

УДК 528.7

О ПЕРЕМЕННОМ ФОКУСНОМ РАССТОЯНИИ

канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА
(Полоцкий государственный университет)

В настоящее время промышленность выпускает большое число неметрических цифровых камер. Выпускаемые цифровые камеры не предназначены для целей фотограмметрии, так как они имеют большие искажения. Кроме того, для фотограмметрической обработки требуется с высокой точностью определять элементы внутреннего ориентирования: фокусное расстояние и координаты главной точки. Поэтому цифровые камеры необходимо калибровать для получения удовлетворительных по точности результатов. Существует большое число методов калибровки. Особенно сложно при калибровке определить величину фокусного расстояния цифровой камеры. Многие авторы статей не вполне осознают, что же является фокусным расстоянием, не во всех статьях учитывают оптические условия, которые необходимо выполнять. В данной работе приведены определения параметров объективов и требования, которых необходимо придерживаться для получения качественных материалов.

Последнее время промышленность выпускает большое число цифровых неметрических камер. Но так как для фотограмметрических целей цифровые камеры не выпускаются, существует много попыток использовать для измерительных целей профессиональные, полупрофессиональные и даже бытовые цифровые камеры. Но для того, чтобы получить приемлемые по точности результаты цифровые камеры необходимо калибровать. Опубликовано большое число статей [1 – 9], касающихся калибровки цифровых камер. В статьях [1 – 9] рассматриваются разные способы калибровки. Есть способ определения элементов внутреннего ориентирования и дисторсии по съемке, выполненной совместно с аэрофото-съемкой, и по точкам, полученным по материалам аэрофотосъемки, выполняли калибровку цифровой камеры. Но чаще для калибровки используют тестовый полигон, размещенный в лаборатории. Первоначально для калибровки использовали плоский тест-объект [6], затем рельефный тест-объект, на котором точки размещали в разных плоскостях [7; 8]. Большое число предложений, возможно, объясняется тем, что методики калибровки в чем-то не удовлетворяют пользователей.

Рассмотрев статьи [1 – 9] о калибровке цифровых камер, при выполнении которой определяют величину фокусного расстояния f , координаты главной точки x_0, y_0 и дисторсию, можно заключить, что с определением координат главной точки цифрового снимка и дисторсии проблем не возникает. Что касается определения фокусного расстояния, здесь не все однозначно. Речь порой идет о переменном фокусном расстоянии [10]. В работе [11] говорится об истинном фокусном расстоянии и эквивалентном. Авторы работы [5] предлагают фотографировать тест-объект с близкого расстояния (1,3...1,5 м), и сложно сказать, получим ли мы именно величину фокусного расстояния?

В паспортах цифровых камер указан диапазон фокусных расстояний. В ходе же калибровки будет определено одно фокусное расстояние. Но если в паспорте показан диапазон, то какое фокусное расстояние получают при калибровке, и какое фокусное расстояние будет применять пользователь? А если при другом фокусном расстоянии, не при том, которое было определено при калибровке, пользователь выполнит съемку, то получит неудовлетворительные по точности результаты, так как величина фокусного расстояния входит в формулы определения координат точек объекта. И встает вопрос, что же является фокусным расстоянием?

По определению [12; 13], фокусное расстояние f – это расстояние от задней главной точки объектива S' до заднего главного фокуса F' (рис. 1).

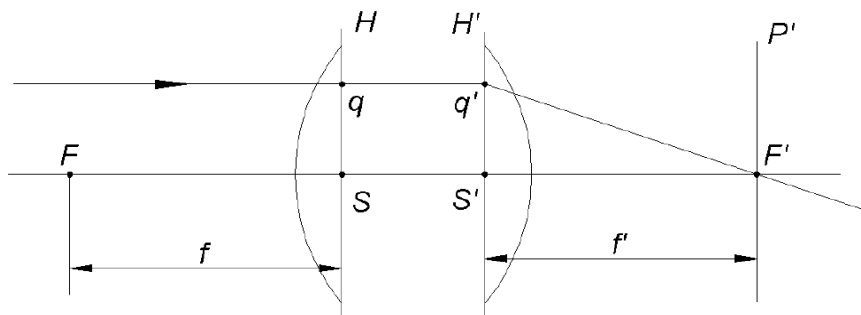


Рис. 1. Основные точки и плоскости сложного объектива

На рисунке 1 луч, идущий параллельно оптической оси, на выходе из системы пересекает оптическую ось в точке заднего главного фокуса F' . Расстояние от задней главной плоскости объектива H' до заднего главного фокуса F' является задним главным фокусным расстоянием f' ; P' – задняя фокальная плоскость объектива, эта плоскость, перпендикулярная оптической оси, проходящая через задний главный фокус F' [12; 13]. Если объект расположен на близком расстоянии от объектива, то его резкое изображение не будет находиться в фокальной плоскости объектива P' , т. е. на расстоянии равном фокусному. На рисунке 2 показано построение изображения идеальной оптической системой [12; 14]. Здесь AB – фотографируемый объект; $A'B'$ – его резкое изображение. Именно на этом месте и должна находиться ПЗС-матрица, т. е. на расстоянии a' от задней главной плоскости объектива. В оптике плоскости где находится объект AB и плоскость его резкого изображения $A'B'$ называют сопряженными плоскостями [13].

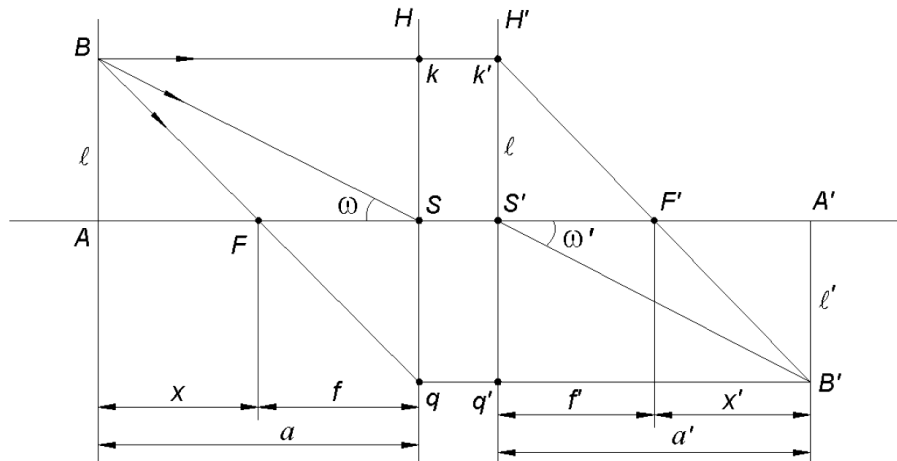


Рис. 2. Построение изображения идеальной оптической системой

В рассматриваемых статьях под фокусным расстоянием предполагают расстояние от задней узловой точки объектива S' до плоскости резкого изображения, т.е. расстояние a' (см. рис. 2), которое постоянно меняется в зависимости от расстояния до объекта. Или как отмечено в работе [12]: «Плоскостей изображения много, так как каждая плоскость предметов имеет сопряженную с ней плоскость изображения». Если объект находится на конечном расстоянии от точки S , то расстояние до сопряженной плоскости больше фокусного расстояния объектива [15]. Чем дальше находится объект, тем ближе к фокальной плоскости его резкое изображение, и с точками фокальной плоскости оптически сопряжены точки, находящиеся в бесконечности. О каком определении фокусного расстояния с близкого расстояния [5] можно говорить?

Так что в паспортах цифровых камер приводится не диапазон фокусных расстояний, а диапазон отрезков a' , в пределах которых может перемещаться ПЗС-матрица для получения резкого изображения. И как свидетельствует рисунок 2, наименьшее из этих расстояний будет фокусным.

В фотограмметрии применяют симметричные объективы, съемка ведется в воздушной среде, поэтому $f = f'$ [12]. Формула, выражающая условие получения резкого изображения, которое называют первым оптическим условием для таких объективов, имеет вид [11; 12; 14]:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

где a – расстояние от предмета до передней главной плоскости объектива; a' – расстояние от задней главной плоскости объектива до плоскости изображения; f – фокусное расстояние, или расстояние от задней главной точки объектива S' до заднего главного фокуса F' .

Согласно принятому в оптике правилу знаков величина a' имеет знак минус. С учетом этого формулу (1) можно записать следующим образом:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}. \quad (2)$$

Формулу (2) можно получить для принятых на рисунке 2 обозначений, решая подобные прямоугольные треугольники ABF и FSq , а также $k'S'F'$ и $F'A'B'$. Кроме того, эта же формула приведена в работах [15; 17; 18 и др.].

Теоретически с точками фокальной плоскости P' оптически сопряжены бесконечно удаленные точки. Практически же в этой плоскости будем иметь резкое изображение точек пространства, расположенных на конечном расстоянии от объектива. В оптике это расстояние a называется началом бесконечности, или гиперфокальным расстоянием [12 – 14; 16; 17]. На основании рисунка 3 приведем формулу определения начала бесконечности a при условии, что кружок нерезкости не превысит заранее установленной величины.

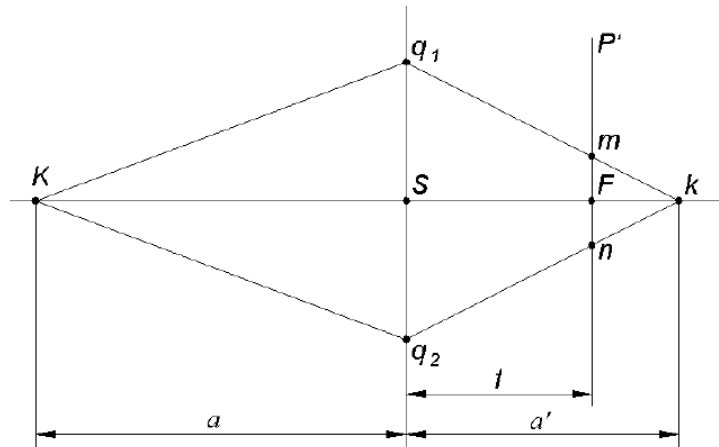


Рис. 3. Построение изображения пространства в фокальной плоскости

На рисунке 3 K – точка объекта; k – ее резкое изображение; P' – фокальная плоскость, где размещен светочувствительный материал, расстояние $q_1q_2 = d$ – диаметр входного отверстия объектива; $mn = \tau$ – кружок нерезкости или рассеяния [12].

Начало бесконечности a можно вычислить по формуле [14 – 17]:

$$a = \frac{d}{\tau} f. \quad (3)$$

В формуле (3) фокусным расстоянием будет минимальное значение из диапазона отрезков a' , в пределах которых может перемещаться ПЗС-матрица для получения резкого изображения.

В паспортах цифровых камер зачастую задают не диаметр входного отверстия объектива d , а относительное отверстие $\frac{1}{n_0}$, связанное с диаметром входного отверстия и фокусным расстоянием выражением [14; 16]:

$$\frac{1}{n_0} = \frac{d}{f}. \quad (4)$$

Относительное отверстие большинства объективов аэрокамер находится в пределах $1/4 \dots 1/9$, так как при других относительных отверстиях качество изображения снижается либо вследствие влияния aberrаций, либо дифракционных явлений [20]. Что касается цифровых камер, вопрос этот вряд ли исследовался.

Выразив из формулы (4) величину d и подставив ее в формулу (3), получим:

$$a = \frac{f^2}{n_0 \tau}. \quad (5)$$

На основании формулы (5) можно рассчитать минимальное расстояние от цифровой камеры до снимаемого тест-объекта в зависимости от того, при каком относительном отверстии $\frac{1}{n_0}$ предполагается

выполнять съемку и какой диаметр пятна рассеяния τ будет допущен. При большем отстоянии от объекта будет меньше кружок рассеяния. То есть при отстоянии от гиперфокального до бесконечности можно выполнять съемку.

Конструкция аэрофотоаппаратов жесткая, в отличие от бытовых цифровых камер. Фотографирование ведется с больших высот, поэтому фотопленка размещается в фокальной плоскости объектива, т.е. на расстоянии, равном фокусному, из того предположения, что пятно нерезкости не превысит заранее заданной величины. При конструировании аэрофотоаппаратов выполняют ряд требований, одно из них [19]: «Параметры оптической системы не должны изменяться» и порой, чтобы фокусное расстояние не изменялось, если надо обогреть объектив – его обогревают, надо охлаждать – охлаждают. В цифровых камерах, как отмечено в работе [4], в процессе съемки элементы внутреннего ориентирования цифровой камеры могут измениться ввиду нежесткого крепления объектива к корпусу камеры, а при переходе с точки на точку фокусное расстояние может измениться тем более.

Допустимая величина расфокусировки $\Delta f_{\text{доп}}$ может быть определена из условия допустимой величины нерезкости $\tau_{\text{доп}}$ изображения и вычислена по формуле [19]:

$$\Delta f_{\text{доп}} = n_0 \tau_{\text{доп}}, \quad (6)$$

где n_0 – знаменатель относительного отверстия объектива, или, как его порой называют, апертура.

Однако в некоторых случаях возникает необходимость съемки с близких расстояний. В принципе надо знать не фокусное расстояние, а расстояние от узловой точки объектива до светочувствительного материала, т.е. расстояние a' , и в этом случае съемку выполнять только с того расстояния, при котором определялись параметры камеры. Никаких «перефокусировок» делать нельзя, надо прилагать все усилия к тому, чтобы параметры камеры, определенные при калибровке, не менялись. В этом случае снимать желательно плоский объект. Точки предметов, отступающие от плоскости, будут образовывать в плоскости изображения кружки рассеяния [11]. Формула расчета кружка рассеяния имеет вид [12]:

$$\tau = \frac{f^2 \Delta h}{2x_n^2 n_0}, \quad (7)$$

где x_n – расстояние до плоскости наведения; Δh – расстояние между экстремальными точками объекта; f – фокусное расстояние объектива; τ – значение кружка рассеяния.

На основании формулы (7) можно рассчитать расстояние между экстремальными точками объекта, при котором изображение будет резким при заданном расстоянии до плоскости наведения.

Чтобы ни определяли при калибровке: фокусное расстояние f или отрезок a' , надо четко представлять, что определили, и к чему приведет невыполнение рассмотренных условий. В любом случае лучше съемку выполнять с расстояний больше гиперфокального, тем более что гиперфокальное расстояние не очень большое и калибровать камеру необходимо с расстояния больше гиперфокального, кроме случая, когда необходимо выполнять съемку с близких расстояний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устинович, Г.А. О применении неметрических цифровых камер для инженерно-геодезических измерений / Г.А. Устинович, Я.Г. Пошивайло // Геодезия и картография. – 2005. – № 8. – С. 19 – 24.
2. Никишин, Д.А. Методы и результаты калибровки малоформатных цифровых камер с трансфокатором / Д.А. Никишин // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2003. – № 4. – С. 100 – 107.
3. Юрченко, И.В. Разработка моделей и алгоритмов учета систематических искажений цифровых любительских снимков / И.В. Юрченко // Геодезия и картография. – 2004. – № 12. – С. 24 – 29.
4. Юрченко, В.И. Исследование моделей учета систематических искажений неметрических снимков с самокалибровкой / И.В. Юрченко // Геодезия и картография. – 2002. – № 8. – С. 32 – 37.
5. Гельман, Р.Н. Лабораторная калибровка цифровых камер с большой дисторсией / Р.Н. Гельман, А.Л. Дунц // Геодезия и картография. – 2002. – № 7. – С. 23 – 31.
6. Шатохин, А.Л. Исследование методов калибровки цифровой камеры / А.Л. Шатохин. – Донецк, 2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2003/ggeo/shatokhin/diss/index.htm>.
7. Гельман, Р.Н. Комбинированный способ калибровки цифровых камер / Р.Н. Гельман, А.Л. Дунц // Геодезия и картография. – 2005. – № 7. – С. 20 – 24.

8. Применение цифровых неметрических камер и лазерных сканеров для решения задач фотограмметрии / А.П. Михайлов [и др.]. – М., 2000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru>.
9. Гельман, Р.Н. Опыт использования цифровых камер при совместной аэрофотосъемке с аэрофотоаппаратом / Р.Н. Гельман, М.Ю. Никитин, А.Л. Дунц // Геодезия и картография. – 2006. – № 1. – С. 25 – 31.
10. Гельман, Р.Н. Обработка цифровых снимков с переменным фокусным расстоянием / Р.Н. Гельман, Н.Ю. Никитин, В.М. Горбатюк // Геодезия и картография. – 2006. – № 2. – С. 32 – 39.
11. Афанасенков, М.А. Разумно о фото / М.А. Афанасенков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.afanas.ru/video/photo.htm.
12. Мальцев, М.Д. Прикладная оптика и оптические измерения / М.Д. Мальцев, Г.А. Каракулина. – М.: Машиностроение, 1968. – 472 с.
13. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
14. Кучко, А.С. Аэрофотография и специальные аэрофотографические исследования / А.С. Кучко. – М.: Недра, 1988. – 235 с.
15. Лобанов, А.Н. Фотограмметрия / А.Н. Лобанов. – М.: Недра, 1984. – 551 с.
16. Савиных, В.П. Аэрокосмическая аэрофотосъемка / В.П. Савиных, А.С. Кучко, А.Ф. Стеценко. – М.: «Картгеоцентр» – «Геодиздат», 1997. – 378 с.
17. Бобир, Н.Я. Фотограмметрия / Н.Я. Бобир. – М.: «Недра», 1965. – 290 с.
18. Урмаев, Н.А. Элементы фотограмметрии / Н.А. Урмаев. – М.: Геодиздат, 1941. – 219 с.
19. Щербаков, Е.Я. Расчет и конструирование аэрофотоаппаратов / Е.Я. Щербаков. – М.: Машиностроение, 1979. – 464 с.
20. Лаврова, Н.П. Аэрофотосъемка / Н.П. Лаврова, А.Ф. Стеценко // Аэрофотосъемочное оборудование. – М.: Недра, 1981. – 296 с.

Поступила 08.11.2011

ABOUT VARIABLE FOCAL DISTANCE

A. MICHEEVA

Nowadays the industry produces a lot of non-metric numerical cameras. These cameras are not intended for photogrammetrical processing because they have great distortions. Moreover it is necessary to determine highly precise the elements of inner orientation for photogrammetrical processing: focal distance and coordinates of the main point. That is why the numeric cameras must be calibrated in order to obtain satisfactory results. There is a lot of calibration methods. It is particularly difficult to define the focal distance of the numerical camera. Not all authors of the articles understand correctly what the focal distance is. Not in all of the articles the optical conditions which must be fulfilled are taken into consideration. In the present paper the lens parameters accepted in optics are given and the demands to be fulfilled in order to get high-quality materials are listed.