

УДК 623.396

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

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТОЧНОСТІ ПОЛІГОННОГО ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ТА ВИМІРЮВАЛЬНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Розглянутий взаємозв'язок між показниками ефективності функціонування полігонного вимірювально-обчислювального комплексу (ПВОК) як системи вищого рівня ієрархії та аналогічними показниками вимірювальних радіотехнічних систем, які є складовими цього комплексу. Виявлені основні складові загальної похибки визначення вектору стану об'єкту за допомогою ПВОК.

Ключові слова: полігонний вимірювально-обчислювальний комплекс, радіотехнічна система, критерій ефективності, матриця дисперсій похибок, точність вимірювань.

Аналіз літератури і постановка задачі

Для оцінки траєкторій літальних об'єктів використовуються полігонні вимірювально-обчислювальні комплекси. Ефективність даних комплексів оцінюється системою показників якості, яка істотним чином залежить від характеру вирішуваних задач [1, 2].

ПВОК – це сукупність взаємозв'язаних споруд, технічних засобів з інформаційним і математичним забезпеченням, призначених для отримання і обробки інформації про функціонування бортових систем всіх типів ракет різного призначення і контролю їх руху на всій трасі польоту.

У зв'язку з цим, у складі ПВОК застосовуються різні вимірювальні радіотехнічні системи (РТС). При оцінці ефективності або при оптимізації цих систем застосовуються більш спрощені показники якості, чим при оцінці ефективності ПВОК [1 – 5].

Одним з актуальних завдань при цьому є знаходження взаємозв'язку між характеристиками ефективності функціонування ПВОК як системи вищого рівня і аналогічними характеристиками РТС. Особливого значення воно набуває в ході проведення льотних випробувань (ЛВ), а також в ході проведення військових навчань з бойовою стрільбою.

Мета статті – визначити взаємозв'язок між похибками визначення компонентів вектору стану в ПВОК та похибками траєкторних вимірювань.

Основний матеріал

Для досягнення мети конкретизуємо завдання і вважатимемо, що необхідно визначити вектор стану центру мас об'єкту:

$$\bar{\lambda}^T(t) = [X(t), Y(t), Z(t), V_X(t), V_Y(t), V_Z(t)] \quad (1)$$

У такій ситуації основним критерієм ефективності РТС буде точність визначення координат і складових вектора швидкості об'єкту в будь-який час.

Слід мати на увазі, що критерій точності визначення параметрів траєкторій або компонентів вектора стану об'єкту не повністю характеризує можливість визначення траєкторій за нормальних умов.

Внаслідок істотної нелінійності функцій, що зв'язують параметри траєкторій з геометричними величинами та їх похідними, вимірюваними радіотехнічними методами, процес відшукування параметрів виявляється ітераційним.

Тому, величина допустимого початкового неузгодження між розрахунковими і дійсними значеннями параметрів траєкторій залежна від програми вимірювань, технології використання засобів, алгоритму вторинної обробки траєкторних вимірювань, і безпосередньо пов'язана з характеристиками збіжності ітераційного процесу.

Розглянемо, наприклад ракету, як об'єкт ЛВ. Її політ відбувається в так званій "трубці", яка характеризує відхилення ракети від деякої заданої і наперед розрахованої траєкторії (рис. 1).

При цьому РТС визначає траєкторію ракети в деякій прямокутній системі координат з помилками, значущість яких визначається втратами (сумарним ризиком).

$$\bar{\xi}(t) = f[\Delta\bar{\lambda}(t), t]; \quad t \in t_0, t_{\max} \quad (2)$$

де $\Delta\bar{\lambda}(t)$ – вектор, що характеризує помилки визначення координат і складових вектора швидкості ракети. Наприклад, якщо ракета знаходиться в точці Р, а з допомогою РТС визначається, що вона знаходиться в точці С, то величини ΔX , ΔY характеризують помилки по осях X і Y (рис. 1);

f – деяка відома функція.

Складовими виразу (2) будуть ризики, пов'язані з помилками визначення з допомогою РТС компонентів вектора стану

$$\bar{\xi}_i(t) = f_i[\Delta\bar{\lambda}_i(t), t]; \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (3)$$

Середній ризик по кожному компоненту визначається співвідношенням [1]:

$$r_i(t) = \int_{\lambda_{i0}}^{\lambda_{i \max}} r_i(\Delta\lambda_i) P(\Delta\lambda_i) d\lambda, \quad (4)$$

де $P(\Delta\lambda_i)$ – щільність ймовірності відхилень i -х параметрів траєкторії.

Відповідно до розглянутого прийємо, як критерій ефективності функціонування полігонного вимірювально-обчислювального комплексу умову

$$\bar{\Sigma}(t) \leq \bar{\Sigma}_{\text{доп}}(t), \quad (5)$$

де $\bar{\Sigma}_{\text{доп}}(t)$ – допустиме значення сумарного середнього ризику.

Вважатимемо, що основне завдання ПВОК – забезпечити задану точність визначення вектора стану об'єкту.

Зважаючи на (1), модель спостереження можливо уявити у вигляді [2, 3]:

$$\begin{cases} y_{1k} = R_{1k} + n_{1k}; \\ y_{2k} = R_{2k} + n_{2k}; \\ \dots \\ y_{nk} = R_{nk} + n_{nk}, \end{cases} \quad (6)$$

де R_{ik} – i -та навігаційна (вимірювана) функція;
 n_{nk} – похибка вимірювання i -ї навігаційної функції ($i = 1, 2, \dots, n$);
 k – моменти часу.

В узагальненому вигляді

$$\bar{y}_k = \bar{R}(\bar{\lambda}_k, \bar{Q}) + \bar{n}_{k\Sigma}, \quad (7)$$

де \bar{Q} – вектор геодезичних координат фазових центрів антен РТС;

$\bar{n}_{k\Sigma}$ – вектор сумарних похибок визначення вектору стану об'єкта, який визначається виразом

$$\begin{aligned} \bar{n}_{k\Sigma} &= \bar{n}_{k \text{ тр}} + \bar{n}_{k \text{ геод}} + \bar{n}_{k \text{ час}} + \bar{n}_{k \text{ вз пр}} = \\ &= \bar{n}_{k \text{ тр}} + \bar{D}_k \Delta\bar{Q} + \bar{E}_k \Delta\bar{t} + c\Delta\bar{v}_k, \end{aligned} \quad (8)$$

де $\bar{n}_{k \text{ тр}}$ – вектор похибок визначення компонентів вектору стану за рахунок похибок траєкторних вимірювань;

$\bar{n}_{k \text{ геод}}$ – вектор похибок визначення компонентів вектору стану за рахунок похибок геодезичного прив'язування фазових центрів антен РТС;

$\bar{n}_{k \text{ час}}$ – вектор похибок визначення компонентів вектору стану за рахунок похибок часового прив'язування засобів системи єдиного часу (СЄЧ);

$\bar{n}_{k \text{ вз пр}}$ – вектор похибок визначення компонентів вектору стану за рахунок похибок взаємного прив'язування шкал часу та частоти окремих РТС;

c – швидкість світла;

\bar{D}_k та \bar{E}_k – перехідні матриці, які при кількості m фазових центрів антен визначаються виразами

$$\bar{D}_k = \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{1k}}{\partial x_{A1}} & \frac{\partial R_{1k}}{\partial y_{A1}} & \dots & \frac{\partial R_{1k}}{\partial z_{Am}} \\ \frac{\partial R_{2k}}{\partial x_{A1}} & \frac{\partial R_{2k}}{\partial y_{A1}} & \dots & \frac{\partial R_{2k}}{\partial z_{Am}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial R_{6k}}{\partial x_{A1}} & \frac{\partial R_{6k}}{\partial y_{A1}} & \dots & \frac{\partial R_{6k}}{\partial z_{Am}} \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$\bar{E}_k = \frac{\partial \bar{R}_k}{\partial \bar{t}_{Ck}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{1k}}{\partial t} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial R_{2k}}{\partial t} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial R_{6k}}{\partial t} \end{pmatrix}.$$

В загальному випадку вектор $\bar{n}_{k\Sigma}$ має як систематичну, так і випадкову складові, які при статистичній незалежності визначаються, відповідно

$$\delta\bar{n}_{k\Sigma} = \delta\bar{n}_{k \text{ тр}} + \bar{D}_k \delta\Delta\bar{Q} + \bar{E}_k \delta\Delta\bar{t} + c\delta\bar{v}_k; \quad (10)$$

$$\bar{N}_{k\Sigma} = \bar{N}_{k \text{ тр}} + \bar{D}_k \bar{\Sigma}_{\Delta\bar{Q}} \bar{D}_k^T + \bar{E}_k \bar{\Sigma}_{\Delta\bar{t}} \bar{E}_k^T + c^2 \bar{P}_k, \quad (11)$$

де \bar{P}_k – матриця дисперсій випадкових похибок взаємного прив'язування шкал часу та частоти окремих РТС.

Будемо вважати, що систематична складова може бути врахованою, наприклад, при калібруванні РТС та юстируванні антен. Таким чином, нас буде цікавити лише випадкова складова. Тепер висловимо думку відносно виразу (11). Для того, щоб у виразі враховувати усі доданки, необхідно, щоб вони були між собою одного порядку, тобто приблизно дорівнювали один одному. В протилежному випадку деякими з них можна було б знехтувати.

Отже, буде справедливим співвідношення

$$\frac{1}{4} \bar{N}_{k\Sigma} \geq \bar{N}_{k \text{ тр}}. \quad (12)$$

Матриця траєкторних похибок при статистичній незалежності похибок вимірювання навігаційних функцій має наступний вигляд:

$$\bar{N}_{k \text{ тр}} = \begin{pmatrix} \sigma_{R1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{R2}^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \sigma_{R6}^2 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Таким чином, взаємозв'язок між похибками визначення компонентів вектору стану в ПВОК та похибками траєкторних вимірювань визначається з виразу

$$\bar{\Sigma}_{\lambda k} = \bar{C}_k^{-1} \bar{N}_k \bar{C}_k^{-1T}, \quad (14)$$

де \bar{C}_k – матриця часткових похідних, яка має вигляд

$$\bar{C}_k = \frac{\partial \bar{R}_k}{\partial \bar{\lambda}_{Ck}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{1k}}{\partial x_{Ck}} & \frac{\partial R_{1k}}{\partial y_{Ck}} & \dots & \frac{\partial R_{1k}}{\partial V_{zCk}} \\ \frac{\partial R_{2k}}{\partial x_{Ck}} & \frac{\partial R_{2k}}{\partial y_{Ck}} & \dots & \frac{\partial R_{2k}}{\partial V_{zCk}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial R_{6k}}{\partial x_{Ck}} & \frac{\partial R_{6k}}{\partial y_{Ck}} & \dots & \frac{\partial R_{6k}}{\partial V_{zCk}} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Матриця $\bar{\Sigma}_{\lambda k}$ буде мати наступний вигляд:

$$\bar{\Sigma}_{\lambda k} = \begin{pmatrix} \sigma_{Xk}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{Yk}^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{Vzk}^2 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Вирази (13) – (16) дозволяють визначити вимоги до точності траєкторних вимірів. При цьому маємо [4]:

$$\bar{N}_k = \bar{C}_k \bar{\Sigma}_{\lambda k \text{ доп+}} \bar{C}_k^T, \quad (17)$$

де $\bar{\Sigma}_{\lambda k \text{ доп+}}$ – матриця допустимих дисперсій похибок визначення компонентів вектору стану об'єкту.

Конкретні співвідношення для (13) – (17) одержимо, якщо конкретизуємо вид вимірюваних навігаційних функцій, конфігурацію антен РТС та визначимо компоненти матриці $\bar{\Sigma}_{\lambda k \text{ доп+}}$.

Висновки

Таким чином, в даній статті розглянуто взаємозв'язок між показником ефективності функціонування полігонного вимірювально-обчислювального комплексу як системи вищого рівня ієрархії (за критерій ефективності прийняте допустиме значення

сумарного середнього ризику при визначенні компонентів вектора стану) та аналогічним показником вимірювальних радіотехнічних систем, які є складовими цього комплексу. При цьому виявлені основні складові загальної похибки визначення вектору стану об'єкту за допомогою ПВОК, що дозволяє встановити вимоги до точності траєкторних вимірів.

Список літератури

1. Фалькович С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
2. Чумак Б.О. Оцінка достовірності траєкторного контролю руху космічних об'єктів / Б.О. Чумак, В.М. Попов, І.Г. Лисаченко, О.М. Роянов // Збірник наукових праць ППМЕ ім. Г.Є. Пухова. – К.: ППМЕ ім. Г.Є. Пухова, 2004. – Вип. 25. – С. 175-181.
3. Хомяков Э.Н. Измерительно-информационные радиосистемы: учеб. пособие / Э.Н. Хомяков. – МО СССР, ХВКИУ РВ. – Х: ХВКИУ РВ, 1985. – 220 с.
4. Чумак Б.О. Обґрунтування вимог до точності визначення параметрів руху літаючих об'єктів управління / Б.О. Чумак, І.Г. Лисаченко, О.В. Дремлюга // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ, 2001. – Вип. 2(12). – С. 86-90.
5. Чумак Б.О. Принципи побудови та структура перспективного полігонного вимірювально-обчислювального комплексу як елемента системи випробувань озброєння та військової техніки / Б.О. Чумак, М.В. Бархударян, К.К. Кулагин // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління, 2008. – Вип. 2 (6). – С. 55-59.

Надійшла до редколегії 11.08.2009

Рецензент: д-р техн. наук В.О. Василець, Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТОЧНОСТИ ПОЛИГОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н.В. Бархударян, К.К. Кулагин, Б.А. Чумак

Рассмотрена взаимосвязь между показателями эффективности функционирования полигонного измерительно-вычислительного комплекса (ПВОК), как системы высшего уровня иерархии, и аналогичными показателями измерительных радиотехнических систем, которые являются составляющими этого комплекса. Обнаружены основные составляющие общей погрешности определения вектора состояния объекта с помощью ПВОК.

Ключевые слова: полигонный измерительно-вычислительный комплекс, радиотехническая система, критерий эффективности, матрица дисперсий погрешностей, точность измерений.

THE INTERRELATION BETWEEN ACCURACY CHARACTERISTICS OF GROUND MEASURING-CALCULATING COMPLEX AND MEASURING RADIO ENGINEERING SYSTEMS

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

The interrelation between efficiency parameters of ground measuring-calculating complex (GMCC) functioning as systems of a highest level hierarchy, and similar parameters of measuring radio engineering systems, which are components of this complex, is considered. The basic components of general error of a vector object condition with help GMCC are found out.

Keywords: ground measuring-calculating complex, radio engineering system, criterion of efficiency, a matrix of errors dispersions, accuracy of measurements.