

УДК 528.7+681.7.08

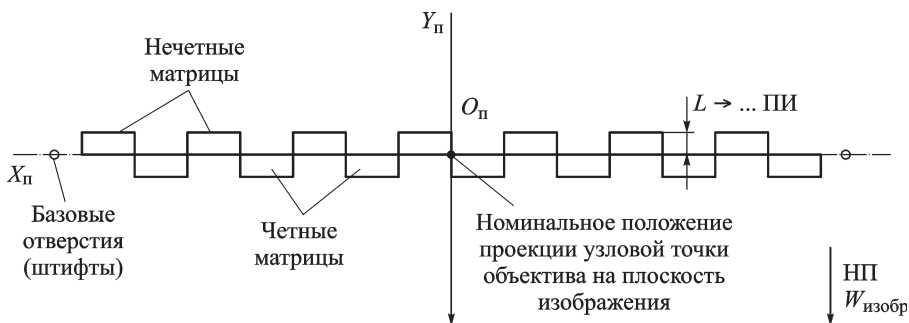
С. А. Архипов, Г. В. Гасич,  
В. И. Заварзин, С. А. Морозов  
**ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

*Предложено описание фотограмметрических параметров съемочной оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Показана их связь с традиционными фотограмметрическими параметрами, а также рассмотрены методы их контроля.*

С каждым годом дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) становится все более актуальным. В данных ДЗЗ нуждаются административные, военные и силовые структуры, различные экономические организации. Интересы потребителей разнообразны, в связи с чем существует много методов и аппаратуры ДЗЗ.

Основные задачи, решаемые с помощью такой аппаратуры, — это фотограмметрические задачи, т.е. определение размеров, формы и координат объектов по их снимкам [1]. Для аппаратуры ДЗЗ, в которой приемником излучения (ПИ) является фотопленка, методы решения фотограмметрических задач хорошо известны [2]. Однако в последнее десятилетие не только за рубежом, но и в России, практически завершился переход от использования фотопленки к ПИ, выполненных на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). В связи с этим съемочную аппаратуру почти перестали называть фотографической, а используют термин “оптико-электронная аппаратура”. Фотограмметрические задачи при этом не имеют стандартного решения.

**Измерительные особенности снимков, получаемых оптико-электронной аппаратурой ДЗЗ.** По сравнению со снимками, полученными традиционным пленочным кадровым аппаратом, снимки оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) ДЗЗ характеризуются следующими особенностями: изображение имеет дискретную структуру; условный кадр формируется за длительный интервал времени (от 2 до 300 с и более), когда параметры движения и ориентации космического аппарата (элементы внешнего ориентирования) меняются случайным образом; для обеспечения требуемого углового поля (захвата) в ПИ устанавливаются несколько ПЗС, причем топология ПИ имеет в большинстве случаев шахматную структуру (рис. 1); температура ПИ в процессе эксплуатации может изменяться из-за внешних и внутренних теплопритоков, что приводит к изменению линейных и угловых расстояний между элементами строки.



**Рис. 1. Структура приемника изображения ОЭА ДЗЗ**

Эти особенности делают актуальным вопрос о возможности применения традиционных методов фотограмметрии к снимкам, полученным с помощью ОЭА. Для этого необходимо разработать методы фотограмметрической обработки таких снимков и установить их связь с традиционными методами, хорошо известными специалистам.

**Фотограмметрические параметры ОЭА ДЗЗ и их связь с классическими фотограмметрическими параметрами.** В ОЭА условный кадр формируется как последовательность строк, полученных при разных значениях элементов внешнего ориентирования. Поэтому наиболее простым и исчерпывающим описанием сопряжения точек предмета съемки и его изображения является описание связи визирных лучей в пространстве предметов с номерами тех элементов приемника, которые регистрируют изображение.

Важной особенностью приемника излучения является его жесткая структура. Взаимное положение любой пары элементов дискретизации устанавливается при сборке приемника с погрешностью менее 0,003 мм. При термостабилизации ПИ или учете температурных поправок на изменение линейных размеров приемник можно рассматривать как эталонную линейку, на которой каждому светочувствительному элементу с номером  $j$  соответствует линейное расстояние ( $l_j \pm 0,003$ ) до элемента с номером  $j_0$ . Установив ПИ в ОЭА (рис. 2), можно измерить фактическое угловое положение ( $\mu_j, \nu_j$ ) каждого элемента дискретизации относительно принятого за начало координат элемента дискретизации  $j_0$ , т.е. аттестовать угловую связку визирных лучей, формирующих каждую строку изображения, в приборной системе координат (СК). Очевидно, что при этом необходимо поставить в соответствие каждому элементу  $j$  ПИ некоторые линейные координаты ( $l_{jx}, l_{jy}$ ) в этой СК.

Фотограмметрические параметры (ФГП) ОЭА ДЗЗ следующие:  $\mu_j, \nu_j$  — массив углов, определяющих угловую связку визирных лучей в пространстве предметов;  $j, l_{jx}, l_{jy}$  — массив номеров соответствующих элементов ПИ и линейных координат этих элементов в приборной системе координат (ПСК) ( $OXYZ$ )<sub>п</sub>.

Совокупность ФГП ОЭА напрямую связывает каждый элемент в изображении с направлением визирования и позволяет решать прямую фотограмметрическую задачу, т.е. определять координаты точек местности по их изображениям. К тому же по этим ФГП могут быть рассчитаны традиционные параметры внутреннего ориентирования: фотограмметрическое фокусное расстояние, фотограмметрическая дисторсия, положение проекции задней узловой точки объектива на плоскость изображения.

Классические ФГП рассчитывают на основе измеренных ФГП ОЭА по следующим критериям.

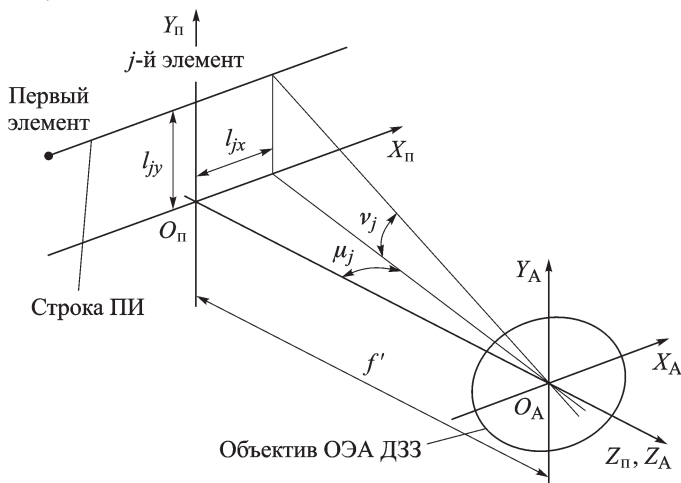
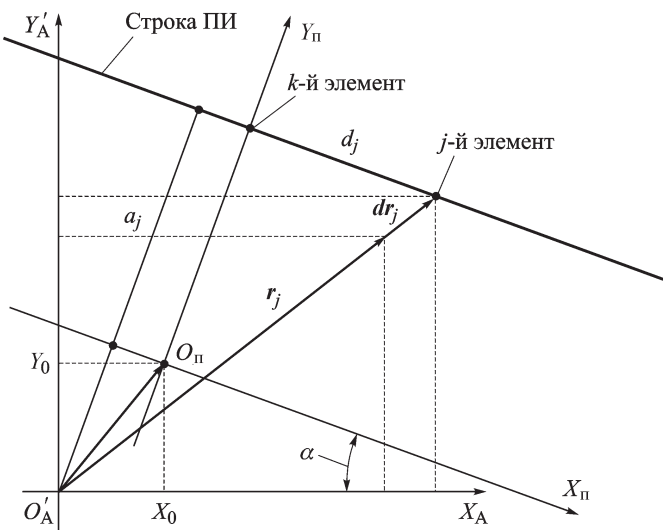


Рис. 2. Системы координат ОЭА и ПИ



**Рис. 3. СК ПИ в фокальной плоскости ОЭА**

1. По минимуму дисторсии в  $n$  рассматриваемых точках углового поля ОЭА, т.е. по минимальному значению  $\sum_{i=1}^n (|p_j dr_j|^2)_i$  (здесь  $p_j$  — весовой коэффициент точки, в которой расположен  $j$ -й элемент приемника;  $dr_j \approx A(r_j)^3$  (рис. 3);  $n$  — число точек в массиве углов, элементов и их координат;  $i$  — порядковый номер точки в этом массиве;  $r_j$  — вектор, задающий точку пересечения луча с угловыми координатами  $\mu_j, \nu_j$  предметов в пространстве с фокальной плоскостью, который проходит через центр проекции, определяемый по критерию минимума дисторсии по полю изображения ОЭА, расположенный на оптической оси  $O_A Z_A$  (см. рис. 2) и не совпадает с точкой  $O_A$ ).

2. По минимальному значению  $\sum_{i=1}^n (|p_j \Delta_j|^2)_i$ , что характеризует разницу между значениями дисторсии и функции, аппроксимирующей ее в рассматриваемых точках; здесь  $\Delta_j = dr_j - A(r_j)^3$ .

3. По минимуму дисторсии в рассматриваемых точках углового поля ОЭА при последовательном определении каждого из ФГП.

Расчет опирается на следующую фотограмметрическую модель.

1. СК ОЭА  $(OXYZ)_A$  и СК ПИ  $(OXYZ)_П$  — коллинеарные и однонаправленные (см. рис. 2) системы координат. Начало базовой СК (точка  $O_A$ ) является центром проекции точек пространства предметов в пространство изображений (на фокальную плоскость) ОЭА. Фокальная плоскость ОЭА совпадает с плоскостью  $(XOY)_П$  и расположена на расстоянии  $f'$  от начала СК ОЭА.

2. Точка  $O'_A$  (см. рис. 3) — проекция точки  $O_A$  на плоскость  $(XOY)_П$ . Оси координат  $O'_A X'_A$  и  $O'_A Y'_A$  — соответственно проекции осей  $O_A X_A$  и  $O_A Y_A$  на плоскость  $(XOY)_П$ .

3. Угол  $\alpha$  разворота приемника (см. рис. 3) мал, т.е.  $\sin \alpha \approx \alpha$ ,  $\cos \alpha \approx 1$ .

4. Истинное положение центра  $j$ -го элемента ОЭП в плоскости  $(XOY)_П$  задается суммой векторов  $r_j$  и  $dr_j$  (см. рис. 3).

5. Элементы приемника расположены встык, без промежутков.

6. Тангенциальная составляющая дисторсии отсутствует.

Обозначим расстояние от начала координат СК ПИ до линейки (строки) ПИ  $a_j$  (см. рис. 3), а размер элемента дискретизации приемника —  $d_{ПЗС}$ .

Векторы  $r_j$  и  $r_j + dr_j$  можно записать в виде (см. рис. 2 и 3)

$$r_j = (r_{jX}; r_{jY}) = \left( f'_\phi \operatorname{tg} \mu_j; f'_\phi \operatorname{tg} \nu_j \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \mu_j} \right) = (f'_\phi \varphi_j; f'_\phi \psi_j); \quad (1)$$

$$r_j + dr_j = (a_j \alpha + d_j + X_0; a_j - d_j \alpha + Y_0),$$

где  $d_j = |k - j| d_{\text{ПЗС}}$ ;  $f'_\phi$  – расстояние от оптимального для выбранного критерия определения ФГП центра проекций до фокальной плоскости (фотограмметрическое фокусное расстояние);  $\varphi_j = \operatorname{tg} \mu_j$ ,  $\psi_j = \operatorname{tg} \nu_j \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \mu_j}$  – функции, вид которых зависит от углов  $\mu_j$ ,  $\nu_j$  визирного луча;  $X_0$ ,  $Y_0$  – координаты проекции задней узловой точки объектива на фокальную плоскость.

Тогда вектор дисторсии  $dr_j$  в точке расположения центра  $j$ -го элемента приемника будет определяться следующим выражением:

$$dr_j = (a_j \alpha + d_j + X_0 - f'_\phi \varphi_j; a_j - d_j \alpha + Y_0 - f'_\phi \psi_j). \quad (2)$$

Значение дисторсии в любой точке фокальной плоскости можно приближенно вычислить по формуле

$$|dr^*| \approx A |r|^3, \quad (3)$$

где  $|dr^*|$  – приближенное значение абсолютной величины вектора дисторсии в рассматриваемой точке;  $|r|$  – абсолютная величина радиуса-вектора этой точки;  $A$  – коэффициент дисторсии 3-го порядка.

Абсолютная величина разности  $|\Delta r|$  между точным и приближенным векторами дисторсии составит

$$|\Delta r| = |dr - Ar^3|, \quad (4)$$

где  $dr$  – точный вектор дисторсии.

Для  $n$  рассматриваемых точек углового поля ОЭА с учетом значимости вклада в суммарную дисторсию каждой из них суммы квадратов точных и приближенных значений дисторсии будут иметь вид

$$dr_\Sigma^2 = \sum_{i=1}^n p_i^2 |dr_i|^2, \quad \Delta r_\Sigma^2 = \sum_{i=1}^n p_i^2 |\Delta r_i|^2. \quad (5)$$

Задача определения ФГП ОЭА заключается в получении значений фотограмметрического фокусного расстояния  $f'_\phi$ , коэффициента дисторсии  $A$ , координат  $X_0$ ,  $Y_0$  проекции главной точки, угла  $\alpha$  разворота приемника  $\alpha$  при минимальных суммах квадратов  $dr_\Sigma^2 = dr_\Sigma^2(f'_\phi, X_0, Y_0, \alpha)$  (критерий 1) или квадратов  $\Delta r_\Sigma^2 = \Delta r_\Sigma^2(f'_\phi, A, X_0, Y_0, \alpha)$  (критерий 2).

Условия минимума  $dr_\Sigma^2$  имеют вид

$$\frac{\partial r_\Sigma^2}{\partial f'_\phi} = \frac{\partial r_\Sigma^2}{\partial X_0} = \frac{\partial r_\Sigma^2}{\partial Y_0} = \frac{\partial r_\Sigma^2}{\partial \alpha} = 0. \quad (6)$$

Условия минимума  $\Delta r_\Sigma^2$  имеют вид

$$\frac{\partial \Delta r_\Sigma^2}{\partial f'_\phi} = \frac{\partial \Delta r_\Sigma^2}{\partial A} = \frac{\partial \Delta r_\Sigma^2}{\partial \alpha} = \frac{\partial \Delta r_\Sigma^2}{\partial X_0} = \frac{\partial \Delta r_\Sigma^2}{\partial Y_0} = 0. \quad (7)$$

*Определение ФГП аппаратуры по критерию 1*, т.е. по минимальному значению дисторсии в  $n$  точках углового поля ОЭА, сводится к решению относительно  $f'_\phi$ ,  $X_0$ ,  $Y_0$  и  $\alpha$  системы четырех линейных уравнений, полученной из условия (6).

Система уравнений в матричном выражении имеет вид

$$\begin{pmatrix} -\sum p_i^2(\varphi_i^2 + \psi_i^2) & \sum p_i^2(a_i\varphi_i - d_i\psi_i) & \sum p_i^2\varphi_i & \sum p_i^2\psi_i \\ \sum p_i^2(d_i\psi_i - a_i\varphi_i) & \sum p_i^2(a_i^2 + d_i^2) & \sum p_i^2a_i & -\sum p_i^2d_i \\ -\sum p_i^2\varphi_i & \sum p_i^2a_i & \sum p_i^2 & 0 \\ -\sum p_i^2\psi_i & -\sum p_i^2d_i & 0 & \sum p_i^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f \\ \alpha \\ X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum p_i^2(d_i\varphi_i + a_i\psi_i) \\ 0 \\ \sum p_i^2d_i \\ \sum p_i^2a_i \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Коэффициент дисторсии  $A$  может быть определен при найденных  $f'_\phi$ ,  $\alpha$ ,  $X_0$ ,  $Y_0$  и известных  $a_i$ ,  $d_i$ ,  $\phi_i$ ,  $\psi_i$  по минимуму величины  $\Delta r^* = \sum_{i=1}^n (p_i)^2 |dr_i - A|r_i|^2 r_i|^2$ , где неизвестным является только  $A$ . Условие минимума  $\Delta r^*$  совпадает с условием (7).

После преобразований получаем формулу для коэффициента дисторсии  $A$ :

$$A = \frac{\sum p_i^2 (dr_{xi}\varphi_i + dr_{yi}\psi_i)}{f_\phi^3 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2)^2}, \quad (9)$$

где  $dr_{xi} = a_i\alpha + d_i + X_0 - f'_\phi\varphi_i$ ;  $dr_{yi} = a_i - d_i\alpha + Y_0 - f'_\phi\psi_i$  — координаты вектора дисторсии  $dr_i$  в приборной системе координат.

*Определение ФГП ОЭА по критерию 2*, т.е. по минимальной разности между значениями дисторсии и ее аппроксимации в  $m$  рассматриваемых точках, заключается в решении относительно  $f'_\phi$ ,  $\alpha$ ,  $A$ ,  $X_0$ ,  $Y_0$  системы пяти нелинейных уравнений, полученной из условия (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} A^2 f^5 3 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2)^3 + A f^3 4 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2)^2 - \\ - A f^2 3 \left[ \alpha \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) (a_i \varphi_i - d_i \psi_i) + \right. \\ \left. + X_0 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) \varphi_i + Y_0 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) \psi_i \right] - \\ - A f^2 3 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) (d_i \varphi_i + a_i \psi_i) + \\ + f \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) + \alpha \sum p_i^2 (d_i \psi_i - a_i \varphi_i) - \\ - X_0 \sum p_i^2 \varphi_i - Y_0 \sum p_i^2 \psi_i - \sum p_i^2 (a_i \varphi_i + d_i \psi_i) = 0; \\ A f^3 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2)^3 + f \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2)^2 + \\ + \alpha \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) (a_i \varphi_i - d_i \psi_i) - \\ - X_0 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) \varphi_i - Y_0 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) \psi_i - \\ - \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) (d_i \varphi_i + a_i \psi_i) = 0; \\ A f^3 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) (d_i \psi_i - a_i \varphi_i) + f \sum p_i^2 (d_i \psi_i - a_i \varphi_i) + \\ + \alpha \sum p_i^2 (a_i^2 + d_i^2) - X_0 \sum p_i^2 a_i - Y_0 \sum p_i^2 d_i = 0; \\ - A f^3 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) \varphi_i - f \sum p_i^2 \varphi_i + \\ + \alpha \sum p_i^2 a_i + X_0 \sum p_i^2 + \sum p_i^2 d_i = 0; \\ - A f^3 \sum p_i^2 (\varphi_i^2 + \psi_i^2) \psi_i - f \sum p_i^2 \psi_i - \\ - \alpha \sum p_i^2 d_i + Y_0 \sum p_i^2 + \sum p_i^2 a_i = 0. \end{array} \right. \quad (10)$$

*При определении ФГП ОЭА по критерию 3*, т.е. по минимальному значению дисторсии в точках измерения при последовательном определении каждого ФГП (метод итераций), для упрощения вычислений необходимо немного изменить принятую ранее фотограмметрическую модель. Предположим, что

— оси СК ПИ параллельны осям СК ОЭА (в пределах допуска на юстировку);

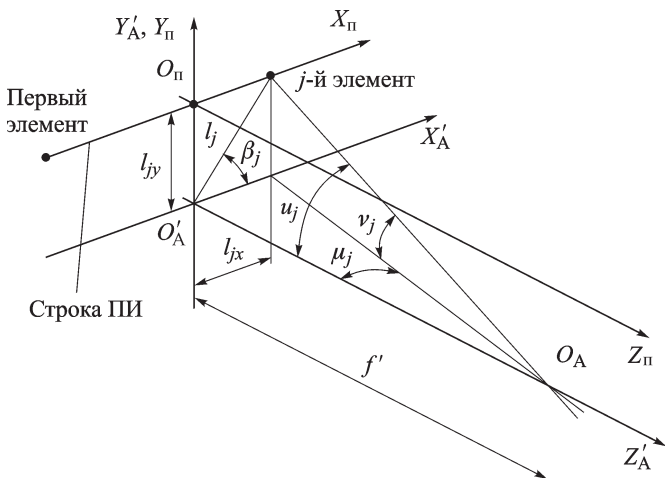


Рис. 4. СК ПИ при последовательном определении классических ФГП

– плоскость  $(XOY)_n$  СК ПИ и плоскость наилучшего изображения совпадают, ось  $OX_n$  совпадает с длинной стороной ПЗС, ось  $OY_n$  перпендикулярна оси  $OX_n$  и проходит через элемент ПЗС с номером  $j_c$ , принятый за центр его светочувствительной поверхности (рис. 4);

– оптическая дисторсия системы определяется выражением  $\Delta_{\text{опт}} = Al^3$ , где  $l$  – абсолютная величина радиуса-вектора точки поля изображения объектива;

– номинальное расстояние между элементами линейки равно  $|j - j_c| d_{\text{ПЗС}}$ ;

– нумерация элементов линеек ведется слева направо.

Исходными данными для расчета являются:

– значения  $\mu_j, \nu_j$  (угловые координаты  $j$ -го элемента в пространстве предметов);

– оптическое фокусное расстояние  $f'$  (паспортное значение);

– коэффициент дисторсии объектива  $A$ .

На первом шаге итерации ( $i = 1$ ) используются паспортные значения оптического фокусного расстояния  $f'_1 = f'$  и коэффициента оптической дисторсии  $A_1 = A$ , а коэффициент изменения масштаба принимается равным  $\varepsilon_1 = 0$ . Далее эти параметры итерационно уточняются. При отсутствии в системе дисторсии ( $A = 0$ ) углы  $\mu$  и  $\nu$  пространства предметов и углы  $\mu'$  и  $\nu'$  пространства изображения равны. Тогда линейные координаты элемента  $j$  по угловым координатам определяются следующим образом (см. рис. 4):

$$l_{jx} = f'_i \operatorname{tg} \mu_j; \quad (11)$$

$$l_{jy} = f'_i \frac{\operatorname{tg} \nu_j}{\cos \mu_j}. \quad (12)$$

Здесь индекс  $i$  определяет порядковый номер шага итераций ( $i = 1, 2, \dots$ ).

Длина радиуса-вектора точки поля изображения для элемента  $j$  в СК  $(O'X'Y')_A$  составляет (см. рис. 4):

$$l_j = \sqrt{l_{jx}^2 + l_{jy}^2} = f'_i \sqrt{\operatorname{tg}^2 \mu_j + \frac{\operatorname{tg}^2 \nu_j}{\cos^2 \mu_j}}. \quad (13)$$

Формула для угла точки поля изображения имеет вид

$$\operatorname{tg} u_j = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \mu_j + \frac{\operatorname{tg}^2 \nu_j}{\cos^2 \mu_j}}. \quad (14)$$

Луч с угловыми координатами  $\mu_j, \nu_j$  при отсутствии дисторсии должен попасть в точку с координатами  $l_{jx}, l_{jy}$ .

При наличии в системе оптической дисторсии ( $A \neq 0$ ), ее значение в рассматриваемой точке определяется по формуле

$$\Delta l_j = A_i l_j^3. \quad (15)$$

Тогда длина радиуса-вектора точки поля изображения для элемента  $j$  составит

$$(l_j)_i = l_j - \Delta l_j. \quad (16)$$

Запишем выражения для проекций оптической дисторсии на оси  $O'X'$  и  $O'Y'$ :

$$\begin{aligned} \Delta l_{jx} &= \Delta l_j \sin \beta_j; \\ \Delta l_{jy} &= \Delta l_j \cos \beta_j. \end{aligned} \quad (17)$$

Подставляя выражения (11), (12), (13) и (15) в уравнения (17), получаем:

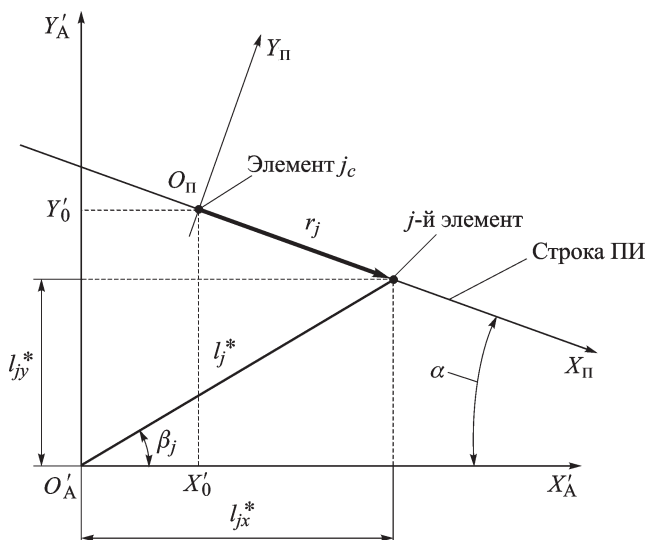
$$\begin{aligned} (\Delta l_{jx})_i &= A_i \left( \frac{f'_i}{\cos \mu_j} \right)^3 (\sin^3 \mu_j + \operatorname{tg}^2 \nu_j \sin \mu_j); \\ (\Delta l_{jy})_i &= A_i \left( \frac{f'_i}{\cos \mu_j} \right)^3 (\sin^2 \mu_j \operatorname{tg} \nu_j + \operatorname{tg}^3 \nu_j). \end{aligned} \quad (18)$$

Проекция радиуса-вектора  $l_j$  элемента  $j$  на оси  $O'X'$  и  $O'Y'$  (см. рис. 4) согласно формулам (11), (12) и с учетом дисторсии и коэффициента изменения масштаба  $\varepsilon$ , можно рассчитать по уравнениям

$$\begin{aligned} (l_{jx})_i &= f'_i \operatorname{tg} \mu_j (1 + \varepsilon_i) - (\Delta l_{jx})_i; \\ (l_{jy})_i &= f'_j \frac{\operatorname{tg} \nu_j}{\cos \mu_j} (1 + \varepsilon_i) - (\Delta l_{jy})_i. \end{aligned} \quad (19)$$

С другой стороны, из рис. 5, на котором показано положение координатных осей СК ПИ в плоскости  $(O'X'Y')_A$ , следует, что координаты  $(l_{jx})_i$  и  $(l_{jy})_i$   $j$ -го элемента с учетом малости угла  $\alpha$  можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} (l_{jx}^*)_i &= X'_0 + |r_j| = X'_0 + r_j; \\ (l_{jy}^*)_i &= Y'_0 - r_j \alpha'. \end{aligned} \quad (20)$$



**Рис. 5. СК ПИ в фокальной плоскости ОЭА при последовательном определении классических ФГП**

Здесь  $X'_0 Y'_0$  — координаты начала СК ПИ в СК  $(O'X'Y')$ <sub>A</sub>,  $r_j$  — длина радиуса-вектора элемента с номером  $j$  в СК ПИ.

Для вычисления фотограмметрического фокусного расстояния необходимо приравнять соответственно выражения (19) и (20). Однако сначала необходимо рассчитать значения координат  $X'_0, Y'_0$  и угла  $\alpha'$ . С этой целью минимизируются суммы квадратов невязок  $[(l_{jx})_i - (l_{jx}^*)_i]$  и  $[(l_{jy})_i - (l_{jy}^*)_i]$ :

$$\begin{aligned}\Sigma_x &= \sum_j [(l_{jx})_i - (l_{jx}^*)_i]^2 \Rightarrow \min; \\ \Sigma_y &= \sum_j [(l_{jy})_i - (l_{jy}^*)_i]^2 \Rightarrow \min.\end{aligned}\quad (21)$$

Условие минимума выражений (21) имеет вид

$$\frac{\partial \Sigma_y}{\partial \alpha'} = \frac{\partial \Sigma_x}{\partial X'_0} = \frac{\partial \Sigma_y}{\partial Y'_0} = 0. \quad (22)$$

После преобразований получаем систему уравнений, решая которую определяем  $X'_0, Y'_0$  и  $\alpha'$ :

$$\begin{cases} \sum_j r_j (l_{jy})_i - Y'_0 \sum_j r_j + \alpha' \sum_j r_j^2 = 0; \\ \sum_j (l_{jy})_i - n Y'_0 + \alpha' \sum_j r_j = 0; \\ \sum_j (l_{jx})_i - n X'_0 - \sum_j r_j = 0, \end{cases} \quad (23)$$

где  $n$  — число точек, для которых проводятся измерения.

С учетом полученных значений  $X'_0, Y'_0$  и  $\alpha'$  по формулам (20) определяем координаты  $(l_{jx}^*)_i$  и  $(l_{jy}^*)_i$   $j$ -го элемента, а также радиус-вектор  $j$ -го элемента:

$$(l_j^*)_i = \sqrt{(l_{jx}^*)_i^2 + (l_{jy}^*)_i^2}. \quad (24)$$

Далее находим дисторсию в точках измерения по формуле

$$(\Delta_j)_i = (l_j^*)_i - f'_i \operatorname{tg} u_j; \quad (25)$$

для этого минимизируем следующую сумму квадратов невязок:

$$\sum [(l_j^*)_i - f'_{i\phi} \operatorname{tg} u_0]^2 \Rightarrow \min. \quad (26)$$

Приравнивая частную производную выражения (26) по  $f'_{i\phi}$  к нулю, получаем формулу для вычисления фотограмметрического фокусного расстояния:

$$f'_{i\phi} = \frac{\sum_j (l_j^*)_i \operatorname{tg} u_j}{\sum_j \operatorname{tg}^2 u_j}. \quad (27)$$

С учетом формулы (27) фотограмметрическая дисторсия будет равна

$$(\Delta_j)_i = (l_j^*)_i - f'_{i\phi} \operatorname{tg} u_j. \quad (28)$$

С другой стороны, фотограмметрическую дисторсию можно определить как

$$(\Delta_j^*)_{i\phi} = A_i (l_{j\phi}^*)_i^3 - \varepsilon_i (l_{j\phi}^*)_i, \quad (29)$$

где  $(l_{j\phi}^*)_i = f'_{i\phi} \operatorname{tg} u_j$ .



Для нахождения значений  $A_i$  и  $\varepsilon_i$  минимизируется следующая сумма квадратов невязок:

$$\sum_j ((\Delta_j^*)_i - (\Delta_j^{**})_i)^2 = \sum_j ((\Delta_j^*)_i - A_i(f'_{i\phi} \operatorname{tg} u_j)^3 + \varepsilon_i(f'_{i\phi} \operatorname{tg} u_j)_i)^2 \Rightarrow \min. \quad (30)$$

Это условие сводится к системе уравнений

$$\begin{cases} \sum_j ((\Delta_j^*)_i - A_i(f'_{i\phi})^3 \operatorname{tg}^6 u_j + \varepsilon_i f'_{i\phi} \operatorname{tg}^4 u_j) = 0; \\ \sum_j ((\Delta_j^*)_i - A_i(f'_{i\phi})^3 \operatorname{tg}^4 u_j + \varepsilon_i f'_{i\phi} \operatorname{tg}^2 u_j) = 0, \end{cases} \quad (31)$$

решив которую, получим значения  $A_i$  и  $\varepsilon_i$ .

На последнем этапе расчета проводится сравнение найденного значения фотограмметрического фокусного расстояния  $f'_{i\phi}$  со значением  $f'_{(i-1)\phi}$ , полученным на предыдущем шаге:

$$\begin{aligned} \Delta f'_{i\phi} &= f'_{i\phi} - f'_{(i-1)\phi}; \\ \delta f'_{i\phi} &= \frac{\Delta f'_{i\phi}}{f'_{i\phi}} \cdot 100 \% \leq \delta. \end{aligned} \quad (32)$$

Величина  $\delta$  определяет допустимую ошибку вычислений и задается обычно равной 0,001 %. Если неравенство (32) не выполняется, то вычисления по формулам (15)–(32) повторяются с найденными значениями параметров  $f'_{i\phi}$ ,  $A_i$  и  $\varepsilon_i$ . Таким образом, данные измерений углового положения светочувствительных элементов ПИ могут быть пересчитаны по одному из предложенных критериев в традиционную систему фотограмметрических параметров, связанную с условным кадром изображения.

**Методы аттестации и контроля ФГП ОЭА.** Аттестация ФГП ОЭА предполагает установление соответствия между равномерно распределенными по полю ОЭА углами визирных лучей и номерами светочувствительных элементов приемника. Полученные результаты используются:

– для аппроксимации полиномами зависимости угловых координат элемента от его номера в строке изображения (элементы внутреннего ориентирования в пространстве предметов);

– для расчета фотограмметрического фокусного расстояния, фотограмметрической дисторсии и положения проекции задней узловой точки объектива на плоскость изображения (элементы внутреннего ориентирования в пространстве изображений).

Аттестация и контроль ФГП ОЭА могут проводиться следующими методами:

**Метод последовательных измерений** используется для аттестации широкоугольных достаточно короткофокусных оптико-электронных систем. Измерение угловых положений элементов ПЗС осуществляется по следующей схеме.

1. На вход ОЭА последовательно подается коллимированный пучок лучей от тест-объекта с известным угловым положением  $(\mu_j, \nu_j)$  в приборной системе координат.

2. При каждом новом положении тест-объекта приемник регистрирует его изображение. Полученный при этом массив видеoinформации (ВИ) содержит изображения тест-объекта, по которым определяются номера элементов ПЗС, соответствующих энергетическим центрам этих изображений  $(j, l_{jx}, l_{jy})$ . За энергетический центр (ЭЦ) принимается центр тяжести фигуры под кривой зависимости уровня сигнала от номера элемента.

3. Каждому угловому положению тест-объекта  $(\mu_j, \nu_j)$  сопоставляется соответствующий номер элемента  $(j, l_{jx}, l_{jy})$ .

Полученный в результате обработки массив ВИ содержит номера элементов ПЗС и соответствующие им углы в СК ОЭА.

Поскольку в современной ОЭА ДЗЗ число элементов дискретизации приемника превышает  $10^4$ , то зависимости угловых координат элементов ПЗС от их номера аппроксимируют полиномами. Для аппроксимации используют результаты расчетов положений ЭЦ  $(j, l_{jx}, l_{jy})$  и угловые координаты  $\mu_j, \nu_j$ :

$$\begin{aligned} \mu_j &= a_n j^n + a_{n-1} j^{n-1} + \dots + a_1 j + a_0; \\ \nu_j &= b_n j^n + b_{n-1} j^{n-1} + \dots + b_1 j + b_0. \end{aligned} \quad (33)$$

Коэффициенты полиномов  $a_i$  и  $b_i$  определяются методом наименьших квадратов. Минимальное число точек измерения определяется наибольшей степенью полинома, а максимальное ограничивается оценочной точностью аппроксимации и практическими соображениями.

Среднеквадратическая погрешность метода определяется в основном точностью угловых измерений и составляет примерно  $1,5'' \dots 2,5''$ .

**Метод синхронных измерений** используется для аттестации узкоугольных длиннофокусных оптико-электронных систем. Принцип измерений заключается в следующем:

- во входной зрачок ОЭА направляются идущие из бесконечности пучки лучей, угловые координаты которых известны. Пучки могут быть широкими, соответствующими размеру выходного зрачка коллиматора, или узкими, размеры поперечного сечения которых определяются диаметром пучка лазера;

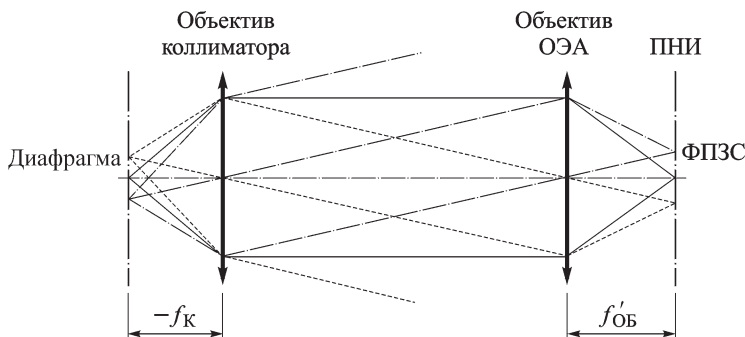
- изображения диафрагм тест-объекта, формируемые проецирующими лучами, равномерно распределенными по полю изображения, регистрируются ПИ;

- для каждого изображения диафрагмы определяется номер элемента ПЗС, на который приходится ЭЦ изображения, и этому элементу присваиваются соответствующие угловые координаты.

Зависимости угловых координат элементов ПЗС от их номера аппроксимируют полиномами аналогично методу последовательных измерений.

В соответствии с тем, какие пучки лучей используются при аттестации ФГП, метод синхронных измерений можно подразделить на измерения с помощью широкого (рис. 6) и узких (рис. 7) коллимированных пучков.

Для проведения измерений с помощью широкого коллимированного пучка необходим коллиматор, фокусное расстояние которого как минимум в 3 раза больше, чем фокусное расстояние объектива ОЭА, а угловое поле превышает угловое поле объектива ОЭА. Очевидно, что могут возникнуть трудности с поиском такого коллиматора для длиннофокусных объективов. Возможность использования коллиматора с фокусным расстоянием, меньшим требуемого, определяется характеристиками объектива ОЭА.



**Рис. 6.** Схема измерений с помощью широкого коллимированного пучка

Для измерений с помощью узких коллимированных пучков предлагается с помощью блока светоделительных зеркал разделить луч лазера на несколько пучков, распространяющихся по разным направлениям (см. рис. 7). Углы между пучками предварительно измеряются с высокой точностью. Расширение лазерного пучка обеспечивает телескопическая система. Юстировка взаимного положения телескопической системы и зеркального блока обеспечивается афокальным клином, установленным перед блоком зеркал.

По предварительным оценкам среднеквадратическая погрешность аттестации элементов внутреннего ориентирования по методу синхронных измерений составит примерно  $0,4'' \dots 0,6''$ .

**Погрешности аттестации ФГП ОЭА.** Основные погрешности аттестации и причины их появления указаны в таблице.

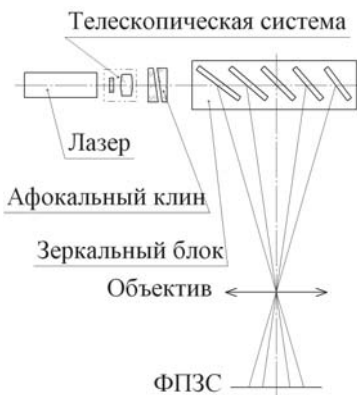


Рис. 7. Схема измерений с помощью узких коллимированных пучков

### Погрешности аттестации ФГП ОЭА

Вид погрешности	Причина
Погрешности $\Delta\mu_j$ , $\Delta\nu_j$ определения углового положения связки проектирующих лучей на входе ОЭА относительно СК ОЭА ( $OXYZ$ ) <sub>A</sub> (см. рис. 2)	Ошибки разгрузки ОЭА при измерениях и инструментальные ошибки
Погрешность аттестации взаимного положения проектирующих лучей на входе ОЭА	
Погрешность определения ЭЦ изображения тест-объекта	Методические и алгоритмические ошибки
Погрешности $\Delta l_{jx}$ и $\Delta l_{jy}$ определения линейного положения светочувствительного элемента ПЗС в СК ПИ по оси $O_{II}X_{II}$ и по оси $O_{II}Y_{II}$ соответственно (см. рис. 2)	Колесания температуры при измерениях и инструментальные ошибки
Погрешности введения температурных поправок в значения линейных положений светочувствительных элементов ПЗС в СК ОЭА	Методические ошибки

Предлагаемый подход к аттестации ФГП ОЭА и переход к классическим ФГП был применен при фотограмметрической калибровке ОЭА ДЗЗ космического аппарата “Монитор-Э”. Аттестация проводилась по методу последовательных измерений и ее суммарная погрешность составила  $4,2''$ . Переход осуществлялся по минимальному значению дисторсии в рассматриваемых точках углового поля ОЭА при последовательном определении каждого ФГП.

**Выводы.** 1. Введено понятие фотограмметрических параметров оптико-электронной аппаратуры, которое описывает связь визирных лучей в пространстве предметов с номерами элементов приемника излучения. Для этих параметров предложены критерии и установлена связь с традиционными фотограмметрическими параметрами.

2. Рассмотрены методы аттестации и контроля фотограмметрических параметров оптико-электронной аппаратуры, применение которых при фотограмметрической калибровке оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли позволяет повысить точность и упростить процесс калибровки аппаратуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л о б а н о в А. Н. Фотограмметрия: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
2. У р м а е в М. С. Космическая фотограмметрия: Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1984. – 279 с.

Статья поступила в редакцию 14.02.2008

Сергей Алексеевич Архипов родился в 1955 г., окончил в 1978 г. Ленинградский институт точной механики и оптики. Канд. техн. наук, начальник СКБ-1 НТЦ ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”. Автор более 20 научных работ в области оптического приборостроения.

S.A. Arkhipov (b. 1955) graduated from the Leningrad Institute for Precise Mechanics and Optics in 1978. Ph. D. (Eng.), Head of the Special Design Department of public JSC “Krasnogorsky zavod im S.A. Zvereva”. Author of more than 20 publications in the field of optical device engineering.

Григорий Васильевич Гасич родился в 1947 г., окончил в 1970 г. Черновицкий государственный университет. Ведущий инженер НТЦ ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”. Автор 2 научных работ в области оптического приборостроения.

G.V. Gasitch (b. 1947) graduated from the Tchernovtsy State University in 1970. Leading engineer of the Research and Design Center of public JSC “Krasnogorsky zavod im S.A. Zvereva”. Author of 2 publications in the field of optical device engineering.

Валерий Иванович Заварзин родился в 1956 г., окончил в 1980 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Оптико-электронные приборы научных исследований”, декан факультета “Оптико-электронное приборостроение” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных работ в области оптического приборостроения.

V.I. Zavarzin (b. 1956) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1980. D. Sc. (Eng.), professor of “Optical-and-Electronic Devices for Scientific Applications” department, dean of “Optical-and-Electronic Device Engineering” faculty of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 80 publications in the field of optical device engineering.

Сергей Александрович Морозов родился в 1982 г., окончил в 2006 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Оптико-электронные приборы научных исследований” МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер-конструктор НТЦ ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”. Автор 2 научных работ в области оптического приборостроения.

S.A. Morozov (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2006. Post-graduate of “Optical-and-Electronic Devices for Scientific Applications” department of the Bauman Moscow State Technical University, engineer-designer of the Research and Design Center of public JSC “Krasnogorsky zavod im S.A. Zvereva”. Author of 2 publications in the field of optical device engineering.