ЛА заноситься до часткового каталогу, де також зберігаються цілевказівки (ЦВ) для супроводу ЛА. Обчислюється похибка між ЦВ та вимірами для врахування її надалі при розрахунку ЦВ на наступні етапи супроводу. Після розрахунку похибки вимірювань приймається рішення про достовірність отриманої траєкторної інформації. При надходженні серії (кадру) нових вимірів виконується порівняння між відповідними ЦВ і вимірами та розраховується різниця між ними. Це дозволяє корегувати вилучені виміри по окремим складовим вектору стану.

Аналіз розглянутої моделі показав, що ЛА як об'єкт траєкторного контролю в ній характеризується кількістю компонентів вектору стану, які контролюються. Обсяг вимірювань зростає безперервно під час сеансу зв'язку, вимірювані параметри руху мають досить великий діапазон змінювання значень. Вимоги щодо допустимих меж похибок вимірювань параметрів руху мають визначатися для кожного випадку окремо.

Балістичне забезпечення повинно мати відповідні еталонні моделі руху ЛА з метою врахування особливостей руху різних типів ЛА, що в свою чергу дозволить забезпечити високу точність та необхідну достовірність виконання поставлених завдань в реальному масштабі часу. Вимоги щодо похибок вимірів даних параметрів мають уточнюватись також для кожного випадку окремо. Сигнали, що несуть інформацію про параметри руху, підлягають багатократним перетворюванням.

Для вимірювань використовується велика кількість засобів, що мають різні показники ефективності функціонування як з точки зору кількості вимірюваних параметрів руху, так і з точки зору точності проведених вимірів. Наявність перешкод та шумів призводить до випадковості вимірюваних параметрів руху у часі.

© М.В. Бархударян, К.К. Кулагін, Б.О. Чумак

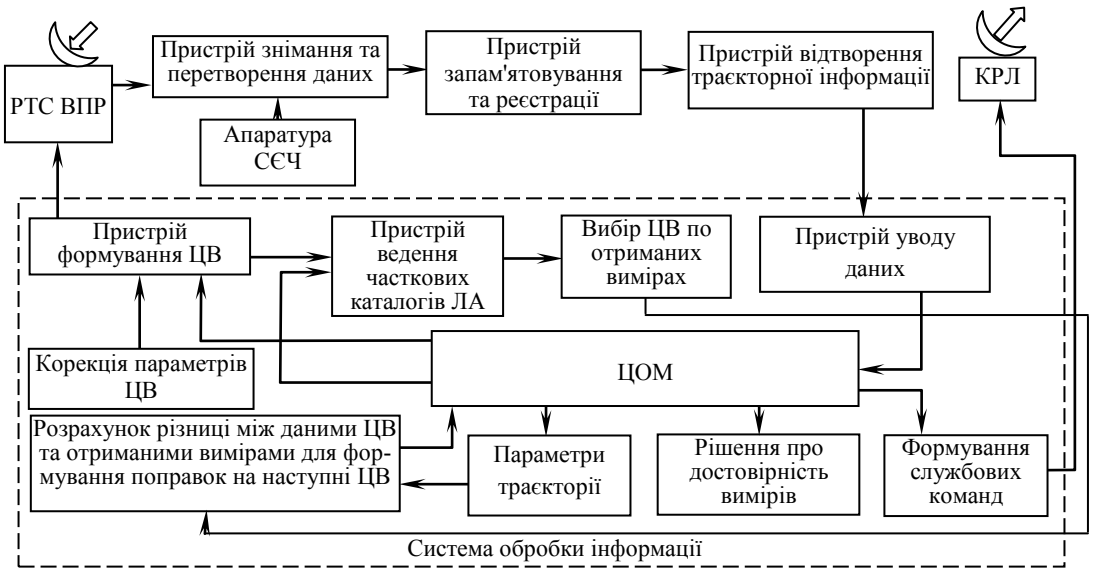

Рис. 1. Модель РТС комплексу контролю і управління ЛА

В роботі [5] показано: якщо в якості відновлювальної навігаційної функції прийняти поліном першого ступеню $\hat{A}(k) = \hat{a} + \hat{c} \cdot k$, де $\hat{a}$ – оцінка дальності в середині k-го інтервалу спостереження, $\hat{c}$ – оцінка коефіцієнту, пропорційного швидкості в середині цього інтервалу, то функцію правдоподібності відносно параметрів, що визначаються, можна записати як

$$\ln P\left(\frac{\overline{y}}{a}, c, \sigma_y^2, \delta_y\right) =$$

$$= -\frac{M}{2}\ln\sigma_y^2 - \frac{1}{2\sigma_y^2}\sum_{k=-M/2+1}^{M/2}(y_k - \hat{a} - \hat{c}\cdot k - \hat{\delta}_k)^2,$$

де M – кількість вимірювань, що надходять в обробку; k – дискретний час; y_k – сигнал на вході вимірювальної системи; δ_k – систематична похибка визначення навігаційних функцій; σ_0^2 – дисперсія вхідного процесу [6].

Для такої моделі спостереження запропоновано метод, при якому оцінюється відомий параметр: відстань між фазовими центрами антен ЛА [5]:

$$\hat{L}(t) = \sqrt{(\hat{x}_{a1}(t) - \hat{x}_{b1}(t))^2 + (\hat{y}_{a1}(t) - \hat{y}_{b1}(t))^2 + (\hat{z}_{a1}(t) - \hat{z}_{b1}(t))^2}\,.$$

Далі визначається погрішність

$$\Delta L(t) = \hat{L}(t) - L\,, \qquad (2)$$

де L – еталонне значення відстані між приймальними антенами.

Одночасно з цим визначається величина

$$\hat{\dot{L}}(t) = \left(\hat{L}(t)\right)^{-1} \cdot \left[\left(\hat{x}_{a1}(t) - \hat{x}_{\hat{a}1}(t)\right)\left(\hat{V}_{x_{a1}}(t) - \hat{V}_{x\hat{a}1}(t)\right) + \left(\hat{y}_{a1}(t) - \hat{y}_{\hat{a}1}(t)\right)\left(\hat{V}_{ya1}(t) - \hat{V}_{y\hat{a}1}(t)\right) + \left(\hat{z}_{a1}(t) - \hat{z}_{\hat{a}1}(t)\right)\left(\hat{V}_{z_{a1}}(t) - \hat{V}_{z\hat{a}1}(t)\right)\right]. \qquad (3)$$

Результат обчислення згідно виразу (3) порівнюється з нулем. Оскільки бортові антени нерухомі відносно одна до одної, результат розрахунків повинен дорівнювати нулю за умови відсутності похибок вимірювань.

Якщо сукупність узагальнених координат (бажаного положення об'єкту в майбутньому) позначити через $\overline{\lambda}_r$, а сукупність узагальнених координат об'єкту в даний момент часу через $\overline{\lambda}_0$, то досягнення мети можливе при виконанні умови

$$\left|\overline{\lambda}_r - \overline{\lambda}_0\right| = \left|\overline{\Delta}\right| \pm \left|\overline{\varepsilon}\right| \qquad (4)$$

де $\overline{\Delta}$ – вектор розузгодження між початковим і необхідним станами об'єкту; $\overline{\varepsilon}$ – вектор допустимих розузгоджень.

Запишемо вираз (4) в скалярному вигляді і, позначивши

$$\lambda_r = \hat{L}_k\,,\ \lambda_0 = L\,,\ \overline{\Delta} = \Delta\hat{L}_k\,,\ \overline{\varepsilon} = \Delta R_{äîï}\,,$$

отримаємо

$$\left|\hat{L}_k - L\right| = \left|\Delta\hat{L}_k\right| < \left|\Delta R_{äîï}\right|\,,$$

де $\Delta R_{äîï}$ – максимально допустима погрішність вимірювання навігаційного параметра (наприклад, дальності).

Хай в результаті обробки даних відповідно до виразів (2) – (3) отримано, що

$$\left|\Delta\hat{L}_k\right| > \left|\Delta R_{äîï}\right|\,.$$

В цьому випадку точність виміряних параметрів руху ЛА є неприйнятною, інформація не може бути використаною для проведення балістичних розрахунків. Щоб виконати задачу балістичного забезпечення необхідно змінити режим роботи системи вимірювання так, щоб зменшити вплив флуктуаційних похибок і привести похибку до допустимої величини.

Слід зазначити, що розглянутий метод вирішує лише скалярну задачу, у той час, як для нормального польоту об'єкта співвідношення (1) має бути виконаним по усім параметрам.

Отже, якість роботи вимірювальних засобів може бути охарактеризована ймовірністю знаходження усіх вимірюваних параметрів в межах встановлених допусків:

$$P = \int_{\Lambda} f(\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n) d\lambda_1 d\lambda_2 ... d\lambda_n ,$$

де $f(\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n)$ – сумісна щільність розподілу вимірюваних параметрів; Λ – область допустимих значень вимірюваних параметрів (коли політ вважається нормальним) [7].

У відповідності з розглянутою моделлю процесу вимірювань висновок про нормальність польоту виноситься на підставі обробки інформації про значення параметрів руху. Достовірність вимірів є підставою для об'єктивності прийнятого в процесі вимірювань рішення, тому в якості її критерію доцільно вибрати умовну ймовірність знаходження вимірюваного параметру λ_i, в межах допустимих значень. Методичні погрішності при цьому можуть бути зведені до досить малих або відомих величин. Проте, врахувати погрішності стохастичної природи вимірюваних параметрів та похибок самих вимірювань вдається не завжди і становить вкрай складну задачу. Дійсно, при вимірюванні змінних параметрів руху, закодованих в приймаємих сигналах лінійно, а часом і нелінійно, замість істинного значення λ до рішення залучається його оцінка, яка містить погрішність $\Delta\lambda$: $\hat{\lambda} = \lambda + \Delta\lambda$. При статистичній незалежності λ та $\Delta\lambda$ умова (замість (1)), на підставі якої виноситься рішення про знаходження вимірюваного параметру в межах допуску, наступна:

$$a < \hat{\lambda} = \lambda + \Delta\lambda < b .$$

Різниця між істиною та фактичною умовами є причиною хибних рішень.

При цьому виникають взаємовиключні події, перелік яких наведений у табл. 1.

Реалізація другої події призводить до таких похибок, при яких фактично нормальний політ визнається ненормальним. Будемо вважати такі похибки похибками першого роду. При реалізації третьої події фактично ненормальний політ визнається нормальним. Це похибки другого роду.

Позначимо сумарну ймовірність події 1 та 4 як P_0. Врахуємо, що наведені в табл. 1 дані являють собою повну групу несумісних подій, тобто

$$P_0 + P_1 + P_2 = 1 ,$$

де P_1 та P_2 – ймовірності подій 2 та 3 відповідно.

Отже

$$P_0 = 1 - (P_1 + P_2) . \qquad (5)$$

Таблиця 1

Перелік взаємовиключних подій

Подія	Параметр λ	Результат виміру $\hat{\lambda}$
1.	в межах $a_i \le \lambda_i \le b_i$	в межах $a < \hat{\lambda} = \lambda + \Delta\lambda < b$
2.	в межах $a_i \le \lambda_i \le b_i$	не в межах $a < \hat{\lambda} = \lambda + \Delta\lambda < b$
3.	не в межах $a_i \le \lambda_i \le b_i$	в межах $a < \hat{\lambda} = \lambda + \Delta\lambda < b$
4.	не в межах $a_i \le \lambda_i \le b_i$	не в межах $a < \hat{\lambda} = \lambda + \Delta\lambda < b$

В додаток до виразу (5) для достовірності одержаних оцінок вимірювань можна вживати такі показники: достовірність визначення нормальності польоту, яка є апостеріорною ймовірністю того, що похибки вимірювань не вийшли за допустиму межу і прийняте рішення 1.

Тобто

$$D_{\text{í}} = (P - A) / (P - A + B) ;$$

достовірність визначення ненормальності польоту, яка є апостеріорною ймовірністю ненормальності польоту, якщо прийняте рішення 4

$$D_{\text{í í}} = (1 - P - B) / (1 - P - B + A) ,$$

де A та B ймовірності похибок першого та другого роду при вимірюванні n незалежних параметрів, які визначаються за співвідношеннями:

$$A = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_1) ;$$

$$B = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_2) .$$

Визначимо точність вимірювань, виходячи з необхідного рівня достовірності. Будемо вважати, що значення похибок першого та другого роду є заданими. Виходячи з табл. 1, одержимо, що

$$a < \hat{\lambda} = \lambda + \Delta\lambda < b .$$

Отже,

$$a - \Delta\lambda < \lambda < b - \Delta\lambda . \qquad (6)$$

При відомому законі розподілу погрішностей вимірювальних каналів РТС $\phi(t)$ ймовірність знаходження випадкової величини λ в інтервалі (6) дорівнює

$$\int_{a-\Delta\lambda}^{b+\Delta\lambda} \phi(\tau) d\tau .$$

Враховуючи, що ймовірність знаходження вимірюваного параметру в інтервалі $\lambda + \Delta\lambda$ визначається як $f(\lambda)d\lambda$ та припускаючи незалежність по-

грішності вимірювань від вимірюваної величини, визначимо ймовірність похибки другого роду при певному значенні вимірюваного параметру:

$$f(\lambda) = \int_{a-\Delta\lambda}^{b+\Delta\lambda} \phi(\tau)d\tau .$$

Як слід, безумовна ймовірність похибок другого роду виходить в інтервалі $a \le \lambda \le b$, тобто

$$P_2 = \int_{-\infty}^{a} f(\lambda) \int_{a-\lambda}^{b-\lambda} \phi(\tau)d\tau d\lambda + \int_{b}^{\infty} f(\lambda) \int_{a-\lambda}^{b-\lambda} \phi(\tau)d\tau d\lambda. \quad (7)$$

Аналогічно одержимо безумовну ймовірність похибок першого роду:

$$P_1 = \int_{a}^{b} f(\lambda) \left[\int_{-\infty}^{a-\lambda} \phi(\tau)d\tau + \int_{b-\lambda}^{\infty} \phi(\tau)d\tau \right] d\lambda . \quad (8)$$

Із виразів (7) та (8) очевидно, що розширення полів допуску збільшує похибки другого роду та зменшує похибки першого роду, а підвищення точності одночасно зменшує обидві ці похибки.

Висновки

Таким чином, знаючи закони розподілу вимірюваного параметру $f(\lambda)$ та погрішності вимірювань, можна, виходячи із заданої достовірності, вирішувати дві задачі:

визначати необхідну точність вимірювальних каналів РТС;

визначати допуски меж похибок вимірювань.

Список літератури

1. *Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли / П.Е. Эльясберг. – М.: Наука, 1965. – 278 с.*

2. *Чумак Б.О. Повышение надежности управления КА в условиях ограниченного времени при однопунктной технологии управления / Б.О. Чумак, І.Г. Лисаченко // Проблемні питання метрологічного забезпечення складних РТК спеціального призначення: матеріали науково-технічного семінару НМЦ (ВЕ). – Х.: НМЦ(ВЕ), 2000. – С. 23-25.*

3. *Радиолокационные устройства / Под ред. В.В. Григорина-Рябова. – М.: Сов. радио, 1970. – 680 с.*

4. *Гришин Ю.П. Радиотехнические системы / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов и др.; под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.*

5. *Величко О.М. Державна служба єдиного часу та еталонних частот – необхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України / О.М. Величко, Б.И. Макаренко, В.Ю. Камінський та ін. // Космічна наука і технологія. – 1997. – Т. 3, № 1/2. – С. 7-15.*

6. *Хомяков Э.Н. Полигонные измерительные комплексы / Э.Н. Хомяков. – М: МО СССР, 1992. – 426 с.*

7. *Камінський В.Ю. Проблеми забезпечення єдності вимірювань часу і частоти у Збройних Силах України та шляхи її вирішення / В.Ю. Камінський, М.В. Романько // Наука і оборона. – 1998. – № 3. – С. 43-47.*

Надійшла до редколегії 14.10.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Є.Л. Казаков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОСТОВЕРНОСТИ ТРАЕКТОРНОГО КОНТРОЛЯ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

М.В. Бархударян, К.К. Кулагін, Б.О. Чумак

Рассмотрены методы оценки в реальном масштабе времени достоверности траекторной информации, полученной с помощью радиотехнических измерительных систем при наблюдении летательных аппаратов. Определены условия, на основании которых при статистической независимости измеряемых параметров и погрешностей измерений выносится решение о нахождении измеряемого параметра в пределах допуска. Определены вероятностные показатели достоверности траекторного контроля движения летательных аппаратов.

Ключевые слова: *параметры движения, показатель эффективности, радиотехническая система комплекса контроля и управления.*

AUTHENTICITY INDEXES SELECTION OF AIRCRAFTS TRAJECTORY CONTROL MOVEMENT

M.V. Barkhudarian, K.K. Kulagin, B.O. Chumak

It is considered the evaluation methods in real time scale of trajectory information authenticity, received by radio-engineering systems in aircraft surveillance. The conditions are determined when statistical independence of measured parameters and dimensions fallibility, the decision about measured parameters position in allowance boundaries is made. The possible authenticity indexes of aircraft trajectory control movement are determined.

Keywords: *movement parameters, efficiency indexes, radio-engineering system of command and control complexes.*