

УДК 629.7.05, 621.398

© Кукушкин С.С., Гулый Н.Н.  
Kukooschkin S., Gooluy N.

## НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТРАЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ ИСПЫТАНИЙ

### NEW METHODS AND TECHNOLOGIES OF PROCESSING OF VIDEO IMAGES AT NATURAL TESTS OF COMPLICATED TECHNICAL SYSTEMS

**Аннотация.** Статья посвящена разработке новых методов и технологий обработки оптической информации, полученной на основе видеоизображений при совмещенных натурных испытаниях нескольких сложных технических систем. Показано, что наилучшие результаты могут быть достигнуты при использовании адаптивной процедуры, определяющей допустимую степень обострения контуров изображений.

**Annotation.** Article is devoted working out of new methods and technologies of processing of the optical information received on the basis of video images at combined natural tests of several complicated technical systems. It is shown, that the best results can be reached at use of the adaptive procedure defining admissible degree of an aggravation of contours of images.

**Ключевые слова.** Натурное испытание, сложная техническая система, метод, технология обработки, оптическая информация, видеоизображение.

**Key words.** Full scale testing, a complex technical system, method, technology, processing, optical information, the video image.

Принцип получения измерений любыми оптическими системами траекторных измерений (ОСТИ) заключается в получении угломерной информации положения оптической оси теодолита и кадров с плоскими изображениями района экспонирования, на которых зафиксированы объекты испытаний. Для получения угломерной информации требуется наличие высокоточных датчиков, измеряющих азимут по горизонтальной оси теодолита и угол места по вертикальной оси теодолита, преобразователей «угол-код». Кроме того, для получения измерений требуется проведение множества регулировок и настроек, в том числе: горизонтирование теодолита ОСТИ, выставка перпендикулярности горизонтальной и вертикальной осей теодолита; устранение коллимационной ошибки; определение точного фокусного расстояния; регулирование отсчетной системы теодолита (системы горизонтального датчика и системы вертикально-датчика). Все это предполагает наличие у ОСТИ слож-

ных и дорогостоящих узлов и механизмов.

Измеряемыми параметрами любой ОСТИ являются горизонтальные координаты направления с точки стояния ОСТИ на объект испытаний. Горизонтальные координаты  $\lambda, \beta$  (азимут и угол места) определяются в горизонтальной (измерительной) системе координат (СК).

Общий подход к получению измерений любого ОСТИ можно представить следующим образом:

$$\lambda = \lambda' - \Delta\lambda';$$

$$\beta = \arctan(\tan(\beta' - \Delta\beta') \cos \Delta\lambda'); \quad (1)$$

$$\Delta\lambda' = \arctan \frac{x}{f \cos \omega - y \sin \omega}; \quad (2)$$

$$\Delta\beta' = \arctan \frac{y}{f};$$

$$\lambda' = \alpha - \Delta\alpha + i \tan \omega + \frac{C}{\cos \omega}; \quad (3)$$

$$\beta' = \beta - \Delta\beta,$$

где  $\alpha, \omega$  – горизонтальные координаты (азимут и угол

Кукушкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, 4 ЦНИИ Министерства обороны РФ, тел. 515-19-82,

Гулый Николай Николаевич – научный сотрудник, 4 ЦНИИ Министерства обороны РФ, тел. +7(256)2-83-84.

Kukooschkin Sergej – Dr. Sci. Tech, the professor conducting the scientific employee, 4 CNIИ the Ministries of Defense, tel. 515-19-82,

Gooluy Nikolaj – scientific employee 4 Central Scientific Research Institute Ministry of Defence of Russia, tel. +7(256)2-83-84.

места) оптической оси теодолита;

$f$  – фокусное расстояние оптической системы теодолита;

$\Delta\alpha$  – место нуля датчика азимута;

$\Delta\beta$  – место нуля датчика угла места;

$C$  – коллимационная ошибка;

$i$  – неперпендикулярность осей вращения теодолита.

Значения мест нулей датчиков азимута и угла места, значение коллимационной ошибки рассчитываются по измерениям вех (ориентиров) или коллиматора

$$\Delta\alpha = \frac{(\alpha_{11} - \alpha_{\beta 1}) + \dots + (\alpha_{1n} - \alpha_{\beta n})}{2n} + \frac{(\alpha_{21} - \alpha_{\beta 1} \pm \pi) + \dots + (\alpha_{2n} - \alpha_{\beta n} \pm \pi)}{2n}; \quad (4)$$

$$\Delta\omega = \frac{(\omega_{11} + \omega_{12} + \dots + \omega_{1n})/n}{2} + \frac{(\omega_{21} + \omega_{22} + \dots + \omega_{2n})/n - \pi}{2}; \quad (5)$$

$$C = \pm \frac{(\alpha_{11} + \alpha_{12} + \dots + \alpha_{1n})/n}{2} - \frac{(\alpha_{21} + \alpha_{22} + \dots + \alpha_{2n})/n \pm \pi}{2}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{1n}; \omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1n}$  – горизонтальные координаты вех при круге лево;

$\alpha_{21}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{2n}; \omega_{21}, \omega_{22}, \dots, \omega_{2n}$  – горизонтальные координаты вех при круге право;

$\alpha_{\beta 1}, \alpha_{\beta 2}, \dots, \alpha_{\beta n}$  – эталонные значения азимутов на вехи.

Априорная оценка погрешностей измерений горизонтальных координат проводится с учетом частных производных от горизонтальных координат по исходным данным

$$\bar{L} = (\alpha, \omega, \Delta\alpha, \Delta\omega, C, i, f, x, y)^T. \quad (7)$$

Ковариационная матрица и оценки среднеквадратических погрешностей (СКП) горизонтальных координат равны

$$K_{\bar{G}} = \begin{pmatrix} K_{11}^G & K_{21}^G \\ K_{12}^G & K_{22}^G \end{pmatrix} = A^T \cdot K_L \cdot A; \quad (8)$$

$$S\lambda = \sqrt{K_{11}^G}; \quad S\beta = \sqrt{K_{22}^G}. \quad (9)$$

Здесь  $A$  – матрица частных производных горизонтальных координат по вектору исходных данных  $\bar{L}$

$$A^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial \lambda}{\partial \alpha} & \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} & \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta\alpha} & \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta\omega} & \frac{\partial \lambda}{\partial C} & \frac{\partial \lambda}{\partial i} & \frac{\partial \lambda}{\partial f} & \frac{\partial \lambda}{\partial x} & \frac{\partial \lambda}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} & \frac{\partial \beta}{\partial \omega} & \frac{\partial \beta}{\partial \Delta\alpha} & \frac{\partial \beta}{\partial \Delta\omega} & \frac{\partial \beta}{\partial C} & \frac{\partial \beta}{\partial i} & \frac{\partial \beta}{\partial f} & \frac{\partial \beta}{\partial x} & \frac{\partial \beta}{\partial y} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

А ковариационная матрица вектора исходных данных представляется в следующем виде:

$$K_L = \begin{pmatrix} S_{\alpha}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{\omega}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{\Delta\alpha}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{\Delta\omega}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_C^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_i^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_f^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_x^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_y^2 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где  $S_{\alpha}, S_{\omega}$  – априорные оценки погрешностей горизонтальных координат оптической оси теодолита;

$S_{\Delta\alpha}, S_{\Delta\omega}$  – априорные оценки погрешностей определения мест нуля датчиков азимута и угла места;

$S_C, S_i$  – априорные оценки погрешностей определения коллимационной ошибки и неперпендикулярности осей вращения;

$S_f$  – априорная оценка погрешности значения фокусного расстояния теодолита;

$S_x, S_y$  – априорные оценки погрешностей определения картинных координат изображения объекта испытаний на кадре.

Рассмотрим новый подход к получению высокоточных измерений по видеоинформации оптико-электронных средств (ОЭС) на основе основных принципов наземной фотограмметрии.

Для определения положения точек видеокадра будем использовать измерительную СК теодолита  $SX_H Y_H Z_H$  (рис.1) аналог пространственной фотограмметрической СК. Пространственные координаты точки видеокадра  $x_H, y_H, z_H$  можно найти по плоским координатам, заданным в картинной СК видеокадра  $O_K X_K Y_K$  видеокадра  $x, y$  для этого вводится вспомогательная СК теодолита  $SX_B Y_B Z_B$ . Начало этой СК находится в центре проекции  $S$ , оси  $SX_B$  и  $SY_B$  параллельны соответствующим осям плоской картинной СК, а ось  $SZ_B$  совпадает с оптической осью теодолита. Тогда координатами точки изображения объекта  $x_H, y_H, z_H$  в системе  $SX_B Y_B Z_B$  будут

$$x' = x - x_0; \quad y' = y - y_0; \quad z' = f. \quad (12)$$

Для перевода прямоугольных координат из одной трехмерной прямоугольной СК в другую СК, у которых точки начал отсчетов совпадают, применяется стандартная матричная формула. Применительно для нашего случая

$$\bar{r}_H = \begin{pmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \end{pmatrix} = A_{HB} \cdot \bar{r}_B = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{pmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ f \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Здесь  $A_{HB}$  матрица направляющих косинусов для

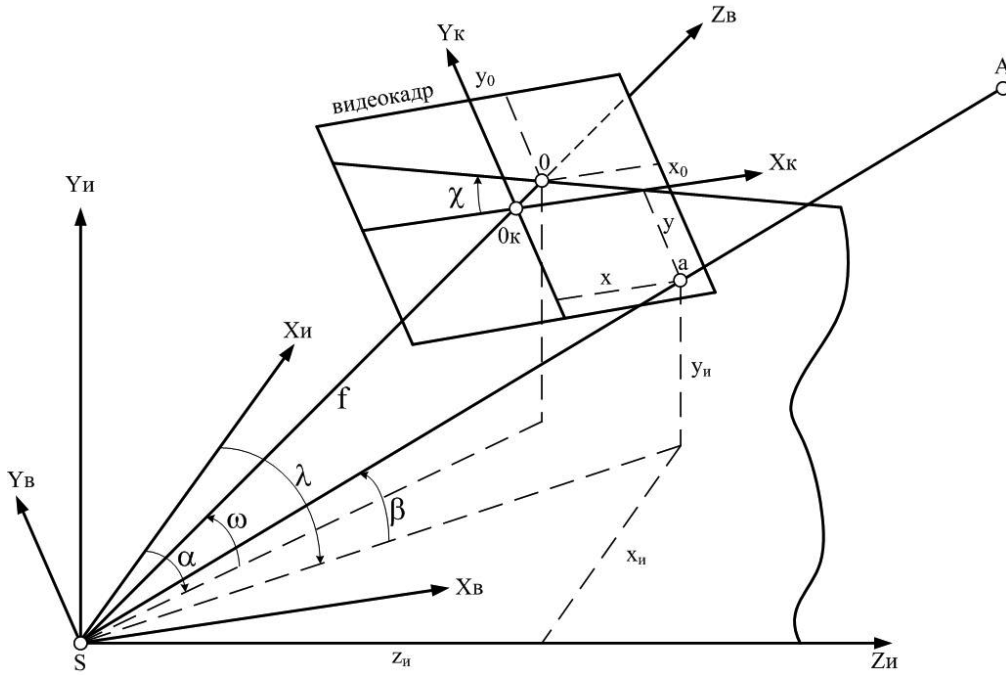


Рис. 1 Схема определения основных элементов ориентирования видеокадров

перевода от вспомогательной СК к измерительной СК, полученная путем последовательных поворотов на углы внешнего ориентирования видеокадра  $\chi, \omega, \alpha$ . Элементы этой матрицы равны

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= -\sin \alpha \cdot \cos \chi - \cos \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \chi; \\
 a_{12} &= \sin \alpha \cdot \sin \chi - \cos \alpha \cdot \sin \omega \cdot \cos \chi; \\
 a_{13} &= \cos \alpha \cdot \cos \omega; \\
 a_{21} &= \cos \omega \cdot \sin \chi; \\
 a_{22} &= \cos \omega \cdot \cos \chi; \\
 a_{23} &= \sin \omega; \\
 a_{31} &= \cos \alpha \cdot \cos \chi - \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \chi; \\
 a_{32} &= -\cos \alpha \cdot \sin \chi - \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \cos \chi; \\
 a_{33} &= \sin \alpha \cdot \cos \omega.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

В вышеприведенных формулах используются так называемые элементы ориентирования видеокадра.

Элементами ориентирования видеокадра определяют положение снимка в момент экспонирования. Они включают элементы внешнего ориентирования, определяющие положение связки лучей в момент экспонирования:

$\alpha$  – азимут направления оптической оси прибора;

$\omega$  – угол наклона (вертикальный угол) направления оптической оси прибора;

$\chi$  – угол поворота видеоснимка (перекос кадра).

Элементы внутреннего ориентирования определяют положение центра проекции относительно видеокадра. К ним относятся:

$f$  – фокусное расстояние объектива прибора;

$x_0, y_0$  – координаты главной точки снимка (пере-

сечения оптической оси прибора с плоскостью снимка).

Горизонтальные координаты объекта испытаний с точки  $S$  равны горизонтальным координатам изображения объекта испытаний на видеокадре и могут быть получены по координатам изображения объекта

$$\lambda = \arctg \left( \frac{z_{И}}{x_{И}} \right); \quad \beta = \arctg \left( \frac{y_{И}}{x_{И}^2 + z_{И}^2} \right). \tag{15}$$

В случае применения формул фотограмметрии априорную оценку погрешностей измерений горизонтальных координат осуществляют по формулам (8–9). В этих формулах используется матрица частных производных от горизонтальных координат по исходным данным, в качестве которых выступают элементы ориентирования видеокадра и картинные координаты изображения объекта испытаний

$$\bar{L} = (\alpha, \omega, \chi, f, x_0, y_0, x, y)^T. \tag{16}$$

А ковариационная матрица вектора исходных данных представляется диагональной матрицей, с квадратами априорных оценок погрешностей определения элементов ориентирования видеокадра  $S_\alpha, S_\omega, S_\chi, S_f, S_{x_0}, S_{y_0}$  и априорных оценок погрешностей определения картинных координат изображения объекта испытаний на кадре  $S_x, S_y$ .

Элементы ориентирования видеокадра можно определить с большой точностью по опорным точкам, экспонированным на снимке совместно с объектами испытаний. В результате погрешности горизонтальных координат объектов испытаний ОЭС становятся одного порядка с погрешностями картинных координат изображе-

ний объектов испытаний, пересчитанными в угловые величины.

Таким образом, проводя экспонирование объектов испытаний на фоне опорных точек (ориентиров или звезд) можно только по видеоинформации при отсутствии данных о реальных направлениях поля зрения ОЭС с малыми погрешностями определять угловые координаты объектов испытаний. Примеры получения видеоинформации на фоне опорных точек представлены на рис.2. Этот метод основан на расчете горизонтальных координат объектов испытаний, с использованием элементов ориентирования видеокадров ОЭС.

Расчет элементов ориентирования видеокадров проводится по опорным точкам, экспонированным на тех же видеокадрах, где фиксируются объекты испытаний.

Другой метод получения горизонтальных координат объектов испытаний основан на расчете угловых элементов ориентирования видеокадров с объектами испытаний с использованием угловых элементов ориентирования дополнительной (реперной) камеры и характеристики углов связи между направлениями основной и реперной камер ОЭС. Во время экспонирования объектов испытаний основной камерой реперная камера экспонирует опорные точки (рис.3). Для определения харак-

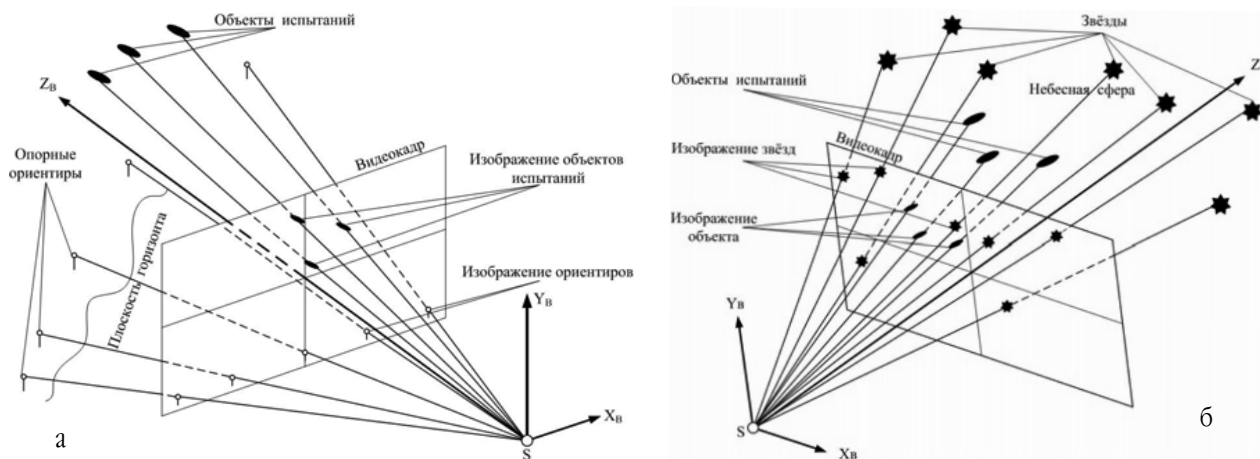


Рис.2. Схемы экспонирования ОЭС объектов испытаний на фоне опорных точек: а – ориентиров; б – звезд

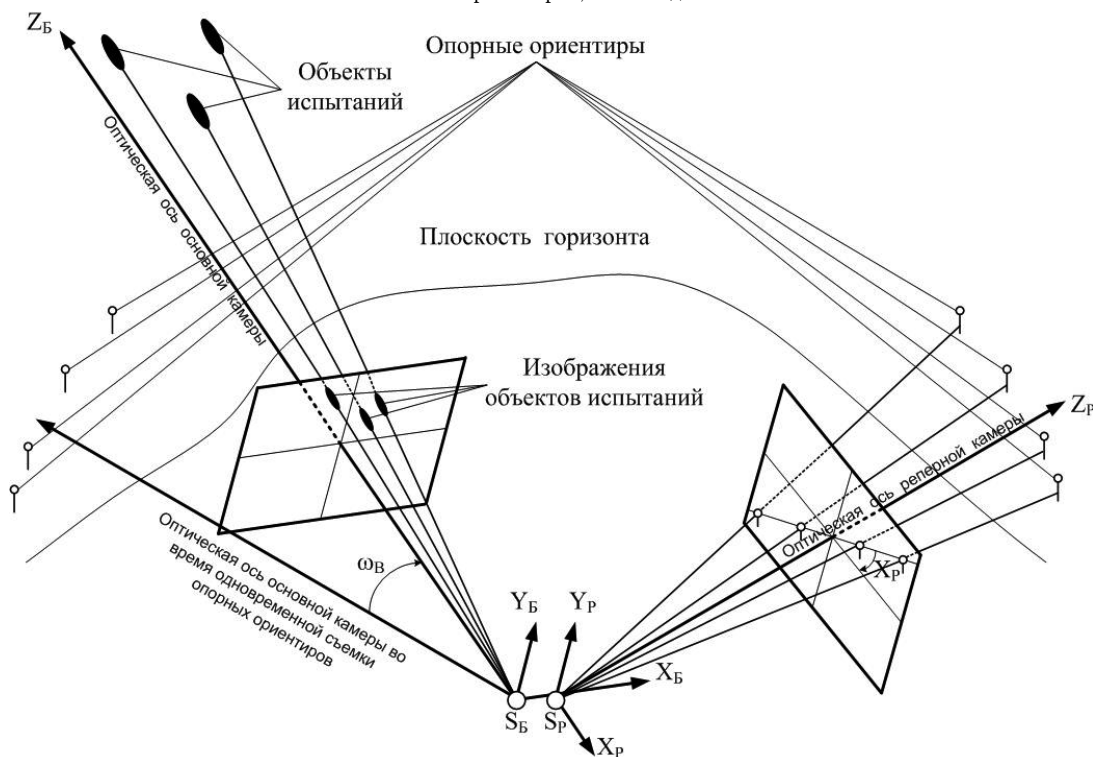


Рис.3. Схема экспонирования спаренным ОЭС объектов испытаний

теристик углов связи между направлениями основной и реперной камерами ОЭС используется одновременная съемка опорных точек обеими камерами (рис.4). Положения оптических осей камер во время одновременной съемки назовем начальными положениями. Для наглядности на рис.3 показано смещение направления оптической оси основной камеры от начального положения только по вертикальному углу.

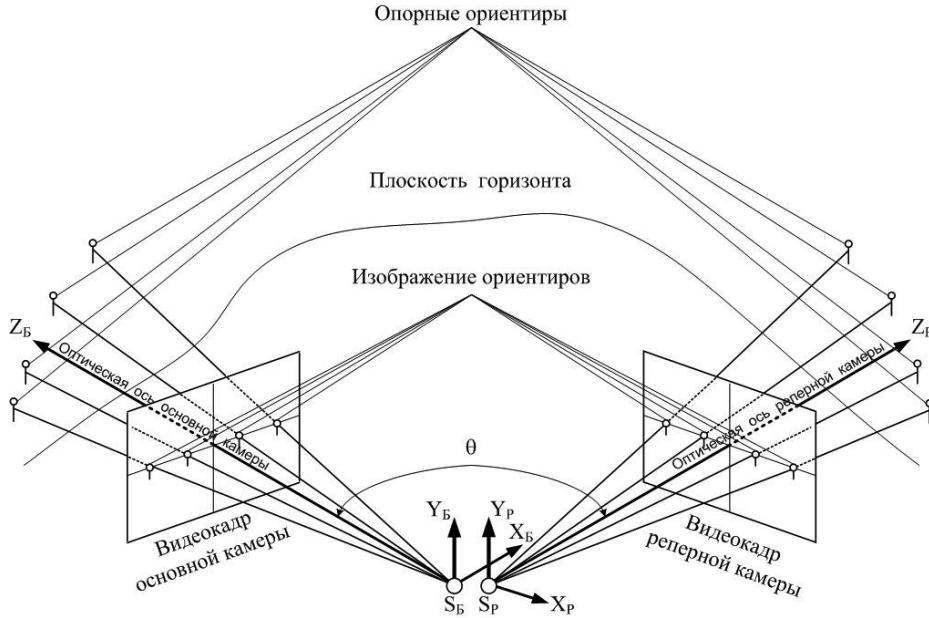


Рис.4. Схема экспонирования спаренного ОЭС при одновременной съемке опорных ориентиров

**Расчет ориентирования видеокадров оптико-электронных средств по опорным точкам**

Ориентирование видеокадров однозначно определяется их элементами ориентирования. Существуют общепринятые элементы ориентирования снимков оптических приборов: внешние и внутренние.

Систематические ошибки видеоснимка, связанные с дисторсией объектива прибора, можно представить поправками к картинным координатам. Поправки представляются в виде полинома расстояния  $r$  от точки изображения объекта на снимке до центра снимка. Коэффициенты дисторсии объектива  $K_1, K_2, K_3$  для удобства описания также можно отнести к элементам ориентирования.

Элементы ориентирования видеокадра представим следующим вектором:

$$\vec{H} = (h_i, i = 1, 2, \dots, k)^T = (\alpha, \omega, \chi, f, x_0, y_0, K_1, K_2, K_3)^T, \quad (17)$$

где  $\alpha, \omega, \chi$  – элементы внешнего ориентирования ( $\alpha$  – азимут;  $\omega$  – угол наклона направления оптической оси прибора,  $\chi$  – перекося кадра);

$f, x_0, y_0$  – элементы внутреннего ориентирования ( $f$  – фокусное расстояние объектива прибора,  $x_0, y_0$  – координаты главной точки снимка);

$K_1, K_2, K_3$  – коэффициенты дисторсии объектива.

Связь между точкой изображения объекта на видеокадре и направлением на реальный объект можно описать следующими формулами:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + x_1 (1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6); \\ y &= y_0 + y_1 (1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6); \\ r &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2}; \end{aligned} \quad (18)$$

$$x_1 = f \frac{a_{11}l + a_{21}m + a_{31}n}{a_{13}l + a_{23}m + a_{33}n}; \quad y_1 = f \frac{a_{12}l + a_{22}m + a_{32}n}{a_{13}l + a_{23}m + a_{33}n}; \quad (19)$$

$$l = \cos \lambda \cdot \cos \beta; \quad m = \sin \beta \quad n = \sin \lambda \cdot \cos \beta, \quad (20)$$

где  $x, y$  – картинные координаты объекта на видеокадре;  $\lambda, \beta$  – горизонтальные координаты (азимут и угол места) направления с точки стояния прибора на реальный объект;

$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$  – матрица направляющих косинусов для перевода из вспомогательной СК в горизонтальную СК, ее элементы рассчитываются по формулам (14).

Задача нахождения элементов внешнего и внутреннего ориентирования по опорным точкам называется обратной пространственной фотограмметрической засечкой. Если количество опорных точек избыточно, то эта задача решается способом наименьших квадратов.

В общем случае неизвестными параметрами являются элементы ориентирования видеокадра  $\vec{H}$ , а измеряемыми величинами плоские координаты изображений опорных точек на видеокадре

$$\vec{Q} = (q_j, j = 1, 2, \dots, m)^T = ((x_u^j, y_u^j), j = 1, 2, \dots, n)^T. \quad (21)$$

Соотношения между измеряемыми величинами и

неизвестными параметрами имеют вид

$$p_j(\overline{H}, \overline{Q}) = q_j - g_j(\overline{H}) = 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

или

$$P(\overline{H}, \overline{Q}) = 0. \quad (23)$$

Считая преобразования  $g_j(\overline{H})$  по формулам (18–20) дифференцируемыми функциями, а поправки к приближенным значениям элементов ориентирования небольшими, разложим эти функции в ряд Тейлора около приближенных значений элементов ориентирования

$$\overline{H}^0 = (\alpha^0, \omega^0, \chi^0, f^0, x_0^0, y_0^0, K_1^0, K_2^0, K_3^0)^T. \quad (24)$$

Значения элементов  $\chi^0, x_0^0, y_0^0, K_1^0, K_2^0, K_3^0$  берутся равными нулю, а значения элементов  $\alpha^0, \omega^0, f^0$  рассчитываются по результатам планирования сеанса измерений оптико-электронными приборами или по данным опорных ориентиров, попадающих в видеокادر прибора. Например, в качестве начальных значений азимута и угла места оптической оси прибора могут быть взяты средние значения азимутов и углов места эталонных направлений всех опорных ориентиров, которые попадают в кадр прибора

$$\alpha^0 = \frac{\sum_{j=1}^k \lambda_j}{k}; \quad \omega^0 = \frac{\sum_{j=1}^k \beta_j}{k}, \quad (25)$$

а в качестве начального значения фокусного расстояния – величина, рассчитанная по картинным координатам и азимутам эталонных направлений всех опорных ориентиров, которые попадают в кадр прибора

$$f^0 = \frac{\sum_{j=1}^{k-1} \sum_{i=j+1}^k \frac{|x_j - x_i|}{\tan |\lambda_j - \lambda_i|}}{\sum_{j=1}^{k-1} j}. \quad (26)$$

Горизонтальные координаты опорных точек рассчитываются: для опорных ориентиров – по результатам геодезической привязки опорных ориентиров оптико-электронного прибора; для звезд – по результатам расчета видимых горизонтальных координат звезд на момент экспонирования видеокадра и опознания изображений звезд на видеокadre с данными звездного каталога.

В результате разложения получается

$$p_j(\overline{H}, \overline{Q}) = p_j(\overline{H}^0, \overline{Q}) + \left( \frac{\partial p_j}{\partial h_1} \right)_{\overline{H}^0} (h_1 - h_{10}) + \dots + \left( \frac{\partial p_j}{\partial h_k} \right)_{\overline{H}^0} (h_k - h_{k0}) \dots \quad (27)$$

Вводя определение

$$\overline{\xi} = \overline{H} - \overline{H}^0 = \begin{pmatrix} h_1 - h_{10} \\ \vdots \\ h_k - h_{k0} \end{pmatrix}; \quad (28)$$

$$a_{jl} = \left( \frac{\partial p_j}{\partial h_l} \right)_{\overline{H}^0} = - \left( \frac{\partial g_j}{\partial h_l} \right)_{\overline{H}^0}; \quad (29)$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{nk} \end{pmatrix}. \quad (30)$$

$$c_j = p_j(\overline{H}^0, \overline{Y}) = y_j - g_j(\overline{H}^0); \quad \overline{C} = \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_m \end{pmatrix}. \quad (31)$$

Предполагая, что каждое измерение содержит погрешность  $\varepsilon_j$ , которая нормально распределена, измерения можно представить

$$y_j = q_j + \varepsilon_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (32)$$

или

$$\overline{Y} = \overline{Q} + \overline{E}. \quad (33)$$

Следовательно

$$p_j(\overline{H}^0, \overline{Q}) = p_j(\overline{H}^0, \overline{Y} - \overline{E}) = p_j(\overline{H}^0, \overline{Y}) - \overline{E}. \quad (34)$$

Тогда систему (27) можно представить в виде

$$\overline{P} = A\overline{\xi} + \overline{C} - \overline{E}. \quad (35)$$

Решение этого матричного уравнения, найденное методом наименьших квадратов для поправок, следующее:

$$\overline{\xi} = - (A^T W_{\overline{Y}} A)^{-1} A^T W_{\overline{Y}} \overline{C}, \quad (36)$$

где  $W_{\overline{Y}}$  – весовая матрица измерений, равная обратной диагональной ковариационной матрицы независимых измерений

$$W_{\overline{Y}} = \begin{pmatrix} w_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & w_m \end{pmatrix} = C_{\overline{Y}}^{-1} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_m^2 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_m^2} \end{pmatrix}. \quad (37)$$

Элементы матрицы частных производных (30) картинных координат по элементам ориентирования кадра рассчитываются по формулам

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha} = E_X D_1 + x_1 E_R D_2; \quad \frac{\partial y}{\partial \alpha} = E_Y D_1 + y_1 E_R D_2;$$

$$E_X = \frac{f}{D} (-a_{31} l + a_{11} n) + \frac{x_1}{D} (a_{33} l - a_{13} n);$$

$$E_Y = \frac{f}{D} (-a_{32} l + a_{12} n) + \frac{y_1}{D} (a_{33} l - a_{13} n);$$

$$E_R = \frac{x_1 E_X + y_1 E_Y}{r};$$

$$\frac{\partial x}{\partial \omega} = F_X D_1 + x_1 F_R D_2; \quad \frac{\partial y}{\partial \omega} = F_Y D_1 + y_1 F_R D_2;$$

$$F_X = \frac{x_1}{D} (a_{23} l \cos \alpha - m \cos \omega + a_{23} n \sin \alpha) - f \sin \chi;$$

$$F_Y = \frac{y_1}{D} (a_{23} l \cos \alpha - m \cos \omega + a_{23} n \sin \alpha) - f \cos \chi;$$

$$F_R = \frac{x_1 F_X + y_1 F_Y}{r};$$

$$\frac{\partial x}{\partial \chi} = y_1 D_1; \quad \frac{\partial x}{\partial x_0} = 1; \quad \frac{\partial x}{\partial y_0} = 0;$$

$$\frac{\partial y}{\partial \chi} = -x_1 D_1; \quad \frac{\partial y}{\partial x_0} = 0; \quad \frac{\partial y}{\partial y_0} = 1;$$

$$\frac{\partial x}{\partial f} = \frac{x_1}{f} D_1 + x_1 Q_R D_2;$$

$$\frac{\partial y}{\partial f} = \frac{y_1}{f} D_1 + y_1 Q_R D_2;$$

$$Q_R = \frac{x_1^2 + y_1^2}{f \cdot r}; \tag{38}$$

$$\frac{\partial x}{\partial K_1} = x_1 r^2; \quad \frac{\partial x}{\partial K_2} = x_1 r^4; \quad \frac{\partial x}{\partial K_3} = x_1 r^6;$$

$$\frac{\partial y}{\partial K_1} = y_1 r^2; \quad \frac{\partial y}{\partial K_2} = y_1 r^4; \quad \frac{\partial y}{\partial K_3} = y_1 r^6;$$

$$r = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2};$$

$$D = a_{13}l + a_{23}m + a_{33}n;$$

$$D_1 = 1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6;$$

$$D_2 = 2K_1 r + 4K_2 r^3 + 6K_3 r^5.$$

Рассчитав поправки по формуле (36), вычислим уточненные значения элементов ориентирования видеокадра

$$\overline{H^1} = \overline{H^0} + \overline{\xi}. \tag{39}$$

Теперь для получения еще лучших приближений элементов ориентирования видеокадра производится замена  $\overline{H^0}$  на  $\overline{H^1}$  и процедура уточнения повторяется. Этот процесс повторяется до тех пор, пока поправки  $\overline{\xi}$  не станут так малы, что уточнения, получающиеся в результате очередного шага, будут пренебрежимы.

Ковариационная матрица элементов ориентирования оценивается следующим образом:

$$W_{\overline{H}} = \begin{pmatrix} w_{11}^{\overline{H}} & w_{12}^{\overline{H}} & \dots & w_{1k}^{\overline{H}} \\ w_{21}^{\overline{H}} & w_{22}^{\overline{H}} & \dots & w_{2k}^{\overline{H}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{k1}^{\overline{H}} & w_{k2}^{\overline{H}} & \dots & w_{kk}^{\overline{H}} \end{pmatrix} = \tilde{\sigma}_0^2 \cdot (A^T W_{\overline{Y}} A)^{-1}, \tag{40}$$

где

$$\tilde{\sigma}_0^2 = \frac{\sum_{j=1}^m c_j^2 \cdot w_j}{m - k}. \tag{41}$$

Оценки СКО элементов ориентирования видеокадра равны

$$S\alpha = \sqrt{w_{11}^{\overline{H}}}; \quad Sf = \sqrt{w_{44}^{\overline{H}}}; \quad SK_1 = \sqrt{w_{77}^{\overline{H}}};$$

$$S\omega = \sqrt{w_{22}^{\overline{H}}}; \quad Sx_0 = \sqrt{w_{55}^{\overline{H}}}; \quad SK_2 = \sqrt{w_{88}^{\overline{H}}}; \tag{42}$$

$$S\chi = \sqrt{w_{33}^{\overline{H}}}; \quad Sy_0 = \sqrt{w_{66}^{\overline{H}}}; \quad SK_3 = \sqrt{w_{99}^{\overline{H}}}.$$

**Расчет характеристик углов связи между направлениями основной и реперной камерами спаренного ОЭС по результатам одновременной видеосъемки опорных точек**

Жесткость крепления основной и реперной камер на опорноповоротной платформе спаренного ОЭС позволяет гарантировать устойчивость углов связи между направлениями основной камеры и реперной камеры. Направление камеры определяется только элементами внешнего ориентирования кадра (угловыми элементами ориентирования камеры): азимутом и углом места направления оптической оси камеры и перекосом кадра камеры. По результатам одновременной видеосъемки опорных точек основной и реперной камерами можно определить элементы ориентирования видеокadres обеих камер, в том числе и угловых элементов ориентирования каждой из камер в виде оценок трех углов, их СКО и ковариационных матриц угловых элементов ориентирования камер:

- для основной камеры

$$\overline{E_B} = (\alpha_B, \omega_B, \chi_B)^T; \tag{43}$$

$$K_{\overline{E_B}} = \begin{pmatrix} K_{11}^B & K_{12}^B & K_{13}^B \\ K_{21}^B & K_{22}^B & K_{23}^B \\ K_{31}^B & K_{32}^B & K_{33}^B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{\alpha_B}^2 & K_{12}^B & K_{13}^B \\ K_{21}^B & S_{\omega_B}^2 & K_{23}^B \\ K_{31}^B & K_{32}^B & S_{\chi_B}^2 \end{pmatrix};$$

- для реперной камеры

$$\overline{E_P} = (\alpha_P, \omega_P, \chi_P)^T; \tag{44}$$

$$K_{\overline{E_P}} = \begin{pmatrix} K_{11}^P & K_{12}^P & K_{13}^P \\ K_{21}^P & K_{22}^P & K_{23}^P \\ K_{31}^P & K_{32}^P & K_{33}^P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{\alpha_P}^2 & K_{12}^P & K_{13}^P \\ K_{21}^P & S_{\omega_P}^2 & K_{23}^P \\ K_{31}^P & K_{32}^P & S_{\chi_P}^2 \end{pmatrix}.$$

Связь между направлениями основной и реперной камерами можно однозначно определить тремя стандартными углами Эйлера. В расчетах удобнее пользоваться направляющими косинусами, характеризующими переход между вспомогательными системами координат, характеризующими направления основной и реперной камер. Назовем матрицу этих направляющих косинусов матрицей характеристик углов связи между основной и реперной камерами. Таким образом, неизвестными параметрами являются элементы матрицы характеристик углов связи, которые можно представить вектором

$$B_{BP} = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{31}, b_{32}, b_{33})^T, \tag{45}$$

а исходными величинами – угловые элементы ориентирования обеих камер, также представленные одним вектором

$$\overline{E_{BP}} = (\alpha_B, \omega_B, \chi_B, \alpha_P, \omega_P, \chi_P)^T. \tag{46}$$

Ковариационную матрицу этого вектора можно представить в следующем виде:

$$K_{E_{BP}} = \begin{pmatrix} S_{\alpha_B}^2 & K_{12}^B & K_{13}^B & 0 & 0 & 0 \\ K_{21}^B & S_{\omega_B}^2 & K_{23}^B & 0 & 0 & 0 \\ K_{31}^B & K_{32}^B & S_{\chi_B}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{\alpha_P}^2 & K_{12}^P & K_{13}^P \\ 0 & 0 & 0 & K_{21}^P & S_{\omega_P}^2 & K_{23}^P \\ 0 & 0 & 0 & K_{31}^P & K_{32}^P & S_{\chi_P}^2 \end{pmatrix}. \quad (47)$$

Матрица характеристик углов связи рассчитывается следующим образом:

$$B_{BP} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} = A_{BM}^B \cdot A_{MB}^P = \\ = (A_{MB}^B)^T \cdot A_{MB}^P, \quad (48)$$

где  $A_{MB}^B$  – матрица направляющих косинусов перехода из вспомогательной СК основной камеры в горизонтальную СК основной камеры;

$A_{MB}^P$  – матрица направляющих косинусов перехода из вспомогательной СК реперной камеры в горизонтальную СК реперной камеры.

Элементы матрицы направляющих косинусов для перехода из вспомогательной СК камеры в горизонтальную рассчитываются по угловым элементам ориентирования камеры по формулам (14).

Для оценки точности определения вектора элементов матрицы характеристик углов связи  $B_{BP}$  используется формула расчета его ковариационной матрицы

$$K_{B_{BP}} = \begin{pmatrix} K_{11}^{BP} & K_{12}^{BP} & \dots & K_{19}^{BP} \\ K_{21}^{BP} & K_{22}^{BP} & \dots & K_{29}^{BP} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{91}^{BP} & K_{92}^{BP} & \dots & K_{99}^{BP} \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} S_{b_{11}}^2 & K_{12}^{BP} & \dots & K_{19}^{BP} \\ K_{21}^{BP} & S_{b_{12}}^2 & \dots & K_{29}^{BP} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{91}^{BP} & K_{92}^{BP} & \dots & S_{b_{33}}^2 \end{pmatrix} = A^T \cdot K_{E_{BP}} \cdot A, \quad (49)$$

где матрица частных производных вектора  $B_{BP}$  по вектору исходных данных  $E_{BP}$  рассчитывается аналитическим или численным методом

$$A = \left( \frac{\partial B_{BP}}{\partial E_{BP}} \right) = \begin{pmatrix} \frac{\partial b_{11}}{\partial \alpha_B} & \frac{\partial b_{12}}{\partial \alpha_B} & \frac{\partial b_{13}}{\partial \alpha_B} & \frac{\partial b_{21}}{\partial \alpha_B} & \frac{\partial b_{22}}{\partial \alpha_B} & \frac{\partial b_{23}}{\partial \alpha_B} & \frac{\partial b_{31}}{\partial \alpha_B} & \frac{\partial b_{32}}{\partial \alpha_B} & \frac{\partial b_{33}}{\partial \alpha_B} \\ \frac{\partial b_{11}}{\partial \omega_B} & \frac{\partial b_{12}}{\partial \omega_B} & \frac{\partial b_{13}}{\partial \omega_B} & \frac{\partial b_{21}}{\partial \omega_B} & \frac{\partial b_{22}}{\partial \omega_B} & \frac{\partial b_{23}}{\partial \omega_B} & \frac{\partial b_{31}}{\partial \omega_B} & \frac{\partial b_{32}}{\partial \omega_B} & \frac{\partial b_{33}}{\partial \omega_B} \\ \frac{\partial b_{11}}{\partial \chi_B} & \frac{\partial b_{12}}{\partial \chi_B} & \frac{\partial b_{13}}{\partial \chi_B} & \frac{\partial b_{21}}{\partial \chi_B} & \frac{\partial b_{22}}{\partial \chi_B} & \frac{\partial b_{23}}{\partial \chi_B} & \frac{\partial b_{31}}{\partial \chi_B} & \frac{\partial b_{32}}{\partial \chi_B} & \frac{\partial b_{33}}{\partial \chi_B} \\ \frac{\partial b_{11}}{\partial \alpha_P} & \frac{\partial b_{12}}{\partial \alpha_P} & \frac{\partial b_{13}}{\partial \alpha_P} & \frac{\partial b_{21}}{\partial \alpha_P} & \frac{\partial b_{22}}{\partial \alpha_P} & \frac{\partial b_{23}}{\partial \alpha_P} & \frac{\partial b_{31}}{\partial \alpha_P} & \frac{\partial b_{32}}{\partial \alpha_P} & \frac{\partial b_{33}}{\partial \alpha_P} \\ \frac{\partial b_{11}}{\partial \omega_P} & \frac{\partial b_{12}}{\partial \omega_P} & \frac{\partial b_{13}}{\partial \omega_P} & \frac{\partial b_{21}}{\partial \omega_P} & \frac{\partial b_{22}}{\partial \omega_P} & \frac{\partial b_{23}}{\partial \omega_P} & \frac{\partial b_{31}}{\partial \omega_P} & \frac{\partial b_{32}}{\partial \omega_P} & \frac{\partial b_{33}}{\partial \omega_P} \\ \frac{\partial b_{11}}{\partial \chi_P} & \frac{\partial b_{12}}{\partial \chi_P} & \frac{\partial b_{13}}{\partial \chi_P} & \frac{\partial b_{21}}{\partial \chi_P} & \frac{\partial b_{22}}{\partial \chi_P} & \frac{\partial b_{23}}{\partial \chi_P} & \frac{\partial b_{31}}{\partial \chi_P} & \frac{\partial b_{32}}{\partial \chi_P} & \frac{\partial b_{33}}{\partial \chi_P} \end{pmatrix}. \quad (50)$$

### Определение внешних элементов ориентирования основной камеры по данным ориентирования реперной камеры

По результатам обработки измерений одновременной съемки опорных точек была определена матрица характеристик углов связи между основной и реперной камерами ОЭС  $B_{BP}$  и ковариационная матрица погрешностей вектора элементов этой матрицы  $K_{B_{BP}}$ .

Во время проведения сеанса измерений основная камера ОЭС регистрирует объекты испытаний. Одновременно с ней реперная камера регистрирует опорные точки. Назовем направления камер во время проведения испытаний текущими направлениями. По результатам обработки измерений опорных точек реперной камеры определяются элементы текущего ориентирования кадров реперной камеры. Из них можно выделить только угловые элементы текущего ориентирования реперной камеры в виде оценок трех углов и ковариационной матрицы ошибок их определения:

$$E_P^m = (\alpha_P^m, \omega_P^m, \chi_P^m)^T; \quad (51)$$

$$K_{E_P^m} = \begin{pmatrix} K_{11}^{Pm} & K_{12}^{Pm} & K_{13}^{Pm} \\ K_{21}^{Pm} & K_{22}^{Pm} & K_{23}^{Pm} \\ K_{31}^{Pm} & K_{32}^{Pm} & K_{33}^{Pm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{\alpha_P^m}^2 & K_{12}^{Pm} & K_{13}^{Pm} \\ K_{21}^{Pm} & S_{\omega_P^m}^2 & K_{23}^{Pm} \\ K_{31}^{Pm} & K_{32}^{Pm} & S_{\chi_P^m}^2 \end{pmatrix}.$$

Имея ранее рассчитанную матрицу характеристик углов связи между основной и реперной камерами ОЭС  $B_{BP}$  и зная данные текущего внешнего ориентирования реперной камеры, можно рассчитать текущие элементы внешнего ориентирования основной камеры

$$E_B^m = (\alpha_B^m, \omega_B^m, \chi_B^m)^T; \quad (52)$$

$$\alpha_B^m = \arctan \left( \frac{d_{33}}{d_{31}} \right); \quad \omega_B^m = \arcsin(d_{32}); \quad (53)$$

$$\chi_B^m = \arctan \left( \frac{d_{12}}{d_{22}} \right);$$

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix} = (A_{MB}^{Bm})^T = \\ = B_{BP} \cdot (A_{MB}^{Pm})^{-1}, \quad (54)$$

где  $A_{MB}^{Pm}$  – матрица направляющих косинусов перехода из вспомогательной СК реперной камеры в текущий момент времени в горизонтальную СК реперной камеры.

Считая неизвестными параметрами текущие угловые элементы ориентирования основной камеры  $E_B^m$ , а исходными величинами – элементы матрицы характеристик углов связи между основной и реперной камерами ОЭС и текущие угловые элементы ориентирования репер-



ной камеры, представленные одним вектором  $\overline{E}_m = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{31}, b_{32}, b_{33}, \alpha_p^m, \omega_p^m, \chi_p^m)^T$ , (55)

можно оценить точность определения угловых элементов внешнего ориентирования основной камеры. Для этого рассчитывается следующая ковариационная матрица:

$$K_{\overline{E}_m} = \begin{pmatrix} K^{Bm}_{11} & K^{Bm}_{12} & K^{Bm}_{13} \\ K^{Bm}_{21} & K^{Bm}_{22} & K^{Bm}_{23} \\ K^{Bm}_{31} & K^{Bm}_{32} & K^{Bm}_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{\alpha_B^m}^2 & K^{Bm}_{12} & K^{Bm}_{13} \\ K^{Bm}_{21} & S_{\omega_B^m}^2 & K^{Bm}_{23} \\ K^{Bm}_{31} & K^{Bm}_{32} & S_{\chi_B^m}^2 \end{pmatrix} = A^T \cdot K_{\overline{E}_m} \cdot A. \quad (56)$$

Здесь матрица частных производных вектора  $\overline{E}_m$  по вектору исходных данных  $\overline{E}_m$  рассчитывается аналитическим или численным методом

$$A^T = \left( \frac{\partial \overline{E}_m}{\partial \overline{E}_m} \right)^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial \alpha_B^m}{\partial b_{11}} & \frac{\partial \alpha_B^m}{\partial b_{12}} & \dots & \frac{\partial \alpha_B^m}{\partial b_{33}} & \frac{\partial \alpha_B^m}{\partial \alpha_p^m} & \frac{\partial \alpha_B^m}{\partial \omega_p^m} & \frac{\partial \alpha_B^m}{\partial \chi_p^m} \\ \frac{\partial \omega_B^m}{\partial b_{11}} & \frac{\partial \omega_B^m}{\partial b_{12}} & \dots & \frac{\partial \omega_B^m}{\partial b_{33}} & \frac{\partial \omega_B^m}{\partial \alpha_p^m} & \frac{\partial \omega_B^m}{\partial \omega_p^m} & \frac{\partial \omega_B^m}{\partial \chi_p^m} \\ \frac{\partial \chi_B^m}{\partial b_{11}} & \frac{\partial \chi_B^m}{\partial b_{12}} & \dots & \frac{\partial \chi_B^m}{\partial b_{33}} & \frac{\partial \chi_B^m}{\partial \alpha_p^m} & \frac{\partial \chi_B^m}{\partial \omega_p^m} & \frac{\partial \chi_B^m}{\partial \chi_p^m} \end{pmatrix}. \quad (57)$$

А ковариационная матрица вектора исходных величин представляется в следующем виде:

$$K_{\overline{E}_m} = \begin{pmatrix} S_{b_{11}}^2 & K^{BP}_{12} & \dots & K^{BP}_{19} & 0 & 0 & 0 \\ K^{BP}_{21} & S_{b_{12}}^2 & \dots & K^{BP}_{29} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K^{BP}_{91} & K^{BP}_{92} & \dots & S_{b_{33}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & S_{\alpha_p^m}^2 & K^{Pm}_{12} & K^{Pm}_{13} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & K^{Pm}_{21} & S_{\omega_p^m}^2 & K^{Pm}_{23} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & K^{Pm}_{31} & K^{Pm}_{32} & S_{\chi_p^m}^2 \end{pmatrix} \quad (58)$$

**Расчет оценок измерений горизонтальных координат объектов испытаний и их погрешностей с учетом элементов ориентирования камеры**

Измеряемыми параметрами у ОЭС, как и у любого другого оптического траекторного средства, является горизонтальные координаты

$$\overline{G} = (\lambda, \beta)^T, \quad (59)$$

где  $\lambda, \beta$  – азимут и угол места с точки стояния ОЭС на объект испытаний.

Они вычисляются по картинным координатам изображения объекта испытаний на видеокадре  $\overline{Q} = (x, y)^T$  с учетом всех элементов ориентирования видеокадра  $\overline{H}$ .

Переход от картинных координат к горизонтальным координатам осуществить аналитическим способом невозможно, поэтому этот переход производится итерациями методом наименьших квадратов. Преобразования (18–20) можно представить следующим образом:

$$\overline{Q} = F(\overline{G}). \quad (60)$$

Тогда поправки к горизонтальным координатам равны

$$\overline{\Delta G} = (A^T A)^{-1} A^T (\overline{Q} - F(\overline{G}_0)), \quad (61)$$

а уточненные горизонтальные координаты равны

$$\overline{G} = \overline{G}_0 + \overline{\Delta G}. \quad (62)$$

В формуле (61) матрица  $A$  является матрицей частных производных вектора  $\overline{Q}$  по вектору  $\overline{G}$

$$A = \left( \frac{\partial \overline{Q}}{\partial \overline{G}} \right) = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \lambda} & \frac{\partial y}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial x}{\partial \beta} & \frac{\partial y}{\partial \beta} \end{pmatrix}. \quad (63)$$

Вычисления по формулам (61–62) проводятся до тех пор, пока горизонтальные координаты не будут вычислены с необходимой точностью.

Начальные значения горизонтальных координат рассчитываются по упрощенным формулам, не учитывающим коэффициенты дисторсии

$$\lambda_0 = \arctg\left(\frac{z_H}{x_H}\right); \quad \beta_0 = \arctg\left(\frac{y_H}{x_H^2 + z_H^2}\right), \quad (64)$$

где  $x_H, y_H, z_H$  – пространственные координаты изображения объекта в горизонтальной СК прибора.

Они определяются по формулам

$$\begin{aligned} x_H &= a_{11}(x - x_0) + a_{12}(y - y_0) + a_{13}f; \\ y_H &= a_{21}(x - x_0) + a_{22}(y - y_0) + a_{23}f; \\ z_H &= a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) + a_{33}f, \end{aligned} \quad (65)$$

где элементы матрицы направляющих косинусов перехода из вспомогательной СК в горизонтальную СК прибора рассчитываются по формулам (14).

Априорная оценка погрешностей измерений горизонтальных координат объектов испытаний производится с учетом следующего вектора исходных данных:

$$\overline{L} = (\alpha, \omega, \chi, f, x_0, y_0, K_1, K_2, K_3, x, y)^T. \quad (66)$$

Ковариационная матрица и оценки СКО горизонтальных координат равны

$$K_{\overline{G}} = \begin{pmatrix} K^G_{11} & K^G_{21} \\ K^G_{12} & K^G_{22} \end{pmatrix} = A^T \cdot K_L \cdot A; \quad (67)$$

$$S\lambda = \sqrt{K^G_{11}}; \quad S\beta = \sqrt{K^G_{22}}, \quad (68)$$

где  $A$  – матрица частных производных горизонтальных координат по вектору исходных данных  $\overline{L}$

$$A^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial \lambda}{\partial \alpha} & \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} & \frac{\partial \lambda}{\partial \chi} & \frac{\partial \lambda}{\partial f} & \frac{\partial \lambda}{\partial x_0} & \frac{\partial \lambda}{\partial y_0} & \frac{\partial \lambda}{\partial K_1} & \frac{\partial \lambda}{\partial K_2} & \frac{\partial \lambda}{\partial K_3} & \frac{\partial \lambda}{\partial x} & \frac{\partial \lambda}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} & \frac{\partial \beta}{\partial \omega} & \frac{\partial \beta}{\partial \chi} & \frac{\partial \beta}{\partial f} & \frac{\partial \beta}{\partial x_0} & \frac{\partial \beta}{\partial y_0} & \frac{\partial \beta}{\partial K_1} & \frac{\partial \beta}{\partial K_2} & \frac{\partial \beta}{\partial K_3} & \frac{\partial \beta}{\partial x} & \frac{\partial \beta}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (69)$$

А ковариационная матрица вектора исходных данных представляется в следующем виде:

$$K_L = \begin{pmatrix} w_{11}^{\bar{H}} & w_{12}^{\bar{H}} & \dots & w_{1k}^{\bar{H}} & 0 & 0 \\ w_{21}^{\bar{H}} & w_{22}^{\bar{H}} & \dots & w_{2k}^{\bar{H}} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{k1}^{\bar{H}} & w_{k2}^{\bar{H}} & \dots & w_{kk}^{\bar{H}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & S_x^2 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & S_y^2 \end{pmatrix}, \quad (70)$$

где  $w_{ij}^{\bar{H}}$  – элементы ковариационной матрицы элементов ориентирования видеокадра  $W_{\bar{H}}$ , рассчитываемой по формуле (40);

$S_x, S_y$  – априорные оценки погрешностей картинных координат изображения объекта испытаний на видеокадре.

**Особенности расчета оценок измерений горизонтальных координат объектов испытаний и их погрешностей для спаренного ОЭС**

У спаренного ОЭС в поле зрения видеокадров основной камеры во время экспонирования объектов испытаний не попадают опорные точки. Поэтому для вычисления горизонтальных координат объектов испытаний используется вектор элементов ориентирования видеокадра  $\bar{H}$ , формируемый по результатам расчетов:

- элементов внешнего ориентирования основной

камеры по данным ориентирования реперной камеры с учетом характеристик углов связи между направлениями основной и реперной камерами;

- элементов внутреннего ориентирования основной камеры по измерениям опорных ориентиров во время одновременной видеосъемки опорных точек основной и реперной камерами.

Во время оценки погрешностей измерений горизонтальных координат объектов испытаний по формулам (67) используется следующая ковариационная матрица элементов ориентирования видеокадра (71), где  $K^{Bm}_{ij}$  – элементы ковариационной матрицы элементов внешнего ориентирования основной камеры по данным ориентирования реперной камеры с учетом характеристик углов связи между направлениями основной и реперной камерами  $K_{E_B^m}$ , рассчитываемой по формуле (56);

$K^B_{ij}$  – элементы ковариационной матрицы элементов внутреннего ориентирования видеокадра основной камеры по измерениям опорных ориентиров во время одновременной видеосъемки опорных точек основной и реперной камерами, рассчитываемой по формуле (40);

$S_x, S_y$  – априорные оценки погрешностей картинных координат изображения объекта испытаний на видеокадре.

$$K_L = \begin{pmatrix} S_{\alpha_B^m}^2 & K^{Bm}_{12} & K^{Bm}_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K^{Bm}_{21} & S_{\omega_B^m}^2 & K^{Bm}_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K^{Bm}_{31} & K^{Bm}_{32} & S_{\chi_B^m}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{f_B}^2 & K^B_{45} & K^B_{46} & K^B_{47} & K^B_{48} & K^B_{49} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K^B_{54} & S_{x_{0B}}^2 & K^B_{56} & K^B_{57} & K^B_{58} & K^B_{59} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K^B_{64} & K^B_{65} & S_{y_{0B}}^2 & K^B_{67} & K^B_{68} & K^B_{69} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K^B_{74} & K^B_{75} & K^B_{76} & S_{K_{1B}}^2 & K^B_{78} & K^B_{79} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K^B_{84} & K^B_{85} & K^B_{86} & K^B_{87} & S_{K_{2B}}^2 & K^B_{89} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K^B_{94} & K^B_{95} & K^B_{96} & K^B_{97} & K^B_{98} & S_{K_{3B}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_x^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_y^2 \end{pmatrix}, \quad (71)$$

*Литература*

1. Дубовик А.С. Фотографическая регистрация быстротекающих процессов. М.: Наука, 1973.
2. Новицкий П.В., Зофград И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Лобанов А.Н. Фототопография. Наземная стереофотограмметрическая съемка. М.: Недра, 1983, 224с.
4. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Сов. радио, 1978.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М., Наука, 1984, 832с.
6. Машимов М.М. Теоретическая геодезия. – М.: Недра, 1991.
7. Иванюченко А.С., Козлов Н.Н., Соколюк В.Л. Математическое обеспечение испытаний летательных аппаратов. М.: Технологии информационных систем, 2003, 324с.
8. Кукушкин С.С., Гладков И.А., Чаплинский В.С. Методы и информационные технологии контроля состояния динамических систем. М.: МО РФ, 2008, 328с.

Материал поступил в редакцию 26. 11. 2011 г.