УДК 621.391.24

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

Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО ТОЧНОСТІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Наведена методика визначення вимог до точності оптико-електронних вимірювальних систем при відомих значеннях дисперсій допустимих похибок визначення компонент вектора стану літального об'єкту.

Ключові слова: *точність вимірювань, полігонний вимірювально-обчислювальний комплекс, оптична система.*

Постановка проблеми

При проведенні навчань військ з бойовою стрільбою та/або випробувань зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) в полігонному вимірювально-обчислювальному комплексі (ПВОК) наряду з радіотехнічними системами в якості вимірювальних використовуються також оптико-електронні вимірювальні системи типу КТС та Вісмутин. Для цих систем не розроблені теоретичні засади щодо методології обґрунтування вимог до їх точності.

Цікаво визначити вимоги до точності вимірювання навігаційних параметрів руху для систем зазначеного типу, якщо задані дисперсії допустимих похибок визначення компонентів вектору стану літального об'єкту.

Мета статті – розробка методики обґрунтування вимог до точності оптико-електронних вимірювальних систем.

Основний матеріал

Вирішимо дану проблему для найбільш поширеної задачі полігонних випробувань. Отже сформулюємо задачу таким чином:

– для вимірювання навігаційних параметрів руху та подальшого управління рухом використовується оптична система. При цьому відлік системи суміщений з початком системи координат (точка О1 рис. 1);

– система вимірює навігаційні функції:

а) кут азимута - α;

б) кут місця - β;

г) шляхом обчислення системою обробки інформації можуть бути визначені похідні від зазначених функцій - $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$;

– відомі значення допустимих середньоквадратичних похибок σ_X, σ_Y, σ_Z, σ_{Vx}, σ_{Vy}, σ_{Vz} визначення компонент вектору стану, при яких забезпечується задана якість випробувань.

На жаль визначити повний вектор стану літаючого об’єкту (ЛО) при застосуванні лише одної оптико-електронної системи неможливо. Спробуємо вирішити дану задачу при застосуванні двох оптичних систем. Модель застосування систем уявлена на рис. 1. При цьому фазові центри систем О1 та О2 зміщені у просторі на відстань b та знаходяться під кутом φ відносно топоцентричних координат у площині XOZ.

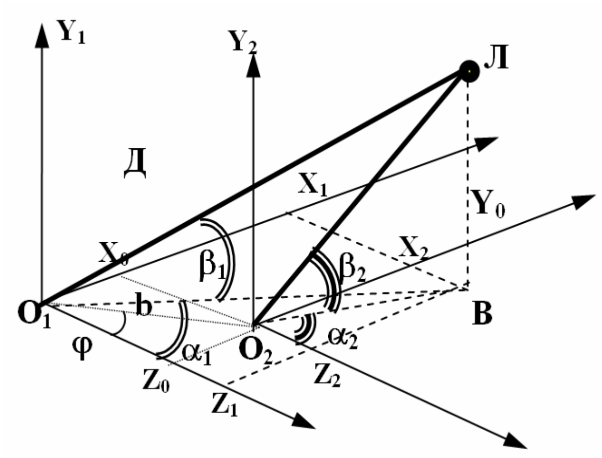

Рис. 1. Оптичні вимірювальні системи

Задача полягає в тому, щоб визначити відповідні вимоги до точності вимірювань навігаційних параметрів руху об'єкта по допустимим середньоквадратичним похибкам визначення координат та їх похідних.

Використовуючи рис. 1, запишемо:

$$X_0 = b\,\mathrm{Sin}\phi; \quad Z_0 = b\,\mathrm{Cos}\phi;$$
$$X_1 = X_0 + X_2; \; Z_1 = Z_0 + Z_2; \; Y_1 = Y_2 = Y_0; \tag{1}$$

$$X_2 = \frac{b \cdot \mathrm{Sin}(\alpha_1 - \phi)\mathrm{Sin}\alpha_2}{\mathrm{Sin}(\alpha_2 - \alpha_1)}; \tag{2}$$

$$Y_1 = Y_2 = \frac{b \cdot \mathrm{Sin}(\alpha_2 - \phi)}{\mathrm{Sin}(\alpha_2 - \alpha_1)}\mathrm{tg}\beta_1 = \frac{b \cdot \mathrm{Sin}(\alpha_1 - \phi)}{\mathrm{Sin}(\alpha_2 - \alpha_1)}\mathrm{tg}\beta_2; \tag{3}$$

$$Z_2 = \frac{b \cdot \mathrm{Sin}(\alpha_1 - \phi)\mathrm{Cos}\alpha_2}{\mathrm{Sin}(\alpha_2 - \alpha_1)}. \tag{4}$$

Подалі знайдемо відповідні швидкості.

$$V_x = \frac{b\dot{\alpha}_1 \mathrm{Cos}(\alpha_1-\phi)\mathrm{Sin}\alpha_2 + b\cdot\dot{\alpha}_2\mathrm{Sin}(\alpha_1-\phi)\mathrm{Cos}\alpha_2}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)} - \frac{b\cdot\mathrm{Sin}(\alpha_1-\phi)\mathrm{Sin}\alpha_2\cdot(\dot{\alpha}_2-\dot{\alpha}_1)\mathrm{Cos}(\alpha_2-\alpha_1)}{\mathrm{Sin}^2(\alpha_2-\alpha_1)}; \quad (5)$$

$$V_Y = \frac{b\cdot(\dot{\alpha}_2-\dot{\alpha}_1)\mathrm{Sin}(\alpha_2-\phi)\mathrm{Cos}(\alpha_2-\alpha_1)}{\mathrm{Sin}^2(\alpha_2-\alpha_1)}\mathrm{tg}\beta_1 + \frac{b\cdot\dot{\alpha}_1\mathrm{Cos}(\alpha_2-\phi)}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)}\mathrm{tg}\beta_1 + \frac{b\cdot\mathrm{Sin}(\alpha_2-\phi)\dot{\beta}_1}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)\mathrm{Cos}^2\beta_1} = \frac{b\cdot\dot{\alpha}_1\mathrm{Cos}(\alpha_1-\phi)}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)}\mathrm{tg}\beta_2 + \frac{b\cdot\mathrm{Sin}(\alpha_1-\phi)\dot{\beta}_2}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)\mathrm{Cos}^2\beta_2} + \frac{b\cdot\dot{\alpha}_2\mathrm{Sin}(\alpha_1-\phi)\mathrm{Cos}(\alpha_2-\alpha_1)}{\mathrm{Sin}^2(\alpha_2-\alpha_1)}\mathrm{tg}\beta_2; \quad (6)$$

$$V_Z = \frac{b\cdot\dot{\alpha}_1\mathrm{Cos}(\alpha_1-\phi)\mathrm{Cos}\alpha_2}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)} - \frac{b\cdot\dot{\alpha}_2\mathrm{Sin}(\alpha_1-\phi)\mathrm{Sin}\alpha_2}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)} - \quad (7)$$

$$-\frac{b\cdot(\dot{\alpha}_2-\dot{\alpha}_1)\mathrm{Sin}(\alpha_1-\phi)\mathrm{Cos}(\alpha_2-\alpha_1)\mathrm{Cos}\alpha_2}{\mathrm{Sin}^2(\alpha_2-\alpha_1)}.$$

Першим кроком вирішення задачі знайдемо повні диференціали виразів 1 – 7. При цьому одержимо

$$dx = \frac{\partial x}{\partial\alpha_1}d\alpha_1 + \frac{\partial x}{\partial\alpha_2}d\alpha_2; \quad (8)$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial\alpha_1}d\alpha_1 + \frac{\partial y}{\partial\beta_i}d\beta_i + \frac{\partial y}{\partial\alpha_2}d\alpha_2; \quad (9)$$

$$dz = \frac{\partial z}{\partial\alpha_1}d\alpha_1 + \frac{\partial z}{\partial\alpha_2}d\alpha_2; \quad (10)$$

$$dV_x = \frac{\partial V_x}{\partial\alpha_1}d\alpha_1 + \frac{\partial V_x}{\partial\alpha_2}d\alpha_2 + \frac{\partial V_x}{\partial\dot{\alpha}_1}d\dot{\alpha}_1 + \frac{\partial V_x}{\partial\dot{\alpha}_2}d\dot{\alpha}_2 + \frac{\partial V_x}{\partial(\dot{\alpha}_2-\dot{\alpha}_1)}d(\dot{\alpha}_2-\dot{\alpha}_1); \quad (11)$$

$$dV_y = \frac{\partial V_y}{\partial\dot{\alpha}_1}d\dot{\alpha}_1 + \frac{\partial V_y}{\partial(\alpha_1-\phi)}d(\alpha_1-\phi) + \frac{\partial V_y}{\partial(\alpha_2-\alpha_1)}d(\alpha_2-\alpha_1) + \frac{\partial V_y}{\partial\alpha_2}d\alpha_2 + \frac{\partial V_y}{\partial\dot{\alpha}_2}d\dot{\alpha}_2 + \frac{\partial V_y}{\partial\beta_1}d\beta_1 + \frac{\partial V_y}{\partial\dot{\beta}_1}d\dot{\beta}_1; \quad (12)$$

$$dV_z = \frac{\partial V_z}{\partial\alpha_1}d\alpha_1 + \frac{\partial V_z}{\partial\dot{\alpha}_1}d\dot{\alpha}_1 + \frac{\partial V_z}{\partial\alpha_2}d\alpha_2 + \frac{\partial V_z}{\partial\dot{\alpha}_2}d\dot{\alpha}_2. \quad (13)$$

Подалі знаходяться складові виразів 8 – 13. Так, наприклад,

$$\frac{\partial x}{\partial\alpha_1} = \frac{b\cdot\mathrm{Cos}(\alpha_1-\phi)\mathrm{Sin}\alpha_2\cdot\dot{\alpha}_1}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)} + \frac{b\cdot\mathrm{Sin}(\alpha_1-\phi)\mathrm{Sin}\alpha_2\mathrm{Cos}(\alpha_2-\alpha_1)\cdot\dot{\alpha}_1}{\mathrm{Sin}^2(\alpha_2-\alpha_1)};$$

$$\frac{\partial x}{\partial\alpha_2} = b\cdot\mathrm{Sin}(\alpha_1-\phi)\times\left[\frac{\mathrm{Cos}\alpha_2\cdot\dot{\alpha}_2}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)} - \frac{\mathrm{Sin}\alpha_2\mathrm{Cos}(\alpha_2-\alpha_1)\cdot\dot{\alpha}_2}{\mathrm{Sin}^2(\alpha_2-\alpha_1)}\right];$$

$$\frac{\partial y}{\partial\alpha_1} = \frac{b\cdot\mathrm{Sin}(\alpha_2-\phi)\mathrm{Cos}(\alpha_2-\alpha_1)\cdot\dot{\alpha}_1}{\mathrm{Sin}^2(\alpha_2-\alpha_1)}\mathrm{tg}\beta_1;$$

$$\frac{\partial y}{\partial\beta_1} = \frac{b\cdot\mathrm{Sin}(\alpha_2-\phi)\cdot\dot{\beta}_1}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)\mathrm{Cos}^2\beta_1};$$

$$\frac{\partial y}{\partial\alpha_2} = -\frac{b\cdot\mathrm{Sin}(\alpha_1-\phi)\mathrm{Cos}(\alpha_2-\alpha_1)\cdot\dot{\alpha}_2}{\mathrm{Sin}^2(\alpha_2-\alpha_1)}\mathrm{tg}\beta_2;$$

$$\frac{\partial z}{\partial\alpha_1} = b\cdot\mathrm{Cos}\alpha_2\times\left[\frac{\mathrm{Cos}(\alpha_1-\phi)\cdot\dot{\alpha}_1}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)} + \frac{\mathrm{Sin}(\alpha_1-\phi)\mathrm{Cos}(\alpha_2-\alpha_1)\cdot\dot{\alpha}_1}{\mathrm{Sin}^2(\alpha_2-\alpha_1)}\right];$$

$$\frac{\partial z}{\partial\alpha_2} = b\cdot\mathrm{Sin}(\alpha_1-\phi)\times\left[\frac{\mathrm{Sin}\alpha_2\cdot\dot{\alpha}_2}{\mathrm{Sin}(\alpha_2-\alpha_1)} - \frac{\mathrm{Cos}\alpha_2\mathrm{Cos}(\alpha_2-\alpha_1)\cdot\dot{\alpha}_2}{\mathrm{Sin}^2(\alpha_2-\alpha_1)}\right];$$

Припускаючи, що похибки вимірювання навігаційних функцій статистично незалежні і розподілені за нормальним законом, причому систематичні похибки дорівнюють нулю, запишемо:

$$\sigma^2{}_x = \left(\frac{\partial x}{\partial\alpha_1}\right)^2\sigma^2_{\alpha_1} + \left(\frac{\partial x}{\partial\alpha_2}\right)^2\sigma^2_{\alpha_2}; \quad (14)$$

$$\sigma^2{}_y = \left(\frac{\partial y}{\partial\alpha_1}\right)^2\sigma^2_{\alpha_1} + \left(\frac{\partial y}{\partial\beta_i}\right)^2\sigma^2_{\beta_i} + \left(\frac{\partial y}{\partial\alpha_2}\right)^2\sigma_{\alpha_2}; \quad (15)$$

$$\sigma^2{}_z = \left(\frac{\partial z}{\partial\alpha_1}\right)^2\sigma^2_{\alpha_1} + \left(\frac{\partial z}{\partial\alpha_2}\right)^2\sigma^2_{\alpha_2}; \quad (16)$$

$$\sigma^2{}_{V_x} = \left(\frac{\partial V_x}{\partial\alpha_1}\right)^2\sigma^2_{\alpha_1} + \left(\frac{\partial V_x}{\partial\alpha_2}\right)^2\sigma^2_{\alpha_2} + \left(\frac{\partial V_x}{\partial\dot{\alpha}_1}\right)^2\times\sigma^2_{\dot{\alpha}_1} + \left(\frac{\partial V_x}{\partial\dot{\alpha}_2}\right)^2\sigma^2_{\dot{\alpha}_2} + \left(\frac{\partial V_x}{\partial(\dot{\alpha}_2-\dot{\alpha}_1)}\right)^2\sigma^2_{(\alpha_2-\alpha_1)}; \quad (17)$$

$$\sigma^2_{V_y} = \left(\frac{\partial V_y}{\partial \dot{\alpha}_1}\right)^2 \sigma^2_{\dot{\alpha}_1} + \left(\frac{\partial V_y}{\partial(\alpha_1 - \phi)}\right)^2 \sigma^2_{(\alpha_1-\phi)} + \left(\frac{\partial V_y}{\partial(\alpha_2 - \alpha_1)}\right)^2 \sigma^2_{(\alpha_2-\alpha_1)} + \left(\frac{\partial V_y}{\partial \alpha_2}\right)^2 \sigma^2_{\alpha_2} + \left(\frac{\partial V_y}{\partial \dot{\alpha}_2}\right) \sigma^2_{\dot{\alpha}_2} + \left(\frac{\partial V_y}{\partial \beta_1}\right)^2 \sigma^2_{\beta_1} + \left(\frac{\partial V_y}{\partial \dot{\beta}_1}\right)^2 \sigma^2_{\dot{\beta}_1}; \quad (18)$$

$$\sigma^2_{V_z} = \left(\frac{\partial V_z}{\partial \dot{\alpha}_1}\right)^2 \sigma^2_{\dot{\alpha}_1} + \left(\frac{\partial V_z}{\partial \alpha_1}\right)^2 \sigma^2_{\alpha_1} + \left(\frac{\partial V_z}{\partial \alpha_2}\right)^2 \sigma^2_{\alpha_2} + \left(\frac{\partial V_z}{\partial \dot{\alpha}_2}\right)^2 \sigma^2_{\dot{\alpha}_2}. \quad (19)$$

Кінцево вимоги до точності вимірювань навігаційних функцій сформулюємо із таких умов:

$$\sigma_{\alpha 1} = \min\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x \Big/ \left(\sqrt{2} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial x}{\partial \alpha_1}\right|\right), ..., \\ \sigma_{Vz} \Big/ \left(\sqrt{4} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial V_z}{\partial \alpha_1}\right|\right) \end{array} \right\}; \quad (20)$$

$$\sigma_{\alpha 2} = \min\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x \Big/ \left(\sqrt{2} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial x}{\partial \alpha_2}\right|\right), ..., \\ \sigma_{Vz} \Big/ \left(\sqrt{4} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial V_z}{\partial \alpha_2}\right|\right) \end{array} \right\}; \quad (21)$$

$$\sigma_{\beta_1} = \min\left\{ \begin{array}{l} \sigma_Y \Big/ \left(\sqrt{3} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial Y}{\partial \beta_1}\right|\right); \\ \sigma_{V\text{н}} \Big/ \left(\sqrt{7} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial V_Y}{\partial \beta_1}\right|\right) \end{array} \right\}; \quad (22)$$

$$\sigma_{\beta_2} = \min\left\{ \sigma_Y \Big/ \left(\sqrt{3} \max\limits_t \left|\frac{\partial Y}{\partial \beta_2}\right|\right) \right\}; \quad (23)$$

$$\sigma_{\dot{\alpha}1} = \min\left\{ \begin{array}{c} \dfrac{\sigma_{Vx}}{\sqrt{5} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial Vx}{\partial \dot{\alpha}_1}\right|}, \dfrac{\sigma_{Vz}}{\sqrt{4} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial V_z}{\partial \dot{\alpha}_1}\right|}, \\ \sigma_{Vy} \Big/ \left(\sqrt{7} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial V_y}{\partial \dot{\alpha}_1}\right|\right) \end{array} \right\}; \quad (24)$$

$$\sigma_{\dot{\alpha}2} = \min\left\{ \begin{array}{c} \dfrac{\sigma_{Vx}}{\sqrt{5} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial Vx}{\partial \dot{\alpha}_2}\right|}, \dfrac{\sigma_{Vy}}{\sqrt{7} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial V_y}{\partial \dot{\alpha}_2}\right|}; \\ \dfrac{\sigma_{Vz}}{\sqrt{4} \max\limits_t \left|\dfrac{\partial V_z}{\partial \dot{\alpha}_2}\right|} \end{array} \right\}; \quad (25)$$

$$\sigma_{\dot{\beta}1} = \min\left\{ \sigma_{Vy} \Big/ \left(\sqrt{7} \max\limits_t \left|\frac{\partial V_y}{\partial \dot{\beta}_1}\right|\right) \right\}. \quad (26)$$

Висновок

У статті запропонована методика обґрунтування вимог до точності оптико-електронних вимірювальних систем. Виходячи з запропонованої методики, знаючи дисперсії допустимих похибок визначення компонентів вектору стану літального об'єкту, можна визначити вимоги до точності вимірювань параметрів руху літальних об'єктів за допомогою оптико-електронних систем, застосовуючи виведені у даній статті вирази (20) – (26).

Список літератури

1. Валькович С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Р и С, 1981. – 288 с.

2. Колемаев В.А. Теория вероятностей и математическая статистика / В.А. Колемаев, О.В. Староверов, В.Б. Турундаевский. – М.: Высш. шк., 1991. – 400 с.

3. Хомяков Э.Н. Вопросы статистической теории оптимальных измерительных систем / Э.Н. Хомяков. – М.: МО СССР, 1972. – 224 с.

4. Чердынцев В.А. Радиотехнические системы / В.А. Чердынцев. – М-ск.: Вышэйшая школа, 1988. –.370 с.

5. Вагапов В.Б. Автоматика радиоэлектронных систем / В.Б. Вагапов. – К.: Выща школа, 1988. – 352 с.

Надійшла до редколегії 1.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. ГВ. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

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

Приведена методика определения требований к точности оптико-електронних измерительных систем при известных значениях дисперсий допустимых погрешностей определения компонент вектора состояния летательного объекта.

Ключевые слова: *точность измерений, полигонный измерительно-вычислительный комплекс, оптическая система.*

GROUND OF REQUIREMENTS TO EXACTNESS OF THE OPTICAL-ELECTRONIC MEASURINGS SYSTEMS

N.V. Barkhudaryan, K.K. Kulagin, A.M. Mishukov, B.A. Chumak

The method of determination of requirements is resulted to exactness of оптико-електронних of the measurings systems at the known values of dispersions of permissible errors of determination component of vector of the state of flying object.

Keywords: *exactness of measurings, ground измерительно-вычислительный complex, optical system.*