

УДК 535.015

Метод геометрической калибровки оптико-электронных систем на основе электронного тест-объекта

Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 08.10.2017

Принята к печати 14.11.2017

При проектировании устройств для дистанционного зондирования Земли большое внимание уделяется оценке уровня дисторсии объективов и обеспечения требуемых значений точности при геометрической калибровке оптико-электронных систем в целом. Среди существующих средств, предназначенных для геометрической калибровки оптических систем, наибольшее распространение получили тест-объекты. Целью проводимых исследований являлось создание метода автоматического расчета поправочных коэффициентов дисторсии, а также обеспечение точности в процессе измерения на уровне 3 мкм.

Предложен метод проведения геометрической калибровки элементов внутреннего ориентирования оптической системы на основе электронного тест-объекта. Представлен расчет яркостного изображения строки теста из его многоспектрального изображения и определение положения экстремумов фильтрованного сигнала. Показано соотношение между величиной дисторсии и заданными значениями центра интервала. Рассмотрены три варианта электронных тест-объектов с различным шагом и размером элементов. Установлено, что оптимальным является калибровочный элемент размером 3×3 пикселя, это обусловлено формой субпикселей, имеющих соотношение сторон излучающих площадок примерно 1 : 3. В качестве шаблона для построения электронного тест-объекта целесообразно использовать *IPS* матрицы. Представлена функциональная схема экспериментального контрольно-измерительного стенда на базе коллиматора и оптической скамьи ОСК-2ЦЛ. Установлено, что тест-объекты с шагом сетки 4 и 8 пикселей не могут обеспечить изображение, удовлетворяющее требованиям качества и разрешения в связи с неколлимированным излучением активных площадок и рассеянием на оптических поверхностях – существенно нарушается форма элементов. Для анализа величины дисторсии наилучшим образом подходят тест-объекты с шагом сетки 12 пикселей.

Представлены графики зависимости приращения координат от номера элемента для двух фотографических объективов *Canon* серии *EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM* и *EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II*. Проведены расчет значений и оценка величины дисторсии в краевых зонах, которая соответственно составила 43 мкм и 51,6 мкм. Описана методика и алгоритм программной реализации. Указаны возможные направления развития метода.

Ключевые слова: дисторсия, дистанционное зондирование Земли, экспериментальный стенд, электронный тест-объект, оптико-электронная система.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

Адрес для переписки:

Фёдорцев Р.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: feod@tut.by

Address for correspondence:

Fiodortcev R.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: feod@tut.by

Для цитирования:

Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В.
Метод геометрической калибровки оптико-электронных систем на основе электронного тест-объекта.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 4. С. 374–385.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

For citation:

Kozhevnikov D.A., Fiodortcev R.V.
[The method of geometric calibration of optoelectronic systems based on electronic test object].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 4, pp. 374–385 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

The method of geometric calibration of optoelectronic systems based on electronic test object

Kozhevnikov D.A., Feodortsau R.V.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 08.10.2017

Accepted for publication 14.11.2017

Abstract

Designing remote sensing of the Earth devices is requires a lot of attention to evaluation lens distortion level and providing the required accuracy values of geometric calibration of optoelectronic systems at all. Test-objects known as most common tools for optical systems geometric calibration. The purpose of the research was creating an automatically method of distortion correction coefficients calculating with a 3 μm precision in the measurement process. The method of geometric calibration of the internal orientation elements of the optical system based on the electronic test object is proposed. The calculation of the test string brightness image from its multispectral image and filtered signal extrema position determination are presented. Ratio of magnitude of the distortion and interval center is given. Three variants of electronic test-objects with different step and element size are considered. Optimal size of calibration element was defined as 3 \times 3 pixels due to shape of the subpixels with the aspect ratio of the radiating areas about 1 : 3. It is advisable to use IPS as an electronic test object template. An experimental test and measurement stand functional diagram based on the collimator and optical bench «OSK-2CL» is showed. It was determined that test objects with a grid spacing of 4 and 8 pixels can't provide tolerable image because of non-collimated emission of active sites and scattering on optical surfaces – the shape of the elements is substantially disrupted. Test-object with a 12 pixels grid spacing was used to distortion level analyzing as most suitable.

Ratio of coordinate increment and element number graphs for two photographic lenses (Canon EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM and EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II) are presented. A calculation of the distortion values in edge zones was held, which were respectively 43 μm and 51.6 μm . The technique and algorithm of software implementation is described. Possible directions of the method development are mentioned.

Keywords: distortion, remote sensing of the Earth, an experimental stand, an electronic test object, optoelectronic system.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

Адрес для переписки:

Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: feod@tut.by

Address for correspondence:

Fiodortcev R.V.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: feod@tut.by

Для цитирования:

Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В.

Метод геометрической калибровки оптико-электронных систем на основе электронного тест-объекта.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 4. С. 374–385.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

For citation:

Kozhevnikov D.A., Fiodortcev R.V.

[The method of geometric calibration of optoelectronic systems based on electronic test object].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 4, pp. 374–385 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

Введение

При разработке оптических узлов космических аппаратов необходимо с повышенным вниманием относиться к ошибкам, вызванным дисторсией объективов регистрирующих систем, смещение изображения в плоскости приемника для современных систем составляет порядка 8–12 мкм. В связи с представлением дисторсии как одной из главных aberrаций оптической системы, предназначенной для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), исправление данной aberrации требует повышенных значений точности при геометрической калибровке оптико-электронных приборов (ОЭП).

При проектировании оптических систем ДЗЗ одним из важнейших параметров является точность получения обрабатываемой информации. В настоящее время известно большое количество методов оценки точности геометрической калибровки* [1–5]. Методы отличаются используемым оптическим и механическим оборудованием, видом и формой тест-объектов (ТО), математическими моделями расчета и аппроксимации значений, полученных при проведении измерений. Главным различием методов геометрической калибровки можно назвать способ формирования векторов с известной пространственной ориентацией, задание и определение которой и является основной задачей калибровки. Ее сущность заключается в получении калибровочных коэффициентов, учитывающих влияние всех систематических искажений, существующих при реальной фотосъемке. Среди существующих средств, предназначенных для геометрической калибровки оптических систем, наибольшее распространение получили тест-объекты. Одним из классических методов измерения считается горный полигон, большие перепады высот которого помогают проводить калибровку с высокой точностью. К безусловным недостаткам таких полигонов относится привязка к рельефу местности и невозможность обустройства подобного полигона в рамках границ Республики Беларусь, из чего следует распространенность использования ТО в лабораторных условиях.

При выборе метода изготовления тест-объектов основополагающими параметрами являются конечная точность калибровочных элементов

*ISO 17850:2015-07 (E) Photography – Digital cameras – Geometric distortion (GD) measurements

и стоимость изготовления. Одними из самых экономичных методов являются электрографическая (лазерная) и светодиодная печать на принтере, обеспечивающие точность до 5 % и 3 % соответственно. Дальнейшее повышение точности возможно посредством применения метода лазерной гравировки, при котором точность позиционирования лазерного луча находится в пределах 5–10 мкм и который обеспечивает высокую стабильность размеров на полотнах из латуни, алюминии или стали. Самой распространенной технологией создания ТО является литография на стеклянных подложках, что позволяет строить оптические схемы в проходящем свете.

Внедрение новых технологий и автоматизации процессов расчета и обработки данных позволяет существенно снизить материальные и временные ресурсы, связанные с геометрической калибровкой элементов внутреннего ориентирования.

Целью проводимых исследований являлось создание метода автоматического расчета поправочных коэффициентов дисторсии, а также обеспечение точности в процессе измерения на уровне 3 мкм, которая определялась главным образом точностью используемого экспериментального измерительного оборудования.

Геометрическая калибровка

Для электронного ТО необходимы ПЗС-матрицы с большим числом элементов и высокими стабильными выходными техническими характеристиками. Выполнять сканирование тест-объекта следует на максимальном физическом разрешении исследуемой фотографической оптической системы, чем обусловлено требование к размерам калибровочных элементов (для современных систем ДЗЗ $\psi \approx 0,1''$). После получения сканированного изображения тест-объекта необходимо определить координаты по оси x для вертикальных линий в пикселях. Методика определения координат центров вертикальных линий теста основана на алгоритме оценки временного положения детерминированного сигнала на фоне аддитивного гауссовского шума [5]. Расчет состоит из нескольких этапов [6].

Расчет яркостного изображения строки теста из его многоспектрального изображения:

$$S_y(x) = \sum_{r=0}^{nRad-1} S_r(x), \quad (1)$$

где $S_Y(x)$ – яркостное изображение строки теста; $S_r(x)$ – спектральные компоненты; $nRad$ – количество спектральных компонент.

Применение к яркостному изображению согласованного фильтра с формой $K(x)$ импульса вертикальной полосы:

$$S_{YF}(\tau) = \sum_x S_Y(x)K(x - \tau), \quad (2)$$

где $S_{YF}(\tau)$ – яркостное изображение строки теста с фильтром; τ – смещение по координате x .

Определение положения экстремумов фильтрованного сигнала изображения XM , соответствующие вертикальным линиям теста:

$$XM = \max_{\tau} S_{YF}(\tau), \quad (3)$$

где XM – относительные координаты линия теста.

Оценка кривой дисторсии происходит по следующим положениям.

Расчет графика дисторсии, как разности между положениями вертикальных линий, отстоящих между собой на расстоянии y :

$$y'(i) = XM_{i+y} - XM_i, \quad (4)$$

где y' – расстояние между проекциями линий тест-объекта в плоскости изображения, y – расстояние между линиями на тесте (рисунок 1). Расстояние между линиями в плоскости предмета и плоскости изображения не сохраняется вследствие присутствия в оптической системе дисторсии.

Значение $y'(i)$ присваивается линии $Coord(i)$, соответствующей центру интервала (4).

$$Coord(i) = XM_i + y/2. \quad (5)$$

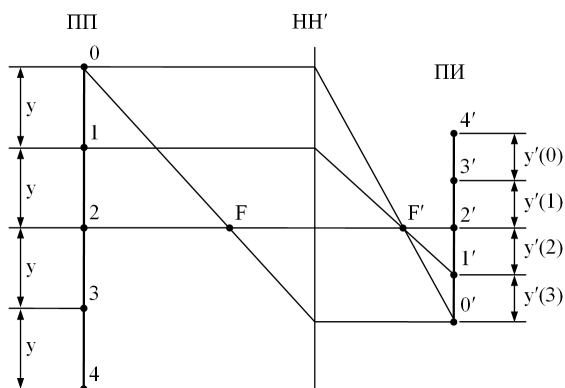


Рисунок 1 – Плоскость предмета (ПП) и плоскость изображений (ПИ) оптической системы

Figure 1 – The plane of the object (OP) and the image plane (IP) of the optical system

Далее необходимо произвести выбор полинома для обработки данных. Наиболее часто искажения описываются полиномами Эбнера, Якобсона, Грюна, Брауна и др. [5]. При значительном количестве разнообразных полиномов для задач настоящего исследования подходит один, базирующийся на методе – интегральная систематическая ошибка dx, dy , описываемая полиномом, представлена как сумма членов отдельных систематических искажений (дисторсии, деформации и т.д.) [7]:

$$\begin{aligned} \delta x = & a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7xy^2 + \\ & + \frac{x}{c(c_1x^2 + c_2xy + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3)} + \\ & + x(k_1r^2 + k_1r^4 + k_3r^6) + P_1(y^2 + 3x^2) + 2P_2xy + \delta x_p + \left(\frac{x}{c}\right)\delta c; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta y = & b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^2y + b_7xy^2 + \\ & + \frac{y}{c(c_1x^2 + c_2xy + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3)} + \\ & + x(k_1r^2 + k_1r^4 + k_3r^6) + 2P_2(x^2 + 3y^2) + 2P_1xy + \delta y_p + \left(\frac{x}{c}\right)\delta c, \end{aligned}$$

где $a_1, \dots, a_7, b_1, \dots, b_7$ – коэффициенты, учитывающие некомпенсируемую деформацию и аномальную деформацию; c_1, \dots, c_7 – коэффициенты, учитывающие кривизну и неплоскостность пластины; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, учитывающие радиальную дисторсию; P_1, P_2 – коэффициенты, учитывающие нецентрированную дисторсию.

Обсуждения вопроса по выбору предпочтительной длины полинома включают в себя попытку соотнести два основных качества, исходящих из выбора длины полинома. С одной стороны, увеличение количества членов полинома детализирует описание систематических искажений, с другой стороны, ухудшается обусловленность матрицы нормальных уравнений, повышается загрузка памяти ЭВМ. Очевидно, что существуют определенные пределы количества членов полинома, обусловленные исходными материалами, а также быстродействием и объемом памяти ЭВМ. Поэтому длина и вид полинома могут изменяться для различных исходных данных [8].

Разработка структуры тест-объекта

К ТО предъявляются множество требований по точности и структурированности. Для оценки дисторсии самым показательным является ТО в виде сетки, так как искажения линий на-

глядно демонстрируют относительную величину и функцию распределения дисторсии, однако из соображений удобства программной оценки коэффициентов выгоднее использовать не фор-

мальные пересечения линий, а материальные точки. В общем массиве элементов ТО (рисунок 2) следует выделить два: центральное перекрестие и центральную точку.

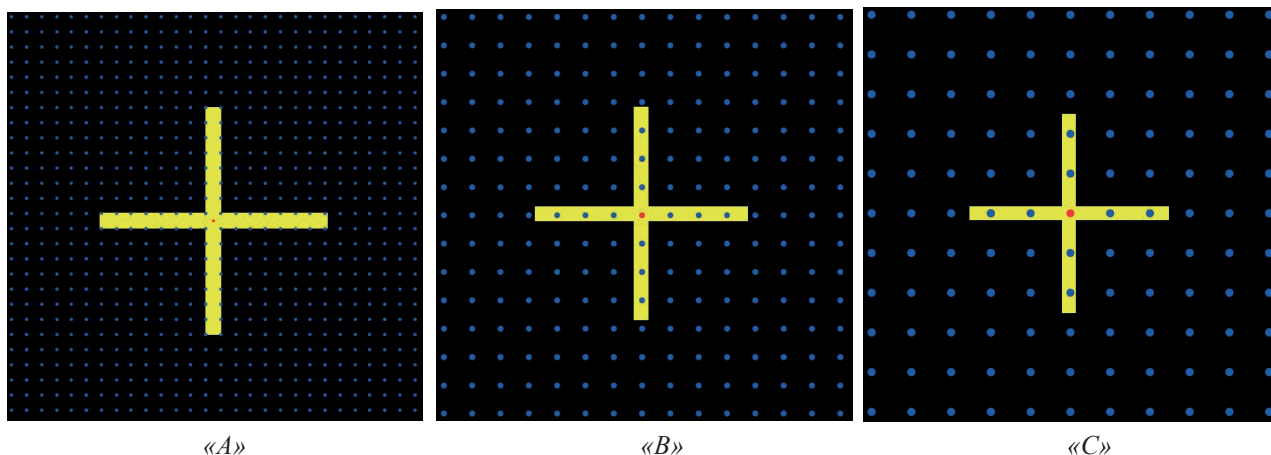


Рисунок 2 – Центральные сегменты разработанных тест-объектов с шагом сетки: «А» – 4 пикс; «В» – 8 пикс; «С» – 12 пикс

Figure 2 – Central segments of developed test-objects with a grid spacing: «А» – 4 pix; «В» – 8 pix; «С» – 12 pix

Функции указанных элементов заключаются в следующем: центральное перекрестие призвано обеспечить точное центрирование систем на начальном этапе юстировки, а центральная точка призвана выступать базисом при программном расчете. При этом важно учесть хроматическую определенность используемых в расчете объектов. Одним из простых способов учета может быть задание отдельных функциональных групп разными цветами. Так, не участвующее в расчетных операциях центральное перекрестие при задании отличным цветом просто не войдет в массив всех точек, определенный алгоритмом, а при задании центральной точки третьим цветом значительно упростится поиск базового элемента всего массива.

На рисунке 2 представлены сегменты разработанных тест-объектов с различными геометрическими параметрами (таблица 1), главным различием которых является шаг сетки – параметр, отвечающий за расстояние между точечными элементами ТО.

Выбор значения данного параметра представляет из себя поиск компромисса между точностью преобразования рабочих снимков системы и трудозатратами при расчете поправочных коэффициентов: чем меньше шаг сетки, тем больше калибруемых элементов возможно получить и тем точнее преобразование, при этом происходит значительное увеличение требуемых временных

и мощностных ресурсов ЭВМ. Также при превышении порогового значения «кучности» элементов возможно проявление влияния дифракции и превращение сетки элементов в однообразный фон, неразличимый для программного обеспечения. Таким образом, для проверки было выбрано три соотношения шага сетки и размера элемента.

Для хроматической дифференциации функциональных элементов было решено использовать следующую схему: синие калибровочные элементы на черном фоне, желтое центральное перекрестие и красная центральная точка.

Наиболее оптимальным размером калибровочного элемента является 3×3 пикс, это обусловлено формой субпикселей – соотношение сторон излучающих площадок примерно равно $1 : 3$, поэтому фигура 3×3 пикс максимально приближена к квадрату.

В создании экспериментального образца не представляется возможным использование специально разработанных деталей и узлов, дорогостоящих покупных комплектующих. В связи с этим собственная точность и точность позиционирования элементов экспериментального стенда априори ниже тех же параметров стенда рабочего.

Из всего вышесказанного следует справедливость жестких требований к элементам разрабатываемого стенда, которые можно разделить на следующие типы: оптические, электронные, оп-

Таблица 1 / Table 1

Параметры трех вариантов тест-объектов
Parameters of three variants of test objects

Наименование параметра Parameter name	Тест-объект «А» Test object «A»	Тест-объект «В» Test object «B»	Тест-объект «С» Test object «C»
Разрешение, пикс Resolution, pix	1920 × 1200	1920 × 1200	1920 × 1200
Ширина центрального перекрестья, пикс Width of central crosshair, pix	75 × 75	75 × 75	75 × 75
Толщина линий центрального перекрестья, пикс The thickness of the lines of the central crosshair, pix	5	5	5
Шаг сетки элементов, пикс Step grid elements, pix	4	8	12
Размер элементов, пикс size of elements, pix	1 × 1	2 × 2	3 × 3
Цвет центрального перекрестья, RGB Color of the central crosshair, RGB	255; 255; 0	255; 255; 0	255; 255; 0
Цвет калибровочных элементов (центрального элемента), RGB* Color of calibration elements (central element), RGB*	0; 0; 255 (255; 0; 0)	0; 0; 255 (255; 0; 0)	0; 0; 255 (255; 0; 0)

* коды в системе RGB: 255; 255; 0 – желтый; 0; 0; 255 – синий; 255; 0; 0 – красный

* codes in the RGB system: 255; 255; 0 – yellow; 0; 0; 255 – blue; 255; 0; 0 – red

тико-электронные, механические. В качестве электронного тест-объекта используется IPS матрица, параметры которой представлены в таблице 2. Выбор технологии IPS обусловлен формой субпикселей (максимальное приближение к правильным равносторонним фигурам) и малыми, относительно других технологий (*PenTile*, *RealStripe* и др.), промежутками между активными площадками.

Согласно функции Эйри (прямая зависимость размера пятна рассеяния от длины волны излучения) рациональным будет использование элементов ТО синего цвета, однако многие ОЭП на установках ДЗЗ работают в инфракрасном спектральном диапазоне; для таких приборов требуется использование специальных излучающих матриц и разработка специальных ТО. В настоящей работе разработка метода проводилась на основе ОЭП, работающего в видимом диапазоне.

В качестве системы регистрации был выбран фотоаппарат *CANON EOS 60D* со встроенным приемником в виде сенсора модели *APS-C CMOS*, технические характеристики которого представ-

Таблица 2 / Table 2

Основные технические характеристики используемых матриц
The main technical characteristics of the matrices used

Наименование параметра Parameter name	Тип матрицы Type of matrix	
	IPS	APS-C CMOS
Диагональ активной площадки, мм Active site diagonal, mm	609,6	26,81
Разрешение, пикс Resolution, pix	1920 × 1080	5184 × 3456
Размер активных элементов, мкм Size of active elements, μm	70 × 24	4,3 × 4,3
Чувствительность (яркость) Sensitivity (brightness)	20..340 кд/м ² cd/m ²	100..6400 ISO
Тип фильтра Type of filter	RGB	RGBG
Динамический диапазон, evs Dynamic Range, evs	8,5	11,5

лены в таблице 2 [9], а в качестве тестируемых систем – фотообъективы *CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM* [10] и *CANON EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II* [11].

Выбор данной системы обусловлен следующими положениями:

1. Невозможность использования промышленных образцов высокоточных оптико-электронных приборов (ОЭП).

2. Необходимость минимизации погрешностей ориентации тестируемой оптической системы и приемного сенсора с возможностью замены тестируемых оптических систем (ОС) при сохранении допусков отклонений.

3. Возможность получения изображений без автоматического редактирования и цветокоррекции (формат *RAW*).

Использование двух объективов обусловлено возможностью относительной оценки чувствительности разрабатываемого метода – объективы со схожими параметрами одного производителя, при этом один из них (*CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM*) позиционируется как усовершенствованный – производитель заявляет о снижении влияния дисторсии за счет использования асферических элементов в оптической схеме (рисунок 3).

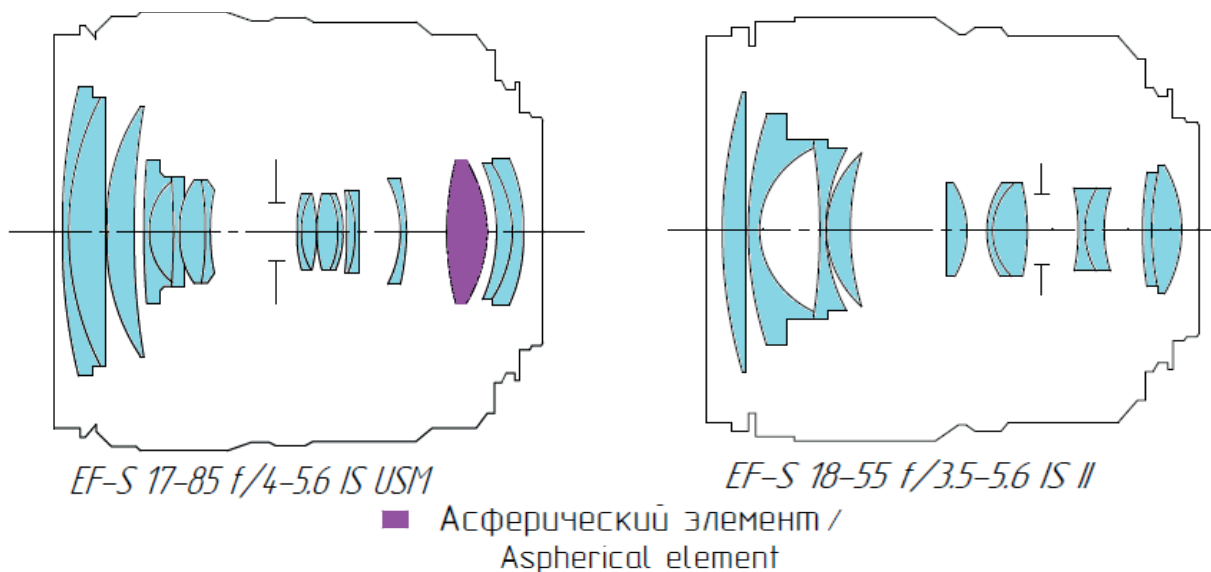


Рисунок 3 – Оптические системы фотообъективов *CANON EF-S: 17-85 f/4-5.6 IS USM* (слева) [10] и *18-55 f/3.5-5.6 IS II* (справа) [11]

Figure 3 – Optical systems of photographic lenses *CANON EF-S: 17-85 f/4-5.6 IS USM* (left) [10] and *18-55 /3.5-5.6 IS II* (right) [11]

В ходе юстировки экспериментального и рабочего стендов (рисунок 4) также необходимо предусмотреть метод компенсации непараллельности тестируемого ОЭП и тест-объекта.

Экспериментальный макет был собран на базе оптической скамьи ОСК-2ЦЛ, включающей коллиматор (АЛ2.766.047, предел разрешения $\psi \approx 0,96''$, фокусное расстояние $f' = 1600$ мм); столик с одним микрометрическим перемещением (АЛ6.124.086) для регистрирующей системы (РС); столик поворотный (АЛ6.124.084) для установки и юстировки положения ТО (погрешность отсчета 1'); РС в виде профессиональной цифровой камеры *CANON EOS 60D* [9]; исследуемая оптическая система в виде фотообъектива [10–11]; автоколлимационный окуляр с куб-призмой; материальный ТО (перекрестие в авто-

коллимационном окуляре) [12] для первичной юстировки регистрирующей системы; электронный ТО (*IPS*-матрица, планшет *Nexus 7*, таблица 2) для измерения дисторсии объектива; высокоточная плоскопараллельная пластинка ($N = 0,5$; $\Delta N = 0,05$; допуск на параллельность порядка 3") для выставления плоскостности по автоколлимационному блику; подключенный к РС системный блок компьютера для проведения юстировки и измерений.

Проведение измерений

Перед началом измерений осуществлялась первичная юстировка цифровой камеры относительно коллиматора и последующая окончательная юстировка электронного ТО относительно коллиматора и цифровой камеры.

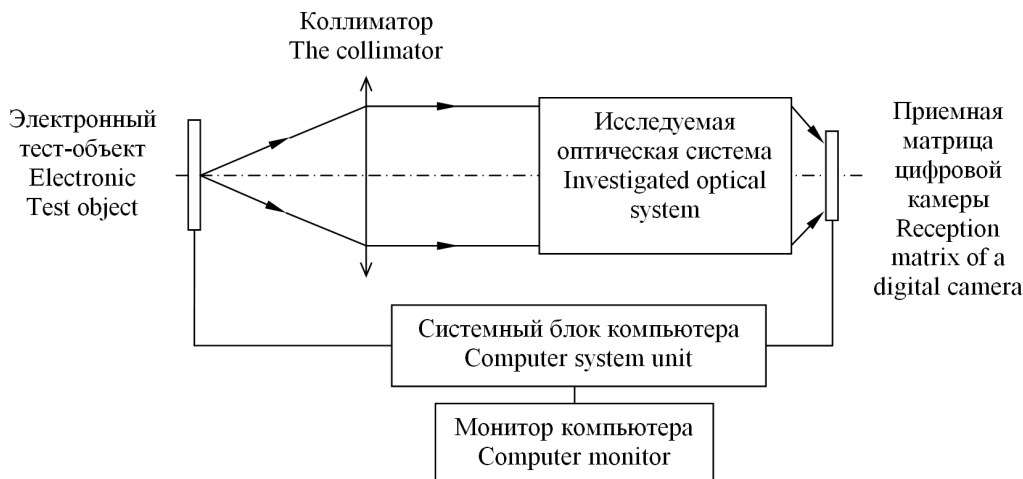


Рисунок 4 – Функциональная схема экспериментального стенда

Figure 4 – Functional diagram of the experimental stand

Первоначально осуществляется юстировка положения фотоаппарата с объективом, установленного на двух координатном столике, относительно коллиматора с автоколлимационным окуляром. На втором этапе вместо автоколлимационного окуляра в фокусе коллиматора устанавливается электронный ТО, ориентация которого производится по формируемому фотоаппаратом изображению (трансляция изображения на внешний монитор позволила добиться точности центрирования порядка 2 пикс). После проведения фотографирования была осуществлена замена объектива первой модели на вторую и весь процесс измерения был повторен. Таким образом было получено изображение ТО в плоскости фотоприемника РС (рисунок 5).

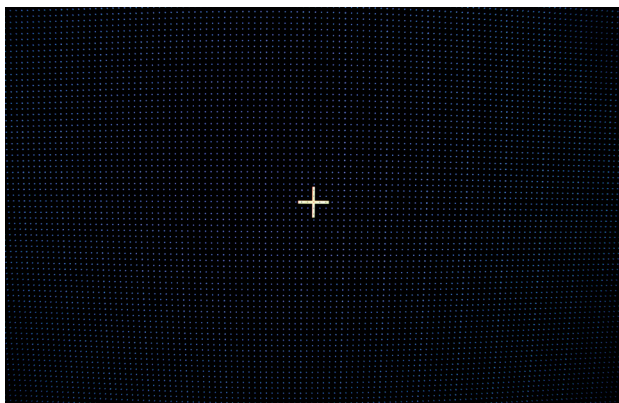


Рисунок 5 – Изображение тест-объекта «С», полученное с объектива CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM размерностью 22,3 × 14,9 мм

Figure 5 – The image of the test object «C», received from the lens CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM dimensionality 22.3 × 14.9 mm

В связи с неколлимированным излучением активных площадок и рассеянием на оптиче-

ских поверхностях ТО с шагом сетки 4 и 8 пикс не могут обеспечить изображение, удовлетворяющее требованиям качества и разрешения – нарушается форма элементов, имеется значительное рассеяние (рисунок 6). Из этого следует, что анализировать имеет смысл лишь изображение ТО «С» с шагом сетки 12 пикс.

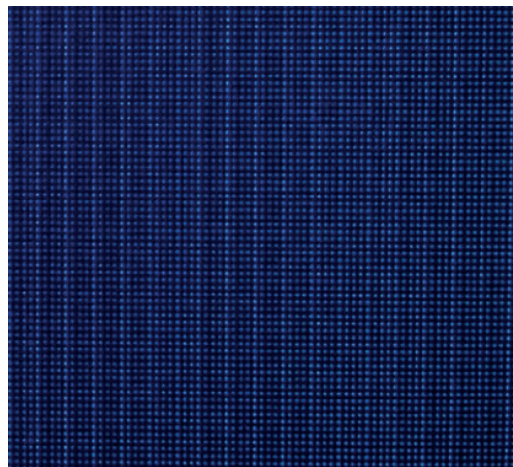


Рисунок 6 – Фрагмент изображения тест-объекта «А», полученный с объектива CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM размерностью 1/6 кадра (3,7 × 2,5 мм)

Figure 6 – Fragment of the image of the test object «A», received from the lens CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM dimensionality 1/6 of the frame (3.7 × 2.5 mm)

Из визуального анализа изображения на рисунке 5 становится очевидной положительная дисторсия в краевой зоне. Для оценки адекватности исполнения задачи кодом необходимо иметь сверочные данные по результатам измерения. Для этого проведем анализ полученного изображения в одной из сред графического моделирования

(Adobe Photoshop). В заложенных функциях присутствует операция измерения расстояния между двумя заданными точками в различных единицах (мм, пикс.). Выделим одно направление из центра изображения, соответствующее половинной диагонали (рисунок 7), так как максимальное значение дисторсии будет наблюдаться в углах (вызвано соотношением освещения матрицы оптической системой, наибольший угол ω' приходится на край вписанного прямоугольника). Определив координаты калибровочных элементов, лежащих на вышеуказанном отрезке, рассчитаем относительную разницу координат.

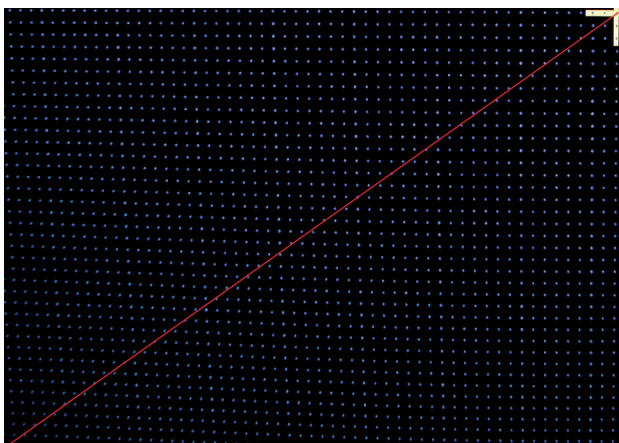


Рисунок 7 – Половинная диагональ формируемого изображения «С»

Figure 7 – Half of the diagonal of the formed image «C»

По полученным данным можно определить увеличение приращения координат элементов формируемого изображения (ФИ) с приближением к центру изображения – свидетельство наличия отрицательной («бочкообразной») дисторсии. В это же время флуктуация значений координат ТО обусловлена ошибкой оператора и периодической накапливаемой погрешностью, вызванной ориентацией сетки элементов (диагональ находится в иррациональной зависимости от декартовой системы координат). На основании полученных для 35 калибровочных элементов данных построены графики зависимости приращения координат от номера элемента (рисунок 8) с вычетом очевидных ошибок (очевидными считаются промахи с отличием от среднего значения в области больше 3 пикс, что обусловлено отклонениями $\pm 1,5$ пикс для основного массива результатов). Из этих графиков прослеживается достаточно линейное снижение влияния дисторсии на изображения с удалением от краевой зоны. Так же можно подтвердить заявления изготовите-

ля о сниженном значении дисторсии в объективе CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM (рисунок 8a).

Проведя перерасчет значений дисторсии в метрическую систему получим данные для двух объективов. Так, для объектива «А» максимальное значение смещения изображения вследствие дисторсии равно 43 мкм, а для объектива «В» – 51,6 мкм.

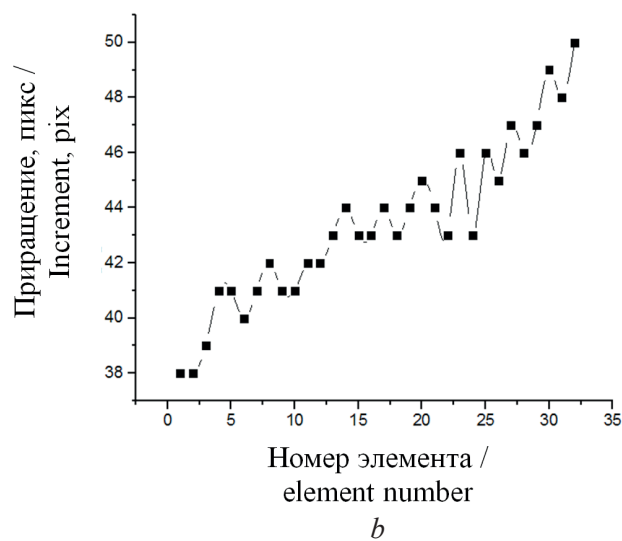
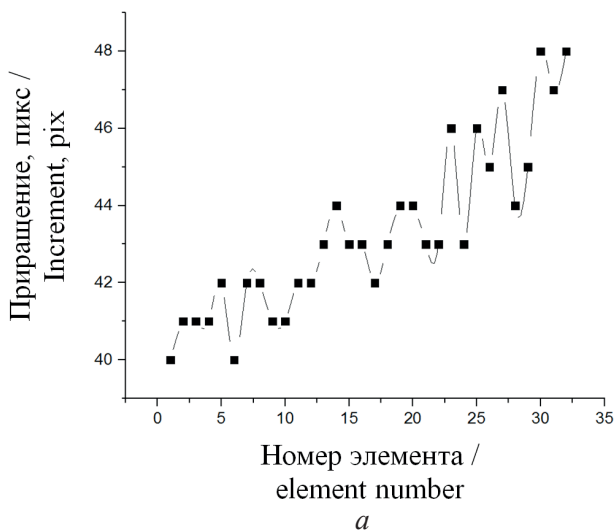


Рисунок 8 – Графики зависимости приращения координат от номера элемента для двух объективов: а – CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM; б – CANON EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II

Figure 8 – Graphs of the dependence of the increment of coordinates on the element number for two lenses: а – CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM; б – CANON EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II

Программная реализация

При создании алгоритма проведения расчета калибровочных коэффициентов, необходимо учесть следующие допущения:

– распределение пикселей и субпикселей по площади матрицы является равномерным;
– форму калибровочных элементов считать квадратом;

– величина децентричности и взаимной непараллельности ТО и ОС считается пренебрежительно малой и не влияет на точность измерений.

С учетом указанных допущений предлагается следующий алгоритм программной реализации метода, визуальное представление которого приведено на рисунке 9:

1. Получение ФИ:

1.1 Фотографирование ТО исследуемым ОЭП;

1.2 Перенос и сохранение данных ФИ в памяти ЭВМ.

2. Декодирование исходного изображения (ИИ) на цифровой массив интенсивностей в *RGB* канале.

3. Задание центра координат для матрицы ФИ элементом (255, 0, 0) (красная точка).

4. Сканирование всех элементов ФИ по осям *x*, *y* с критерием поиска элементов от #000050 (0, 0, 80) до #0000FF (0, 0, 255).

5. Анализ массива значений интенсивности для определения кучностей активных элементов матрицы.

6. Получение набора точек *P* с известными координатами в системе *i;j* (ФИ).

7. Для каждой точки расчет значений радиус-вектора относительно центра оси (точка *p*(0,0)).

8. Задание центра координат для матрицы ФИ элементом (255, 0, 0).

9. Анализ ИИ и получение набора точек *P'* с известными координатами в системе *I;J* (ИИ), построение радиусов векторов относительно *p*(0,0).

10. Приведение данных ИИ и ФИ к одному разрешению. Пропорционально сжать/расширить ИИ до ФИ по точкам, лежащим вблизи центра оси координат.

11. Получение набора точек *P'* с известными координатами в системе *I;J* (ИИ).

12. Для каждой точки расчет значений радиус-вектора от центра оси.

13. Сравнение радиус-вектора элементов, существующих для ИИ и ФИ (ФИ является изображением некоторой части ИИ \geq не для каждой *P* существует *P'*).

14. Перевод разницы длин радиус-векторов в метрическую систему в зависимости от параметров матрицы.

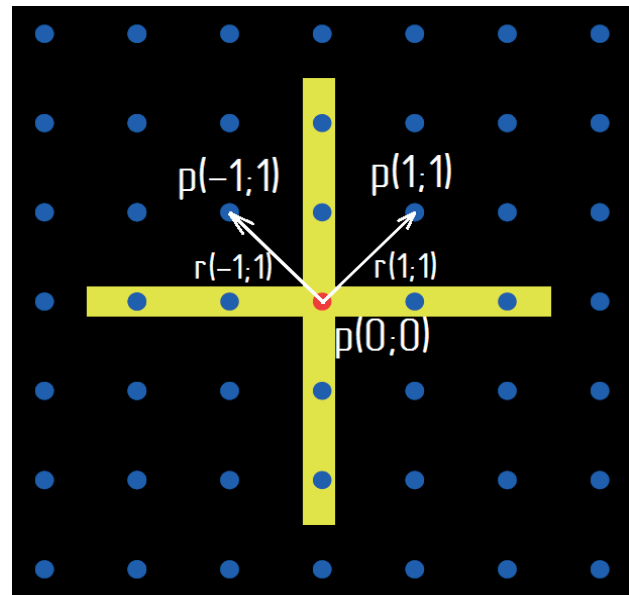


Рисунок 9 – Модель определения координат калибровочных элементов: *p*(0;0) – центр координат; *p*(-1;1) и *p*(1;1) – точки калибровочных элементов в плоскости приемной матрицы; *r*(-1;1) и *r*(1;1) – радиус-векторы, соединяющие точки с центром координат

Figure 9 – Model for determining the coordinates of the calibration elements: *p*(0;0) – center of coordinates; *p*(-1;1) and *p*(1;1) – the points of the calibration elements in the plane of the receiving matrix; *r*(-1;1) and *r*(1;1) – radius-vector connecting points with the center of coordinates

15. Вывод полученных данных через интерфейс программы для анализа оператором.

При программной реализации алгоритма целесообразно составить структуру (тело) кода из отдельных элементарных функций, которые представлены в большом числе специальных библиотек. На этом этапе следует определиться с языком программирования. После анализа самых распространенных языков было установлено, что больше других для решения данной задачи подходит «C++», так как работа с изображениями происходит посредством типовых функций, а библиотеки кодов подробны и доступны.

Таким образом, следует разбить алгоритм на типовые функции и выполнить их поиск:

- 1) определение координат пикселей по цвету;
- 2) определение длин радиус-векторов;
- 3) сравнение (расчет разности) длин радиус-векторов соответствующих элементов ТО и полученного изображения;
- 4) определение значения дисторсии исходя из геометрических параметров матрицы *PC*.

Серьезной проблемой видится совмещение разных блоков кода под одни параметры, так как высокая степень совмещения необходима для минимизации риска ошибки. Второй главной проблемой является быстроедействие – необходимо оценить 20 млн элементов, при этом параллельно выполнять действия над уже найденными.

В ходе поиска в онлайн-библиотеках были определены требуемые блоки кода, однако при совмещении переменных и попытках запуска была выявлена нестабильность результатов, при этом быстроедействие процессов являлась крайне низкой (не более 30 пикс/с, что при общем среднем объеме в 20 млн пикселей никаким образом не соответствует требованиям оперативности проведения измерений. В связи с этим становится очевидной необходимость пересмотра логики участка кода, отвечающего за определение координат пикселей искомого цвета, так как на эту операцию затрачивается основная часть времени. Оптимизация кода и расширение его функционала (учет децетрировки и непараллельности, реальной формы калибровочных элементов) видится авторам перспективным направлением дальнейшей работы.

Заключение

Предложен метод геометрической калибровки оптико-электронных приборов, главными преимуществами которого являются высокая степень автоматизации процесса, универсальность и адаптивность применительно к исследуемым объектам, достигаемая за счет введения большого числа поправочных коэффициентов по всей плоскости изображения.

Достоинством метода является также возможность проведения ряда измерений с динамически изменяющимся рисунком тест-объекта и оценки предельного уровня контраста.

Разработана функциональная схема экспериментального контрольно-измерительного стенда на базе коллиматора и оптической скамьи ОСК-2ЦЛ. В ходе проведения измерений установлено, что тест-объекты с шагом сетки 4 и 8 пикс не могут обеспечить изображение удовлетворяющее требованиям качества и разрешения в связи с неколлимированным излучением активных площадок и рассеянием на оптических поверхностях – существенно нарушается форма элементов. Для анализа величины дисторсии наилучшим образом подходят тест-объекты с шагом сетки 12 пикс.

Для двух фотографических объективов Canon серии EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM и EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II проведен расчет значений и оценка величины дисторсии в краевых зонах, которая соответственно составила 43 мкм и 51,6 мкм.

Разработан алгоритм программной реализации автоматического вывода поправочных коэффициентов. Задано направление развития метода, включающее оптимизацию программного обеспечения и дополнение его новыми функциями.

Список использованных источников

1. Cramer, M. EUROSDR network on digital camera calibration / M. Cramer // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2004. – Vol. 35, Part B6. – P. 204–209.
2. Schuster, R. Calibration of the ADS40 airborne digital sensor / R. Schuster, B. Braunecker // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2000. – Vol. 33, Part B1. – P. 288–294.
3. Alharthy, A. Laboratory self-calibration of a multi-band sensor / A. Alharthy, J. Bethel // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2001. – Vol. 34, Part 3A. – P. 23–28.
4. Ежова, К.В. Математическое моделирование фотограмметрической дисторсии / К.В. Ежова // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2006. – Вып. 26. – С. 235–239.
5. Комиссаров, Д.В. Методика калибровки цифровых неметрических камер для наземных лазерных сканеров / Д.В. Комиссаров, А.В. Комиссаров [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: <http://www.geoprofi.ru/default>.
6. Кочкуров, С.А. Измерение и коррекция искажений изображения, вызванных дисторсией объектива сканера / С.А. Кочкуров [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа: <http://skochkurov.narod.ru/Distortion Paper.html>
7. Brown Duane C. The Bundle Adjustment – Progress and Prospects. XIII Congress of the International Society for Photogrammetry. Helsinki, 21 (3), 1976. – Melbourne (Florida – USA): DBA Systems, 1976. – 33 s., 12 obr. Signature: K39684.
8. Кульчицкий, А.А. Исследование моделей калибровки камер технического зрения для программной компенсации искажений в системах контроля геометрических параметров объектов / А.А. Кульчицкий // Инновационная наука. – 2015. – № 10. – С. 86–91.
9. Цифровые зеркальные камеры EOS и компактные системные камеры Canon EOS 60D [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: https://www.canon.ru/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_60d/.
10. Объектив EF-S Lenses Canon EF-S 17–85 mm f / 4–5,6 IS USM [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим

доступа: <https://www.canon.ru/lenses/ef-s-17-85mm-f-4-5-6-is-usm-lens/>

11. Объектив EF-S Lenses Canon EF-S 18–55 mm f / 3,5–5,6 IS II. [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.canon.ru/lenses/ef-s-18-55mm-f-3-5-5-6-is-ii-lens/>

References

1. Cramer M. EUROSDR network on digital camera calibration. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, vol. 35, part B6, pp. 204–209.

2. Schuster R., Braunecker B. Calibration of the ADS40 airborne digital sensor. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, vol. 33, part B1, pp. 288–294.

3. Alharthy A., Bethel J. Laboratory self-calibration of a multi-band sensor. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, vol. 34, part 3A, pp. 23–28.

4. Yezhova K.V. [Mathematical Modeling of Photogrammetric Distortion]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Herald of the St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2006, vol. 26, pp. 235–239 (in Russian).

5. Komissarov D.V., Komissarov A.V. *Metodika kalibrovki cifrovyh nemetricheskikh kamer dlya nazemnykh lazernykh skanerov* [Method for calibrating digital non-metric cameras for ground-based laser scanners] Available at: <http://www.geoprofi.ru/default.and B>, 1997, 295 p. (in Russian).

6. Kochkurov S.A. *Izmerenie i korrektsiya iskazhenii izobrazheniya, vyzvannykh distorsiei ob'ektiva skanera* [Measurement and correction of images caused by the distortion of the scanner lens]. Available at: <http://skochkurov.narod.ru/DistortionPaper.html> (in Russian).

7. Brown Duane C. The Bundle Adjustment – Progress and Prospects. XIII. Congress of the International Society for Photogrammetry. Helsinki, 21 (3), 1976, Melbourne (Florida – USA), DBA Systems, 1976, 33 s., 12 obr. Signature: K39684.

8. Kurkov V.M. [Methods of accounting for systematic aerial imaging]. Self-calibration «Izvestia VUZ» *Geodesy and aerial photography*, 1980, № 6, pp. 75–79 (in Russian).

9. Digital SLR cameras EOS and compact system cameras Canon EOS 60D. – 2017. Available at: https://www.canon.com/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_60d/

10. Lens EF-S Lenses Canon EF-S 17–85 mm f / 4–5.6 IS USM. – 2017. Available at: <https://www.canon.com/lenses/ef-s-17-85mm-f-4-5-6-is-usm-lens/>.

11. Lens EF-S Lenses Canon EF-S 18–55 mm f / 3.5–5.6 IS II. – 2017. Available at: <https://www.canon.com/lenses/ef-s-18-55mm-f-3-5-5-6-is-ii-lens/>.