

# Обробка інформації в складних технічних системах

УДК 004.932

С.И. Березина

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## ПОЛУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В статье проведен анализ возможности использования беспилотных летательных аппаратов для определения пространственных координат объекта. Обоснована целесообразность использования синтезированной стереосистемы за счет движения беспилотного летательного аппарата. Разработана методика оценки потенциальных точностей пространственных координат объекта с учетом погрешностей локализации смежных точек на снимках и элементов внешнего ориентирования съёмочной аппаратуры. Обоснована необходимость предварительной отбраковки полученной информации и использования алгоритмов нечеткого маскирования, а так же необходимость уточнения элементов внешнего ориентирования. Разработаны требования к условиям съемки.

**Ключевые слова:** оптическая стереосистема, пространственные координаты объекта, беспилотный летательный аппарат.

### Введение

На сегодняшний день ГИС становятся универсальной средой для построения многофункциональных информационно-аналитических и управляющих систем. Одним из основных элементов таких систем является пространственная трехмерная модель территории. На сегодняшний день, для решения задачи получения исходных материалов при ее построении используется синтез данных лазерных сканеров, фотографий и стереопар. Однако при проведении съемки с Земной поверхности возникают препятствия в виде транспорта и соседних объектов, которые затрудняют, а то и делают невозможной, проведение измерений. Стремительное развитие беспилотных летательных аппаратов позволяет рассматривать их в качестве альтернативного источника данных, так как способны осуществлять оперативную съемку на небольшой высоте в автоматическом режиме и исключить перечисленные мешающие факторы. Для этих целей наиболее пригодны малые беспилотные летательные аппараты (МБПЛА) вертолетного типа, обладающие высокой маневренностью и возможностью зависать на различной высоте во время съемки [1, 2]. Варианты получения исходных данных для определения пространственных координат точек объекта рассмотрим более подробно. В качестве исходных данных для расчетов примем характеристики фотоаппарата Canon Powershot SX110is: фокусное расстояние - 35 мм, размер снимка 3456 x 2592 пикселей, размер ячейки ПЗС матрицы 11 мкм. Ориентация съёмочной аппаратуры и принятая сис-

тема координат приведена на рис. 1. Система должна обеспечить точность определения пространственных координат точек объекта – 2 см.

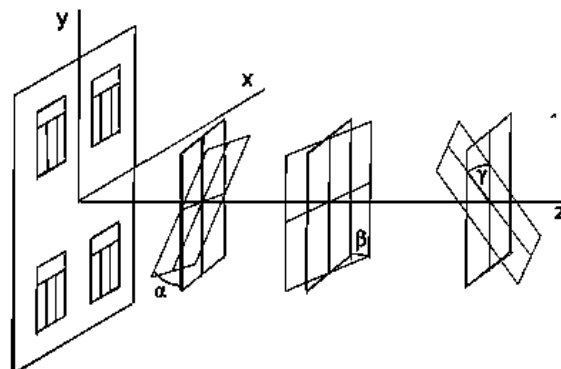


Рис. 1. Принятая система координат и ориентации фотоаппарата

### 1. Исследование условий съемки для обеспечения заданной точности

Одним из существенных факторов, влияющих на точность определения пространственных координат точек объекта, является база стереопары. В связи с небольшими размерами МБПЛА ее размер ограничивался 1 м.

На паре перекрывающихся снимков пространственные координаты точки определяются по следующим формулам:

$$\begin{cases} Z = (X_{S2} - X_{S1} + Z_{S1} \cdot D_1 - Z_{S2} \cdot D_2) / D_3; \\ X = (Z - Z_{S1}) \cdot D_1 + X_{S1}; \\ Y = (Z - Z_{S1}) \cdot D_4 + Y_{S1}. \end{cases}$$

где  $X_{Si}$ ,  $Y_{Si}$ ,  $Z_{Si}$  – пространственное положение  $i$ -го фотоаппарата;

$$D_1 = (a_{11} \cdot (x_1 - x_{01}) + a_{21} \cdot (y_1 - y_{01}) - a_{31} \cdot f) / ((c_{11} \cdot (x_1 - x_{01}) + c_{21} \cdot (y_1 - y_{01}) - c_{31} \cdot f);$$

$$D_2 = (a_{12} \cdot (x_2 - x_{02}) + a_{22} \cdot (y_2 - y_{02}) - a_{32} \cdot f) / ((c_{12} \cdot (x_2 - x_{02}) + c_{22} \cdot (y_2 - y_{02}) - c_{32} \cdot f);$$

$$D_3 = (a_{11} \cdot (x_1 - x_{01}) + a_{21} \cdot (y_1 - y_{01}) - a_{31} \cdot f) / ((c_{11} \cdot (x_1 - x_{01}) + c_{21} \cdot (y_1 - y_{01}) - c_{31} \cdot f) - (a_{12} \cdot (x_2 - x_{02}) + a_{22} \cdot (y_2 - y_{02}) - a_{32} \cdot f) / ((c_{12} \cdot (x_2 - x_{02}) + c_{22} \cdot (y_2 - y_{02}) - c_{32} \cdot f);$$

$$D_4 = (b_{11} \cdot (x_1 - x_{01}) + b_{21} \cdot (y_1 - y_{01}) - b_{31} \cdot f) / ((c_{11} \cdot (x_1 - x_{01}) + c_{21} \cdot (y_1 - y_{01}) - c_{31} \cdot f);$$

$x_i, y_i$  – координаты образа точки на  $i$ -м снимке;  $x_i = x'_i \cdot \rho; y_i = y'_i \cdot \rho; x'_i, y'_i$  – координаты точки на  $i$ -м снимке в пикселях;  $\rho$  – размер ячейки ПЗС-матрицы;  $x_{0i}, y_{0i}$  – координаты центра  $i$ -го снимка;  $a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, b_{1i}, b_{2i}, b_{3i}, c_{1i}, c_{2i}, c_{3i}$  – направляющие косинусы фотоаппарата в момент съемки  $i$ -го кадра [3];  $f$  – фокусное расстояние фотоаппаратов.

При нахождении пространственных координаты, необходимо выполнения условия сдвига точки на 2-х смежных снимках (рис. 2), а, следовательно, обеспечение условий наблюдения.

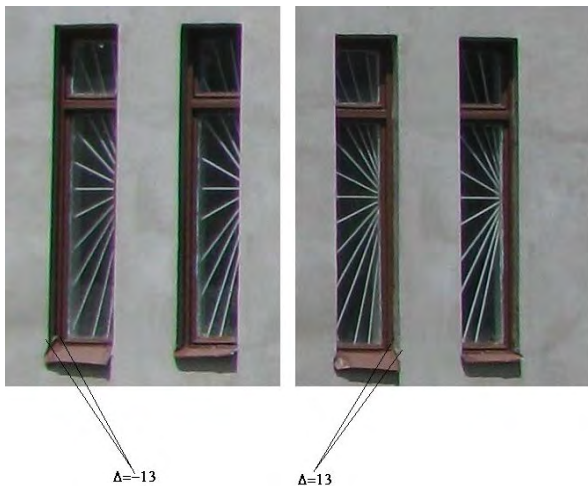


Рис. 2. Сдвиг соответствующих пар точек на снимках стереопары

На рис. 3 представлены зоны обеспечения заданной точности определения координаты  $Z$  в точке 0 (ось абсцисс). Ось ординат соответствует расстоянию съемочной аппаратуры до объекта съемки. Как видно из рис. 3, для обеспечения заданной точности при максимально возможном размере базы дальность до объекта съемки не должна превышать 14 м. При этом периодичность съемки должна быть не более 1 м пространственного перемещения стереосистемы.

После проведенных исследований можно сделать вывод о том, что точность определения перепада координаты  $Z$  с погрешностью до 2 см с использованием стереосистемы, не может быть обеспечена при дальности до объекта съемки свыше 14 м. Так как для

выполнения условий безопасности полетов дальность до снимаемого объекта должна быть не менее 15 м становится очевидным, что установка на беспилотном летательном аппарате 2-х фотоаппаратов не рациональна.

В результате проведенной работы, предлагается использовать один фотоаппарат, а базу синтезировать за счет пространственного перемещения летательного аппарата. Экспериментальные данные подтвердили возможность получения пространственных координат точек объекта при использовании серии снимков, полученных с одного фотоаппарата за счет синтеза базы больших размеров (рис. 2).

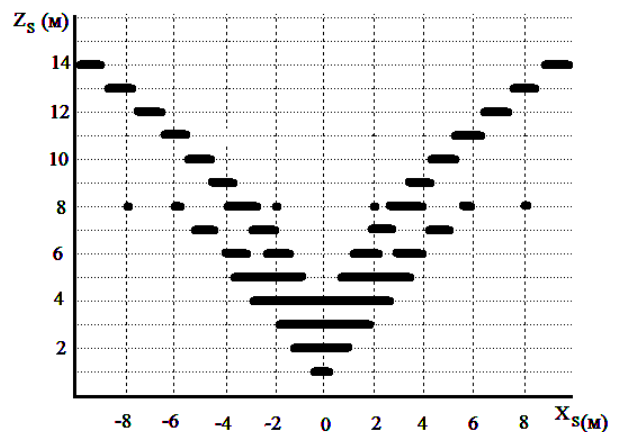


Рис. 3. Зоны возможного обнаружения  $Z$  с погрешностью не более 2 см.

## 2. Оценка потенциальной точности измерения координат объекта по данным БПЛА с учетом погрешности определения сопряженных точек на изображении

Для оценки потенциальной точности определения пространственных координат объекта будем считать, что элементы внешнего ориентирования ( $X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \beta, \gamma$ ) известны без ошибок. Предположим, что координаты точки ( $X, Y, Z$ ), проецируются на 2 снимка в точки с координатами  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$ .

$$\begin{cases} F_{xi} = x_i - x_{0i} = -f(a_{1i}(X - X_{si}) + b_{1i}(Y - Y_{si}) + c_{1i}(Z - Z_{si})) / (a_{3i}(X - X_{si}) + b_{3i}(Y - Y_{si}) + c_{3i}(Z - Z_{si})); \\ F_{yi} = y_i - y_{0i} = -f(a_{2i}(X - X_{si}) + b_{2i}(Y - Y_{si}) + c_{2i}(Z - Z_{si})) / (a_{3i}(X - X_{si}) + b_{3i}(Y - Y_{si}) + c_{3i}(Z - Z_{si})). \end{cases} \quad (1)$$

Вектор, определяющий координаты точки на снимке, зависит от погрешностей определения ее пространственных координат.

$$\begin{cases} F_x = x + \Delta x; \\ F_y = y + \Delta y. \end{cases} \quad (2)$$

Эти погрешности разложим в ряд Тейлора [4]:

$$\begin{cases} \Delta x = \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \left( \frac{\partial}{\partial X} \delta X + \frac{\partial}{\partial Y} \delta Y + \frac{\partial}{\partial Z} \delta Z \right)^k \times \\ \quad \times F_x(\xi, X, Y, Z) + R_n; \\ \Delta y = \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \left( \frac{\partial}{\partial X} \delta X + \frac{\partial}{\partial Y} \delta Y \right)^k F_y(\xi, X, Y, Z) + R_n, \end{cases}$$

где  $X, Y, Z$  – точные пространственные координаты точки;  $\delta X, \delta Y, \delta Z$  – ошибки определения пространственных координат;  $\xi$  – вектор элементов внешнего ориентирования фотоаппарата;  $R_n$  – остаточный член ряда.

Символом  $\left( \frac{\partial}{\partial X} \delta X + \frac{\partial}{\partial Y} \delta Y \right)^k F_x(\xi, X, Y, Z)$  обозначены соответственно выражения:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial X} \delta X + \\ + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial Y} \delta Y + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial Z} \delta Z \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial X \partial X} \delta^2 X + \\ + \frac{\partial^2 F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial Y \partial Y} \delta^2 Y + \frac{\partial^2 F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial Z \partial Z} \delta^2 Z \end{pmatrix} \text{ и т.д.}$$

Так как приращения  $\delta X, \delta Y, \delta Z$  малы, то слагаемыми, которые имеют в качестве множителей приращения  $\delta X, \delta Y, \delta Z$  в степени выше первой, можно пренебречь. Соответственно получим:

$$\Delta x = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial X} \delta X + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial Y} \delta Y + \\ + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial Z} \delta Z \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\Delta y = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial X} \delta X + \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial Y} \delta Y + \\ + \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial Z} \delta Z \end{pmatrix}; \quad (4)$$

Систему уравнений (1) представим в виде вектор – столбца для двух смежных снимков и введем следующие обозначения:

$$\mathbf{F}_\Delta = \begin{pmatrix} F_x - x|_1 \\ F_y - y|_1 \\ F_x - x|_2 \\ F_y - y|_2 \end{pmatrix}; \quad \Delta = \begin{pmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial X} \\ \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial Y} \\ \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial X} \\ \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial Y} \end{pmatrix}.$$

Получаем следующее уравнение

$$\mathbf{F}_\Delta = \mathbf{A} \Delta. \quad (5)$$

Умножим обе части уравнения (5) на транспонированные им матрицы и усредним

$$\overline{\mathbf{F}_\Delta \cdot \mathbf{F}_\Delta^T} = \overline{\mathbf{A} \cdot \Delta \cdot (\mathbf{A} \cdot \Delta)^T}.$$

С учетом детерминированности векторов  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{A}^T$  относительно корреляционной матрицы ошибок измерений получим следующее выражение:

$$\mathbf{K}_r = \overline{\mathbf{A} \mathbf{K}_p \mathbf{A}^T}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{K}_r = \overline{\mathbf{F}_\Delta \cdot \mathbf{F}_\Delta^T}$  – корреляционная матрица ( $4 \times 4$ ) ошибок определений координат на снимке;  $\mathbf{K}_p = \overline{\Delta \cdot \Delta^T}$  – искомая матрица ( $3 \times 3$ ) ошибок определения элементов внешнего ориентирования.

Умножим (6) слева на  $\mathbf{A}^T$ , а справа на  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A}^T \mathbf{K}_r \mathbf{A} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{K}_p \mathbf{A}^T \mathbf{A}. \quad (7)$$

Заметим, что в правой части уравнения (7) – квадратная матрица  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$  размерностью ( $3 \times 3$ ).

После умножения обеих частей уравнения (7) с левой и правой стороны на матрицу  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$ , обратную  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ , получим

$$\begin{aligned} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{K}_r \cdot \mathbf{A} \cdot (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \\ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{K}_p \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} \cdot (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

так как  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{A}) = \mathbf{I}$ , где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица, выражение (8) придет к виду

$$(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{K}_r \cdot \mathbf{A} \cdot (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{K}_p.$$

Для случая равноточных и взаимно независимых измерений

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_r = \sigma_r^2 \cdot \mathbf{I}; (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \sigma_r^2 \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{A} \cdot (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{K}_p; \\ \sigma_r^2 \cdot (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} \cdot (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{K}_p. \end{aligned}$$

С учетом того, что  $(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} = \mathbf{I}$ , окончательно получим формулу для оценки потенциальной точности определения пространственных координат

$$\mathbf{K}_p = \sigma_r^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}, \quad (9)$$

где  $\sigma_r^2$  – дисперсия ошибок единичных измерений.

Результаты оценки потенциальной точности определения координат в зависимости от погрешностей задания координат точек на снимке приведены на рисунке 4 для случая, когда элементы внешнего ориентирования были следующими:

$$X_{S1} = 4,52 \text{ м}; Y_{S1} = 25,29 \text{ м}; Z_{S1} = 12,88 \text{ м};$$

$$\alpha_1 = -57,8^0; \beta_1 = -7,19^0; \gamma_1 = -0,77^0;$$

$$X_{S2} = 1,29 \text{ м}; Y_{S2} = 25,43 \text{ м}; Z_{S2} = 12,28 \text{ м};$$

$$\alpha_2 = -59,01^0; \beta_2 = -1,94^0; \gamma_2 = -9,49^0.$$

Точка на снимках имела координаты:

$$x_1 = 1943; y_1 = 1522; \quad x_2 = 1904; y_2 = 1516.$$

Большая чувствительность координаты  $Y$  на погрешность входных параметров связана с условиями проведения съемки (большие значения углов  $\alpha_1 = -57,8^0$  и  $\alpha_2 = -59,01^0$ ).

Из проведенных исследований можно сделать вывод о том, что при проведении измерений пространственных координат необходимо проводить предварительный анализ качества снимков.

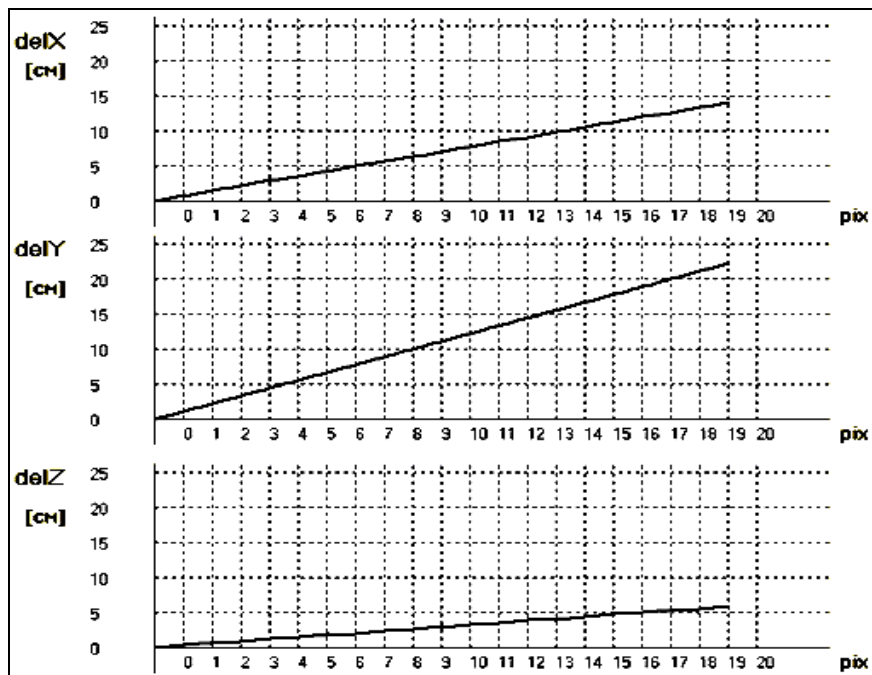


Рис. 4. Влияние погрешности задания координат точки на снимке на точность определения пространственных координат

В качестве критерия отбраковки необходимо использовать величину «смаза» (четкость границ) [6, 7]. На рис. 5, а непригодный для использования снимок, рис. 5, б – снимок прошедший отбор.



Рис. 5. Входные данные для проведения измерений координат а – изображение с размытыми границами вследствие вибрирования МБПЛА, б – качественное изображение.

### 3. Оценка потенциальной точности измерения координат объекта по данным БПЛА с учетом погрешностей определения элементов внешнего ориентирования фотоаппарата

При проведении съемки элементы внешнего ориентирования фотоаппарата определяются с некой погрешностью, причиной которой является, во-первых, несогласованность момента съемки и момента измерения параметров полета БПЛА погрешностью измерительной аппаратуры, вибрацией БПЛА, а следовательно и расположенного на нем фотоаппарата. При учете погрешности определения элементов внешнего ориентирования уравнения (3), (4) преобразовываются к следующему виду:

$$\Delta x = \left( \begin{array}{l} \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial X} \delta X + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial Y} \delta Y + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial Z} \delta Z + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial X_S} \delta X_S + \\ + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial Y_S} \delta Y_S + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial Z_S} \delta Z_S + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial \beta} \delta \beta + \frac{\partial F_x(\xi, X, Y, Z)}{\partial \gamma} \delta \gamma \end{array} \right);$$

$$\Delta y = \left( \begin{array}{l} \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial X} \delta X + \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial Y} \delta Y + \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial Z} \delta Z + \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial X_S} \delta X_S + \\ + \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial Y_S} \delta Y_S + \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial Z_S} \delta Z_S + \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial \beta} \delta \beta + \frac{\partial F_y(\xi, X, Y, Z)}{\partial \gamma} \delta \gamma \end{array} \right).$$

Для нахождения погрешности определения пространственных координат объекта с учетом погрешности определения элементов внешнего

ориентирования (2) перенесем в левую часть все параметры, не зависящие от местоположения объ-

$$F_{xi}(\xi_i, X, Y, Z) - x_i - \frac{\partial F_{xi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial X_{Si}} \delta X_{Si} - \frac{\partial F_{xi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial Y_{Si}} \delta Y_{Si} - \frac{\partial F_{xi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial Z_{Si}} \delta Z_{Si} - \frac{\partial F_{xi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial \alpha_i} \delta \alpha_i - \\ - \frac{\partial F_{xi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial \beta_i} \delta \beta_i - \frac{\partial F_{xi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial \gamma_i} \delta \gamma_i = \frac{\partial F_{xi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial X} \delta X + \frac{\partial F_{xi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial Y} \delta Y + \frac{\partial F_{xi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial Z} \delta Z;$$

$$F_{yi}(\xi_i, X, Y, Z) - y_i - \frac{\partial F_{yi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial X_{Si}} \delta X_{Si} - \frac{\partial F_{yi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial Y_{Si}} \delta Y_{Si} - \frac{\partial F_{yi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial Z_{Si}} \delta Z_{Si} - \frac{\partial F_{yi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial \alpha_i} \delta \alpha_i - \frac{\partial F_{yi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial \beta_i} \delta \beta_i - \frac{\partial F_{yi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial \gamma_i} \delta \gamma_i = \frac{\partial F_{yi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial X} \delta X + \frac{\partial F_{yi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial Y} \delta Y + \frac{\partial F_{yi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial Z} \delta Z.$$

Введем следующие обозначения

$$F_{\Delta} = \begin{pmatrix} F_{x1}(\xi_1, X, Y, Z) - x_1 \\ F_{y1}(\xi_1, X, Y, Z) - y_1 \\ F_{x2}(\xi_2, X, Y, Z) - x_2 \\ F_{y2}(\xi_2, X, Y, Z) - y_2 \end{pmatrix} \quad - \text{потенциальные}$$

погрешности измерения разности дальностей,

$$A_i \Delta_i = \frac{\partial F_{xi}(\xi_i, X, Y, Z)}{\partial \xi_i} \Delta_{\xi_i} \quad - \text{ошибки измерения, обусловленные погрешностью определения элементов внешнего ориентирования для } i\text{-го снимка,}$$

обусловленные погрешностью определения элементов внешнего ориентирования для  $i$ -го снимка,

$B_{\Delta p}$  – погрешность, зависящая от погрешности определения пространственных координат объекта.

С учетом введенных обозначений

$$F_{\Delta} - A \cdot \Delta = B \cdot \Delta_p. \quad (10)$$

Из уравнения (10) получим уравнение для определения корреляционной матрицы  $K_p$  ошибок определения пространственных координат объекта. Для этого левую и правую части уравнения (10) умножим на транспонированные им матрицы и усредним результат перемножения

$$\overline{(F_{\Delta} - A \Delta) \cdot (F_{\Delta} - A \Delta)^T} = \overline{B \Delta_p (B \Delta_p)^T}.$$

При математических преобразованиях учтем, что  $F_{\Delta}$ ,  $A \Delta$  взаимно некоррелированы. Следовательно

но, после перемножения и усреднения получим

$$\overline{F_{\Delta} F_{\Delta}^T} + \overline{A \Delta \Delta^T A^T} = \overline{B \Delta_p \Delta_p^T B^T}. \quad (11)$$

Обозначим через  $K_r$  – корреляционную матрицу ошибок образа точки на снимках, а через  $K$  – матрицу ошибок определения элементов внешнего ориентирования.

С учетом введенных обозначений, уравнение (11) преобразовывается к виду

$$K_r + A K A^T = B K_p B^T. \quad (12)$$

Помножив обе части уравнения (12) с левой стороны на  $B^T$ , а с правой на  $B$ , получим

$$B^T (K_r + A K A^T) B = B^T B \cdot K_p \cdot B^T B. \quad (13)$$

Умножив обе части уравнения (13) с левой и правой стороны на матрицу, обратную  $(B^T B)$ , получим формулу для определения потенциальной точности измерения пространственных координат с учетом погрешности определения элементов внешнего ориентирования фотоаппарата.

$$K_p = (B \cdot B^T)^{-1} \cdot B^T \cdot (K_r + A \cdot K \cdot A^T) \cdot B \cdot (B \cdot B^T)^{-1}.$$

Результаты расчета зависимостей погрешности определения пространственных координат от погрешностей определения углов элементов внешнего ориентирования при тех же начальных условиях представлены на рис. 6.

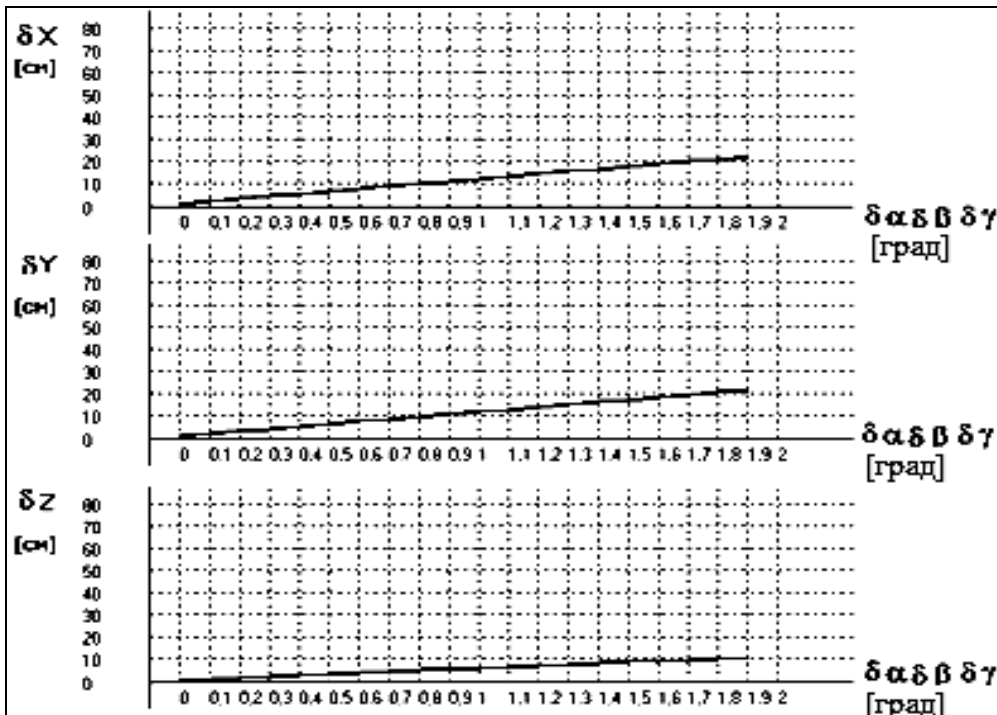


Рис. 6. Погрешность определения пространственных координат объекта от погрешностей определения углов элементов внешнего ориентирования

Как видно из рисунка 6 координата Z наименее чувствительна к угловой погрешности. Это объясняется большой базой стереопары, которая в данном случае составила 3.5 метра.

Принимая во внимание, что погрешности навигационной аппаратуры на борту МБПЛА по определению углов колеблются в пределах  $\pm 2^0$  ошибка будет в среднем составлять 15 см. Для ее минимизации необходимо проводить уточнение значений элементов внешнего ориентирования.

### Заключение

В заключение хотелось бы отметить, что высокую точность определения пространственных координат объекта можно обеспечить, используя один фотоаппарат и синтезируя стереосистему за счет передвижения МБПЛА, съемочная аппаратура должна быть, оснащена демпфирующим устройством, для компенсации вибрации во время съемки. В связи с высокой чувствительности точности определения пространственных координат к точности задания точек на снимке, нерезкие изображения должны быть отбракованы, а оставшиеся подвергнуты операции нечеткого маскирования для локализации точки перепада цвета [8].

На точность определения пространственных координат объекта влияют условия проведения съемки и погрешности определения элементов внешнего ориентирования. Следовательно, в момент съемки необходимо обеспечить минимальные углы поворота, а перед обработкой проводить операции уточнения элементов внешнего ориентирования и оценивания их потенциальной точности, для учета при определении координат точек объекта.

При построении триангуляционной модели объекта необходимо проводить учет потенциальной точности координат точек и минимизировать погрешность за счет априорно известных плоскостей объекта.

### Список литературы

1. Беспилотные летательные аппараты: Методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик / В.М. Илюшко, М.М. Митрахович и др. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2009. – 304 с.
2. Беспилотные авиационные комплексы: Методика сравнительной оценки боевых возможностей / М.М. Митрахович, В.И. Силков, А.В. Самков и др. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. – 284 с.
3. Лобанов А.Н. Фотограмметрия: Учебник для вузов / А.Н. Лобанов. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
4. Агаджанов П.А. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных / П.А. Агаджанов, В.Е. Дулевич, А.А. Коростелов. – М.: Сов. радио, 1969. – 498 с.
5. Березина С.И. Однобазовый измеритель координат наземного источника излучения с использованием космических аппаратов / С.И. Березина, Д.В. Голкин // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вип. 1(17). – С. 194–197.
6. Кольцов П.П. Оценка размытия изображения / П.П. Кольцов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 95–102.
7. Мониц Ю.И. Оценки качества для анализа цифровых изображений / Ю.И. Мониц, В.В. Старовойтов // М.: Искусственный интеллект. – 2008. – Вип. 4. – С. 376–386.
8. Форсайт, П. Компьютерное зрение, современный подход / П. Форсайт. – К: Вильямс, 2004. – 926 с.

Поступила в редколлегию 18.05.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ОТРИМАННЯ ПРОСТОРОВИХ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТА З ВИКОРИСТОВУВАННЯМ ДАНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

С.І. Березіна

*В статті проведено аналіз можливості використання МБПЛА для визначення координат об'єкту у просторі. Обґрунтовано доцільність використання синтезованої стереосистеми за рахунок переміщення МБПЛА. Запропонована методика визначення потенційної точності знаходження просторових координат об'єкту з урахуванням похибок визначення суміжних точок на знімках та елементів зовнішнього орієнтування знімальної апаратури. Обґрунтована необхідність попередньої відбраковки отриманої інформації та використання алгоритмів нечіткого маскування, а також необхідність уточнення елементів зовнішнього орієнтування. Розроблені вимоги до умов зйомки.*

**Ключеві слова:** оптична стереосистема, просторові координати об'єкту, безпілотний літальний апарат.

### OBTAINING SPATIAL COORDINATES OF AN OBJECT USING THE DATA FROM THE UNMANNED AERIAL VEHICLES

S.I. Berezina

*The analysis of the possibility of using unmanned aerial vehicles has been carried to determine the spatial coordinates of an object. The expediency of using of a synthesized stereo system due to the motion of unmanned aerial vehicle has been substantiated. The potential accuracy of finding the spatial coordinates of an object has been picked taking into account the errors in the determination of adjacent points on the image and surveying equipment exterior orientation elements. The necessity of preliminary rejection of the received information and the usage of algorithms for fuzzy masking has been substantiated. As well as the necessity for clarification the exterior orientation elements. The requirements for the surveying conditions have been elaborated.*

**Keywords:** optical stereo system, spatial coordinates of an object, unmanned aerial vehicle.