

МЕХАНИКА

УДК 528.2/3

Мамедбеков С.Н.

ВЛИЯНИЕ ДИСТОРСИИ ОБЪЕКТИВА КАМЕРЫ ПРИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СНИМКОВ

Mamedbekov S.N.

DEFINITION LENS DISTORTION CAMERA WHEN PHOTOGRAMMETRIC IMAGE PROCESSING

В данной работе рассмотрен классический метод вычисления величины дисторсии и учет ее влияния на смещение изображений точек по полю снимка. Произведена априорная оценка влияния дисторсии для объективов с фокусными расстояниями 55 мм и 140 мм. Результаты выданы графически.

Ключевые слова: дисторсия, абберация, фотограмметрия, объектив, камера.

In this paper we consider the classical method of calculating the magnitude of the distortion, and the account of its impact on the offset image points on the field image. Made a priori estimate of the impact of distortion for lenses with focal lengths of 55 mm and 140 mm. Results given graphically.

Key words: distortion, aberration, photogrammetry, lens, camera.

Фотограмметрическое качество снимков зависит от способности правильной передачи геометрии изображения объектов фотообъективом камеры на плоскость снимка, т.е. от характеристики объектива камеры. Одним из факторов, влияющих на точность передачи изображения на плоскость снимка является дисторсия, которая представляет собой один из видов хроматической абберации, т.е. нарушение ортоскопии объектива. В реальной оптической системе камеры, в отличие от идеальной, ортоскопия может быть нарушена. Нарушение ортоскопии в объективах фотокамер происходит по следующим причинам:

1. Из-за погрешностей в расчетах оптической системы.
2. Погрешностей при изготовлении отдельных элементов системы.
3. Погрешностей при сборке всей оптической системы в целом.

Дисторсия, вызванная погрешностями сборки объектива, подразделяется на два вида:

1. Центрированного объектива, которая вызывает смещение изображений точек в плоскости снимка по радиальным направлениям, проходящим через главную точку снимка (радиальная);
2. Нецентрированного объектива, которая вызывает радиальные и перпендикулярные радиальным, тангенциальные смещения.

В случае не учета погрешности, вызванной дисторсией, радиус-вектор каждой точки при фотограмметрических измерениях аэрофотоснимка будет содержать систематическую погрешность. Нарушение ортоскопии в центрированных оптических системах объясняется неравенством углов между входящим лучом в объектив β и выходящим из него β' , как показано на рис.1.

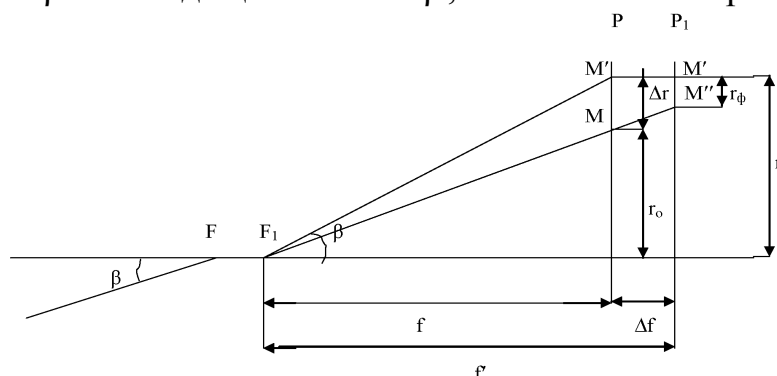


Рисунок 1 - Схема действия дисторсии в объективах фотокамер

При этом, изображение точки M получится в точке M' , т. е. сместится на величину Δr . В данном случае если $\beta' > \beta$, то смещение изображения происходит в сторону увеличения радиус – вектора r и дисторсия считается положительной, и наоборот, если $\beta' < \beta$ дисторсия считается отрицательной. Смещение Δr изображения точки M зависит от величины радиус-вектора r_0 и имеет нелинейный характер. При этом, окружность, имеющая постоянный радиус, изображается окружностью, которая будет содержать постоянную погрешность по всей длине, а все остальные геометрические фигуры будут претерпевать искажения нелинейного характера. В случае положительной дисторсии, точки, имеющие большие радиус – векторы относительно главной точки снимка будут иметь большие искажения, а точки, имеющие меньшие радиус – векторы, малые искажения. В случае отрицательной дисторсии изображение геометрической фигуры будет иметь обратный эффект. Например, фигура квадрата в случае положительной дисторсии будет иметь подушкообразное изображение, и бочкообразное изображение – в случае отрицательной дисторсии, так как $r_2 > r_1$, где r_1 и r_2 радиус-векторы середины стороны квадрата и вершины соответственно.

Величину суммарной дисторсии, т. е. абсолютной дисторсии, вычисляют при помощи полинома вида [1]

$$\Delta r = r - r_0 = k_0 r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \quad (1)$$

Первый член этого полинома представляет линейное увеличение изображения, которое имеет наибольшее значение, которое можно исключить изменением положения плоскости изображения P в положение P' , т.е. изменяя фокусное расстояние на величину Δf

$$k_0 r = r (\Delta f / f) \quad (2)$$

При этом, фокусное расстояние, как видно из рис. 1, увеличится на величину Δf и станет:

$$f' = f + \Delta f \quad (3)$$

и его называют фокусным расстоянием фотокамеры.

Остаточное отклонение Δr_{ϕ} точки M' до точки M , " которое имеет нелинейный характер, называют фотограмметрической дисторсией, и представляют в виде полинома:

$$\Delta r_{\phi} = k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots, \quad (4)$$

или их можно выразить как разности

$$\begin{aligned} \Delta r_{\phi 1} &= r_1 - f' \operatorname{tg} \beta_1 \\ \Delta r_{\phi 2} &= r_2 - f' \operatorname{tg} \beta_2 \\ \Delta r_{\phi n} &= r_n - f' \operatorname{tg} \beta_n \end{aligned} \quad (5)$$

Фокусное расстояние фотокамеры f' определяют при его калибровке под условием $\sum \Delta r_{\phi}^2 = \min$ [2]. Решая систему уравнений (5) по методу наименьших квадратов получаем нормальное уравнение следующего вида:

$$f' [\operatorname{tg}^2 \beta] - [r \operatorname{tg} \beta] = 0. \quad (6)$$

Отсюда получаем фокусное расстояние камеры

$$f' = [r \operatorname{tg} \beta] / [\operatorname{tg}^2 \beta]. \quad (7)$$

На практике фокусное расстояние камеры находят следующим образом. Сначала вычисляют фокусное расстояние каждой зоны по отдельности по формулам:

$$f_i^{(x)} = r_i^{(x)} / \operatorname{tg} \beta_i^{(x)}; \quad f_i^{(y)} = r_i^{(y)} / \operatorname{tg} \beta_i^{(y)}. \quad (8)$$

Затем вычисляют предварительные значения фокусного расстояния по оси X и по оси Y :

$$f^{(x)} = [r_i^{(x)}] / [\operatorname{tg} \beta_i^{(x)}]; \quad f^{(y)} = [r_i^{(y)}] / [\operatorname{tg} \beta_i^{(y)}], \quad (9)$$

где $r_i^{(x)}$ и $r_i^{(y)}$ – заранее известные расстояния от i -го маркированного креста вдоль осей x и y соответственно в (мм), а $\beta_i^{(x)}$ и $\beta_i^{(y)}$ – измеренные на оптической скамье углы между направлениями на центральный и i -ый маркированный крест.

Общее значение фокусного расстояния камеры вычисляется по следующей формуле как среднее значение из двух определенных по каждой оси $f^{(x)}$ и $f^{(y)}$:

$$f' = (f^{(x)} + f^{(y)}) / 2. \quad (10)$$

После нахождения фокусного расстояния камеры f' находят фотограмметрическую дисторсию по формулам (5). Углы β при этом, измеряются на оптиче-

ской скамье, наблюдая через объектив перекрестия контрольной сетки, установленной в плоскости изображения.

Значения дисторсии для точек, соответствующих центрам крестов, расположенных на координатных осях, вычисляют в два этапа. На первом этапе полагают, что главная точка снимка совпадает с началом системы координат снимка, т.е., $x_0 = 0$ и $y_0 = 0$, и находят приближенные значения дисторсии для каждого маркированного креста вдоль оси **X** и вдоль оси **Y** по обе стороны от начального креста, используя при этом измеренные горизонтальные и вертикальные углы по формулам:

$$\Delta r'_{\phi}^{(x)} = r_i^{(x)} - f' \operatorname{tg} \beta_i^{(x)}; \quad \Delta r'_{\phi}^{(y)} = r_i^{(y)} - f' \operatorname{tg} \beta_i^{(y)}. \quad (11)$$

Используя полученные приближенные значения дисторсии, вычисляют координаты главной точки:

$$x_0 = (\sum \Delta r'_{\phi}^{(x)}_{\text{пр}} - \sum \Delta r'_{\phi}^{(x)}_{\text{лев}}) / 2 \sum \operatorname{tg}^2 \beta^{(x)}; \quad (12)$$

$$y_0 = (\sum \Delta r'_{\phi}^{(y)}_{\text{пр}} - \sum \Delta r'_{\phi}^{(y)}_{\text{лев}}) / 2 \sum \operatorname{tg}^2 \beta^{(y)}.$$

где $\Delta r'_{\phi}^{(x)}_{\text{пр}}$ и $\Delta r'_{\phi}^{(x)}_{\text{лев}}$ – предварительно вычисленные значения дисторсии для точек, лежащих справа и слева от центрального креста в (мм) соответственно.

Используя вычисленные координаты по формулам (12) находим поправки к приближенным значениям дисторсии:

$$\delta_i^{(x)} = x_0 \operatorname{tg}^2 \beta_i^{(x)}; \quad \delta_i^{(y)} = y_0 \operatorname{tg}^2 \beta_i^{(y)}. \quad (13)$$

Значения дисторсии в окончательном виде для каждой зоны вычисляются прибавлением поправок к приближенным значениям, вычисленным по формулам (11) и (13):

$\Delta r_{\phi}^{(x)} = \Delta r'_{\phi}^{(x)} + \delta_i^{(x)}$ – для точек расположенных слева от центрального креста. (14)

$\Delta r_{\phi}^{(x)} = \Delta r'_{\phi}^{(x)} - \delta_i^{(x)}$ – для точек расположенных справа от центрального креста.

$\Delta r_{\phi}^{(y)} = \Delta r'_{\phi}^{(y)} + \delta_i^{(y)}$ – для точек расположенных слева от центрального креста.

$\Delta r_{\phi}^{(y)} = \Delta r'_{\phi}^{(y)} - \delta_i^{(y)}$ – для точек расположенных справа от центрального креста.

Измерения центральных углов между направлениями на маркированные кресты, лежащие в плоскости прикладной рамки, производятся в горизонтальной плоскости, сначала по оси **X**, затем, поворачивая камеру на 90° , измеряют по оси **Y**.

В ходе исследования произведена обработка измерений, проведенных для калибровки объективов семнадцати аэрофотокамер с различными фокусными

расстояниями на оптической скамье, проведенных в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК); вычислены дисторсия и элементы внутреннего ориентирования этих фотокамер [2]. Во всех фотообъективах практически присутствует дисторсия, которая в большей степени присутствует в оптических системах с меньшим фокусным расстоянием.

Фотограмметрическая, в особенности стереофотограмметрическая обработка аэрофотоснимков предъявляет высокие требования к фотообъективам. Например, при дифференцированном методе обработки аэрофотоснимков требуется, чтобы значение дисторсии не превышало 0,04 мм [3].

Из рис. 2 и 3 видно, что вышеуказанному требованию удовлетворяет только очень малая область центра снимка радиусом, равным порядка 20 мм для короткофокусных объективов с фокусным расстоянием $f = 55$ мм и $f = 70$ мм, что для практического использования аэрофотоаппаратов с такими характеристиками нецелесообразно. В случае 60% -го продольного перекрытия, продольный радиус рабочей площади равен 35 мм, в котором на краях этой площади дисторсия достигает до 0,5 мм.

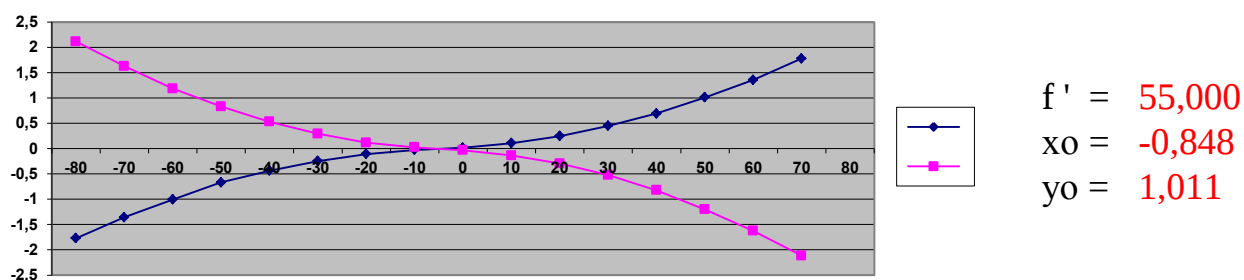


Рисунок 2 - Значения дисторсии объектива с фокусным расстоянием 55 мм

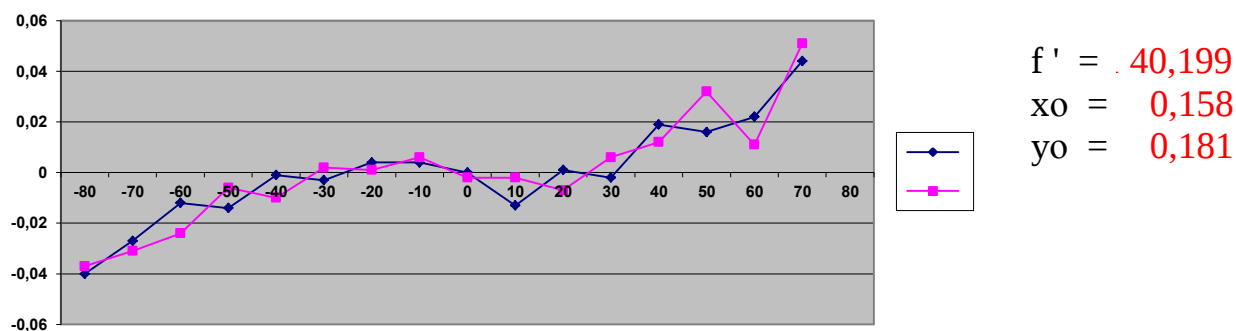


Рисунок 3 - Значения дисторсии объектива с фокусным расстоянием 140 мм

Как показывают результаты этой работы, величина дисторсии зависит от координат главной точки снимка и носит симметричный характер с обязательным изменением знака. Как указано в работе [2] у короткофокусных фотокамер радиальная дисторсия объектива обычно не превосходит 40 мкм, а тангенциальная — примерно около 15 мкм, что этому утверждению соответствует очень малая область в центре снимка, что подтверждается вышеприведенным анализом. Дисторсия меняет свой знак в зависимости от положения главной точки фотоснимка, если x_0 имеет отрицательное значение, то значение дисторсии меняется от отрицательного значения к положительному при переходе по оси X с

левого края к правому и наоборот, то же для оси Y . Данная работа еще раз подтверждает мнение о том, что длиннофокусные объективы менее подвержены влиянию дисторсии, чем короткофокусные. Радиальная дисторсия при фотограмметрических измерениях искажает высоты точек. Например, плоская горизонтальная местность будет восприниматься в виде котловины или, наоборот, в виде выпуклой поверхности. При аналитической обработке фотоснимков в измеренные координаты вводятся поправки за дисторсию. Введение поправок в измеренные координаты производится с помощью использования полинома вида (4) или с использованием избыточного количества опорных точек. Для этого составляют таблицу по данным калибровки камеры, в которой записывают через определенный промежуток, например, через 10 мм поправки за дисторсию. При этом, вычисляются составляющие приращения радиус-вектора по осям координат, заменяя их координатами точек согласно следующим зависимостям:

$$\Delta x = x\Delta r/r, \quad \Delta y = y\Delta r/r, \quad \text{где } r^2 = x^2 + y^2. \quad (15)$$

Исправленные координаты точек рассчитывают в конечном виде по формулам:

$$\begin{aligned} x' &= x - \Delta x = x(1 - \Delta r/r) = x[1 - (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots)], \\ y' &= y - \Delta y = y(1 - \Delta r/r) = y[1 - (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots)]. \end{aligned} \quad (16)$$

Значения k_i вычисляют по результатам калибровки фотокамеры. Широкоугольные объективы, как правило, обладают большей дисторсией, и значение смещения изображений точек определяется согласно кубической функции $\Delta r = kr^3$.

Вывод.

Величина дисторсии в центральной части снимка остается близкой к нулю. Анализ обработанных измерений показывает, что смещение изображений носит симметричный по величине и противоположный по знаку характер. Объективы с меньшими фокусными расстояниями требуется калибровать более тщательно, т.е., координаты главной точки необходимо приблизить к нулю.

По полю снимка знак дисторсии меняется согласно знаку координат главной точки снимка по радиус-вектору главной точки снимка. Максимальное значение дисторсия имеет по линии вдоль радиус-вектора главной точки и зависит от его величины.

Библиографический список:

1. Лобанов А.Н. Фотограмметрия. М. 1984 г.
2. Краснопевцев Б.В. Теоретические основы фотограмметрической обработки аэрофотоснимка и стереопары аэрофотоснимков. М.2000 г.
3. Шершень А.И. Аэрофотосъемка. М.1958 г.