

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-428-436>

УДК 681.77, 681.2.083, 681.2.088, 681.2.089

Методика определения элементов внутреннего ориентирования многоматричных оптико-электронных аппаратов

Асп. Н. О. Старосотников^{1,2)}, инж. И. В. Подскребкин²⁾, канд. техн. наук, доц. Р. В. Фёдорцев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾ОАО «Пеленг» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В схемах работы оптико-электронных аппаратов (ОЭА), таких как цифровые автоколлиматоры, пеленгаторы, датчики Шака-Гартмана, а также системы астроориентации, проекционные измерительные системы, схемы геометрической калибровки ОЭА, фотоприемник выступает не только в качестве приемного устройства, но и отсчетного. Задачи, стоящие перед ОЭА, все сложнее, требуются большие поля зрения, которые обеспечиваются в том числе за счет размера фотоприемников с минимальным размером пикселя. Однако существуют технологические ограничения создания таких фотоприемников. Решение проблемы – использование нескольких фотоприемников, установленных на одной электронной плате. Поскольку фотоприемники ОЭА выступают и в качестве измерительных устройств, необходимо производить их геометрическую калибровку, подразумевающую измерение элементов внутреннего ориентирования (ЭВО), применяемых при обработке изображений ОЭА. Геометрическая калибровка позволяет исключить погрешности взаимной выставки фотоприемников на одной электронной плате, установленной в фокальной плоскости, а также искажения, вносимые объективом ОЭА, в первую очередь дисторсией. На правильность определения ЭВО влияет взаимное расположение коллиматора, с помощью которого производится геометрическая калибровка, и самого калибруемого ОЭА, т. е. элементов внешнего ориентирования. Стоит задача разделить ЭВО и элементы внешнего ориентирования. Это достигается с помощью методики математической обработки измеренных данных в прямом и перевернутом положениях коллиматора, позволяющей применять ее для геометрической калибровки ОЭА с большим количеством фотоприемников. В статье представлены результаты геометрической калибровки ЭВО при проецировании коллиматором тест-объекта на три фотоприемника макета ОЭА. Определены факторы, влияющие на точность геометрической калибровки ЭВО ОЭА. Разработанная методика геометрической калибровки ЭВО многоматричных ОЭА обеспечивает высокую точность измерений – не более 0,1"–0,2".

Ключевые слова: геометрическая калибровка, коллиматор, оптико-электронный аппарат, элементы внешнего и внутреннего ориентирования, фотоприемник

Для цитирования: Старосотников, Н. О. Методика определения элементов внутреннего ориентирования многоматричных оптико-электронных аппаратов / Н. О. Старосотников, И. В. Подскребкин, Р. В. Фёдорцев // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 428–436. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-428-436>

Method for Determining Elements of Internal Orientation Calibration in Multi-Matrix Optoelectronic Devices

М. А. Starasotnikau^{1, 2)}, I. V. Padscrebkin²⁾, R. V. Feodortsau¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾JSC “Peleng” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In the operation schemes of optical electronic devices (OED), such as digital autocollimators, direction finders, Shack-Hartmann sensors, as well as astro-orientation systems, projection measuring systems, geometric calibration schemes for OED, the photo-detector acts not only as a receiving device, but also as a measuring device. The tasks facing the OED

Адрес для переписки

Фёдорцев Ростислав Валерьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-62-86
lft@bntu.by

Address for correspondence

Feodortsau Rostislav V.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-62-86
lft@bntu.by

are becoming more and more complicated, large fields of view are required, which are provided among other things due to the size of photo-detectors with a minimum pixel size. However, there are technological limitations to the creation of such photo-detectors. The solution to the problem is the use of several photo-detectors installed on one electronic board. Since OED photo-detectors act, inter alia, as measuring devices, it is necessary to perform their geometric calibration. Geometric calibration involves the measurement of interior orientation parameters used in the processing of OED images. Geometric calibration makes it possible to eliminate errors in mutual exposure of photo-detectors on one electronic board installed in the focal plane, as well as distortions introduced by the OED lens, primarily by distortion. The correctness of the interior orientation parameter determination is influenced by the relative position of the collimator, with the help of which the geometric calibration is performed, and the calibrated OED itself, i. e. the external orientation elements. The task is to separate the interior orientation parameters and the elements of external orientation. This is achieved using the method of mathematical processing of measured data in the forward and inverted positions of the collimator. This method of geometric calibration allows to use it for geometric calibration of OED with a large number of photo-detectors. The paper presents the results of the geometric calibration of the interior orientation parameters when the collimator projects a test object onto three photo-detectors of the OED layout. The factors influencing on the accuracy of the geometric calibration of the interior orientation elements for OED are determined in the paper. The developed method for geometric calibration of the interior orientation parameters for multi-matrix OED provides high measurement accuracy – not more than 0.1"–0.2".

Keywords: geometric calibration, collimator, optoelectronic device, exterior and interior orientation parameters, photo-detector

For citation: Starasotnikau M. A., Padsckrebkin I. V., Feodortsau R. V. (2020) Method for Determining Elements of Internal Orientation Calibration in Multi-Matrix Optoelectronic Devices. *Science and Technique*. 19 (5). 428–436. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-428-436> (in Russian)

Введение

В связи с совершенствованием технологии создания фотоприемников в схемах работы оптико-электронных аппаратов (ОЭА), таких как цифровые автоколлиматоры, пеленгаторы, датчики Шака-Гартмана, а также системы астроориентации, проекционные измерительные системы, схемы геометрической калибровки ОЭА [1–4], фотоприемник выступает не только в качестве приемного устройства, но и отсчетного, поскольку элементы фотоприемника – пиксели – имеют высокую точность пространственной периодичности. Задачи, стоящие перед ОЭА, становятся более сложными, требуются большие поля зрения, которые обеспечиваются в том числе за счет размера фотоприемников с минимальным размером пикселя. Однако существуют технологические ограничения создания таких фотоприемников. Решение проблемы – использование нескольких фотоприемников, установленных на одной электронной плате.

Поскольку фотоприемники ОЭА выступают и в качестве измерительных устройств, необходимо производить геометрическую калибровку ОЭА, подразумевающую измерение элементов внутреннего ориентирования (ЭВО) ОЭА, используемых при обработке изображений ОЭА. Геометрическая калибровка позволяет исключить погрешности взаимной выставки фотоприемников на одной электронной плате, уста-

новленной в фокальной плоскости ОЭА, а также искажения, вносимые объективом ОЭА, в первую очередь дисторсией [5]. Под ЭВО ОЭА понимаются следующие параметры:

- фотограмметрическое (эффективное) фокусное расстояние (ЭФР) f_e ;
- положение главной точки Sfx', Sfy' ;
- расположение фотоприемников в фокальной плоскости ОЭА:
 - линейное – координаты нулевого пикселя фотоприемника x_0, y_0 ;
 - угловое – угол поворота фотоприемника κ .

Методы геометрической калибровки

Общие принципы реализации. Общей схемой для геометрической калибровки ОЭА является проецирование на фотоприемник ОЭА эталонной связки векторов с предварительно известной пространственной ориентацией. По энергетическим центрам тяжести, определяемым периодической топологией элементов фотоприемника, спроецированной эталонной связки векторов, фотоприемник регистрирует их пространственное положение в системе координат ОЭА. Таким образом, в данной схеме периодическая топология элементов фотоприемника ОЭА будет являться измерительной шкалой. Определяются невязки эталонной связки векторов и их проекций в системе координат ОЭА. Невязки входят в систему линейных алгебраи-

ческих уравнений, решение которых методом наименьших квадратов будет определять ЭВО ОЭА.

Главным различием методов геометрической калибровки можно назвать способ формирования связки векторов. В зависимости от того, какой в ОЭА фотоприемник – линейный или матричный, – определяется то, как должны быть разнесены векторы связки векторов: по двум или по одной координатам. Величина поля зрения ОЭА влияет на то, какой диапазон должна охватывать связка векторов. Требования к точности геометрической калибровки определяют требования к определению пространственной ориентации связки векторов.

Для геометрической калибровки чаще всего используются коллимационные схемы [6]. В качестве тест-объекта может выступать либо матрица тест-объектов, либо единичный тест-объект.

Коллиматор с матрицей тест-объектов подходит для геометрической калибровки ОЭА с небольшим полем зрения, ограниченными технологическими возможностями производства матрицы тест-объектов. Предварительно проводится геометрическая калибровка коллиматора, например аттестованным теодолитом.

При использовании коллиматора с единичным тест-объектом его проецируют под разными углами в ОЭА. Возможны три варианта:

- коллиматор неподвижен, поворачивается калибруемый ОЭА;
- коллиматор поворачивается, калибруемый ОЭА неподвижен;
- калибруемый ОЭА поворачивается по одной оси, а коллиматор – по другой: для упрощения конструктивной реализации геометрической калибровки, когда необходимо калибровать ОЭА с большими полями зрения по двум осям.

Во всех случаях необходимо измерять величину поворота либо ОЭА, либо коллиматора, например, при помощи аттестованного углового датчика или теодолита.

Для геометрической калибровки ОЭА с сильно вынесенным входным зрачком осуществлять нужно не только поворот, но и линейное перемещение. Это обеспечивает расположение коллиматора и калибруемого ОЭА как можно ближе друг к другу для уменьшения области

с возможным движением воздушных масс, либо градиентом температуры, влияющих на точность геометрической калибровки.

На правильность определения ЭВО влияет то, как определено расположение друг относительно друга коллиматора и калибруемого ОЭА в процессе геометрической калибровки, т. е. элементов внешнего ориентирования. Стоит задача разделить ЭВО и элементы внешнего ориентирования. Это достигается за счет методики математической обработки измеренных данных, представленной в статье. Стоит отметить, что в случае схемы геометрической калибровки, когда коллиматор и калибруемый ОЭА перемещаются, дополнительно необходимо контролировать относительное их положение, которое нужно учитывать при обработке.

Описание схемы. Структурная схема геометрической калибровки (рис. 1) включает коллиматор и макет ОЭА. Внешний вид схемы геометрической калибровки макета ОЭА без кожуха показан на рис. 2. Коллиматор включает объектив с фокусным расстоянием $f = 1000$ мм (точное значение $f = 999,7190$ мм), тест-объект, расположенный в фокальной плоскости объектива, и осветитель. Рисунок тест-объекта является массив прозрачных точек на непрозрачном фоне.

Пример изображения рисунка тест-объекта на фотоприемнике ОЭА представлен на рис. 3. Массив точек подобран таким образом, чтобы равномерно спроецировать их изображения в центре и по краям фотоприемника ОЭА. Осветитель включает массив светодиодов и матовое стекло для обеспечения равномерной подсветки рисунка тест-объекта. Плата, на которой установлены светодиоды, с тыльной стороны охлаждается вентилятором. Длина волны излучения светодиодов (660 ± 10) нм. Объектив ОЭА, в фокальной плоскости которого установлены фотоприемники, формирует изображение тест-объекта, спроецированного коллиматором, на фотоприемнике. Объективы рассчитаны на минимум дисторсии, астигматизма, комы и хроматических aberrаций. Согласованность размера рисунка тест-объекта, функции рассеяния точки объективов и размера фоточувствительного элемента ОЭА – согласно [7].

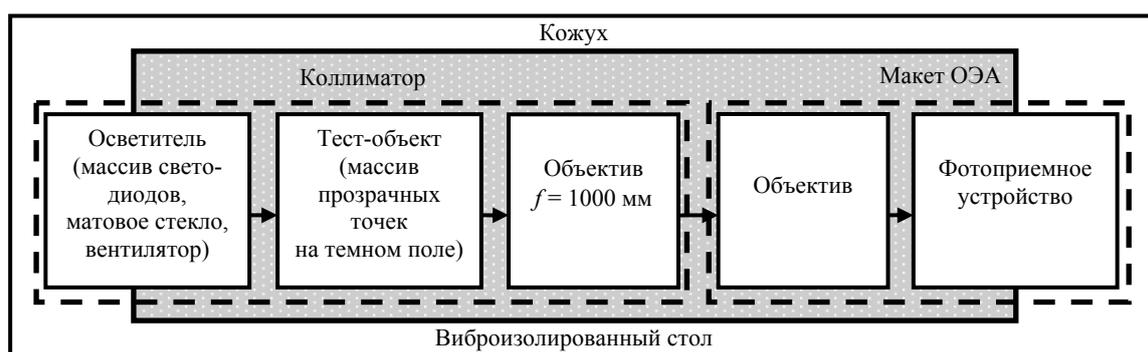


Рис. 1. Структурная схема геометрической калибровки макета оптико-электронного аппарата

Fig. 1. Structural diagram of geometric calibration for a model of optoelectronic device

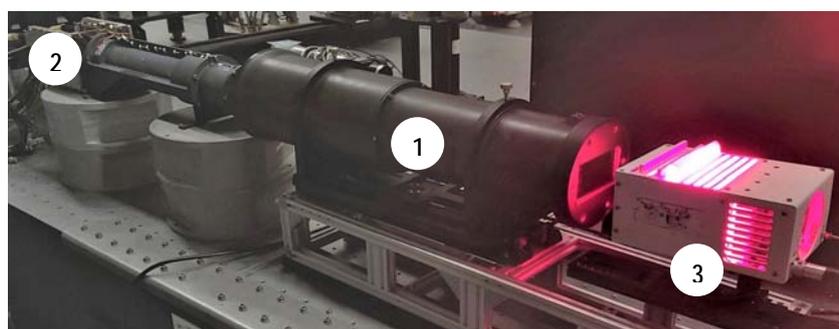


Рис. 2. Внешний вид схемы геометрической калибровки макета оптико-электронного аппарата (кожух не показан): 1 – коллиматор; 2 – макет; 3 – осветитель

Fig. 2. External view of the scheme of geometric calibration for a model of optoelectronic device (casing is not shown): 1 – collimator; 2 – layout; 3 – illuminator

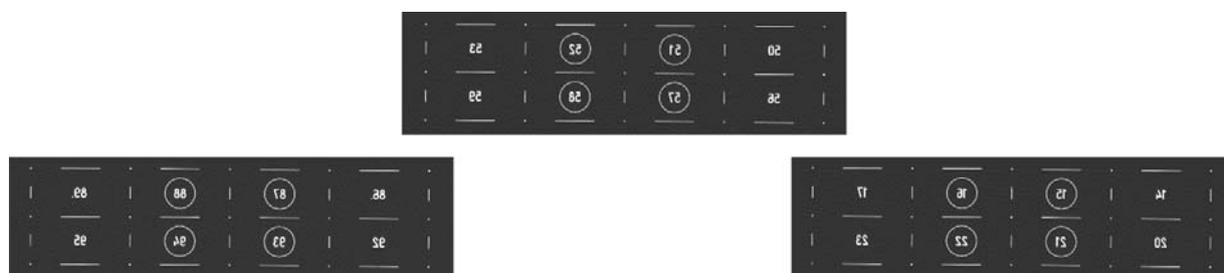


Рис. 3. Пример изображения рисунка тест-объекта на фотоприемнике оптико-электронного аппарата

Fig. 3. Image example of test object drawing on photo-detector of optoelectronic device

Основные технические характеристики калибруемого макета ОЭА представлены в табл. 1. Схема фокальной плоскости ОЭА (рис. 4) характерна для ОЭА, осуществляющего маршрутные съемки, когда ОЭА движется относительно объекта съемки и производит ее в режиме временной задержки и накопления. Три фотоприемника с шахматным расположением в макете ОЭА в исследовании используются в качестве примера. В ОЭА с большим количеством фотоприемников вдоль оси OX расчет будет аналогичным.

Таблица 1
Основные технические характеристики калибруемого макета оптико-электронного аппарата
Main technical characteristics of calibrated model of optoelectronic device

Наименование технического параметра	Значение
Фокусное расстояние объектива f , мм	1000
Количество фотоприемников Nm , шт.	3
Разрешение фотоприемника (Д×Ш), пикс	2048×576
Формат фотоприемника (Д×Ш), мм	10,2×2,9
Размер пикселя p , мкм	5×5

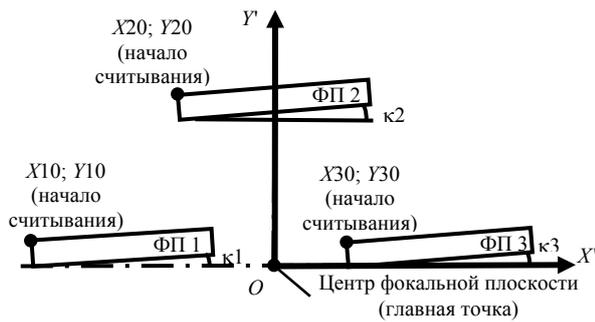


Рис. 4. Схема фокальной плоскости макета оптико-электронного аппарата (вид со стороны объектива): $X_{10}, Y_{10}, X_{20}, Y_{20}, X_{30}, Y_{30}$ – координаты начальных пикселей фотоприемников; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ – углы поворота фотоприемников; X', Y' – проекция осей $X_{OЭА}, Y_{OЭА}$ на фокальную плоскость

Fig. 4. Diagram of focal plane of optoelectronic device layout (view from the side of the lens): $X_{10}, Y_{10}, X_{20}, Y_{20}, X_{30}, Y_{30}$ – coordinates of initial pixels of photo-detectors; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ – angles of photo-detector rotation; X', Y' – projection of $X_{OЭА}, Y_{OЭА}$ axes onto the focal plane

Для устранения искажений в оптическом тракте схемы геометрической калибровки из-за рефракции воздуха, оптический тракт закрывается кожухом. Использование кожуха устраняет влияние перемещения воздушных масс в помещении на процесс геометрической калибровки. Кожух устанавливается таким образом, чтобы оставались открытыми не входящие в оптический тракт схемы калибровки части осветителя и ОЭА. Это необходимо для свободного отвода выделяемого ими тепла во время калибровки. Помимо этого, кожух должен быть пористым, чтобы обеспечить отвод теплоты из оптического тракта, а также устранить застоявания воздушных масс. Для снижения влияния вибраций схема геометрической калибровки устанавливается на виброизолирующий стол.

Описание методики и этапы калибровки

1. Коллиматор, калибруемый ОЭА, и осветитель визуально выставляются соосно.
2. ОЭА выдерживается во включенном состоянии для достижения рабочего режима съемки.
3. Определяется величина тока питания светодиодов или экспозиция, чтобы обеспечить освещенность фотоприемника ОЭА 80–90 % величины его потенциальной ямы.
4. По изображению с фотоприемников ОЭА достигается расположение рисунка тест-объек-

та коллиматора в центре фокальной плоскости путем поворотов коллиматора вокруг трех осей.

5. ОЭА выключается и остывает до температуры помещения.
6. ОЭА включается. Производится съемка 100 кадров рисунка тест-объекта.
7. Коллиматор поворачивается вокруг своей оптической оси на 180° .
8. ОЭА выключается и остывает до температуры помещения.
9. ОЭА включается. Производится съемка 100 кадров рисунка тест-объекта.
10. Полученные изображения обрабатываются согласно следующему разделу.

Обработка результатов

Вычисление по изображению с фотоприемников координат спроецированных коллиматором точек тест-объекта

1. Усредняется значение сигнала $I_{n,m}$ в каждом пикселе n, m , характеризующее преобразованной в электронном тракте ОЭА освещенности пикселя для снятых 100 кадров ОЭА.

Для снижения влияния шумов к усредненным кадрам применяется фильтр Винера размером 5×5 пикселей, а также вводился порог [8, 9], значения сигнала ниже которого принимались «0». Величина порога была в пять раз больше среднего значения фонового сигнала. Размер фильтра и величина порога определялись для повышения точности расчета центра тест-объекта.

2. Предварительно визуально определяется положение изображения одной из точек рисунка тест-объекта на фотоприемнике. С учетом известного шага между точками и линейного увеличения системы объектив коллиматора – объектив ОЭА определяются предварительные координаты точек рисунка тест-объекта на фотоприемнике, которые используются для задания центра области вычисления точных координат.

3. Находятся точные координаты изображения каждой точки рисунка тест-объекта коллиматора по энергетическому центру тяжести

$$C = \frac{\sum_N \sum_M (I_{n,m} n) \sum_N \sum_M (I_{n,m} m)}{\sum_N \sum_M I_{n,m} \sum_N \sum_M I_{n,m}}$$

где $I_{n,m}$ – величина сигнала в пикселе n, m ; n, m – порядковые номера пикселей по столб-

цам и строкам фотоприемника; N, M – общее число столбцов и строк области вычисления координат центра тяжести, использовалась область 70×70 пикселей [10].

Вычисление элементов внутреннего ориентирования оптико-электронного аппарата

1. Переходят из системы координат фотоприемника в систему координат фокальной плоскости ОЭА:

$$\begin{pmatrix} XP_{np_{i1}} \\ YP_{np_{i1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{np0} \\ Y_{np0} \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} \cos(\alpha_{np0}) & -\sin(\alpha_{np0}) \\ \sin(\alpha_{np0}) & \cos(\alpha_{np0}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} CP_{np_{i1,0}} \\ CP_{np_{i1,1}} \end{pmatrix};$$

$$XP_{i2}, YP_{i2} = \begin{pmatrix} XP0_{i1}, YP0_{i1} \\ XP1_{i1}, YP1_{i1} \\ \vdots \\ XP_{np_{i1}}, YP_{np_{i1}} \end{pmatrix},$$

где XP_{i2}, YP_{i2} – координаты изображения точки тест-объекта коллиматора в системе координат фокальной плоскости ОЭА; X_{np0}, Y_{np0} – линейные координаты нулевых пикселей фотоприемников; α_{np0} – поворот фотоприемников вокруг визирной оси ОЭА; p – размер пикселя фотоприемника; $CP_{np_{i1}} = (C_{x_{i1}}, C_{y_{i1}})$ – координаты центров тяжести точек изображения тест-объекта на фотоприемнике; $np = 0 \dots Nm - 1$ – номер фотоприемника; Nm – количество фотоприемников ОЭА; $i1 = 0 \dots T - 1$ – номер точки тест-объекта коллиматора, спроецированной на фотоприемник; T – количество точек тест-объекта коллиматора, спроецированных на фотоприемник; $i2 = 0 \dots TNm - 1$ – номер точки тест-объекта коллиматора, спроецированной на фокальную плоскость ОЭА; $P = 1, P = 2$ – положение коллиматора: 1 – прямое; 2 – перевернутое на 180° вокруг оптической оси коллиматора.

2. Пересчитываются координаты с учетом поправок:

$$XP_{i2} = P_{i3,pp} XP_{i2};$$

$$YP_{i2} = P_{i3,pp} YP_{i2},$$

где $P_{i3,pp}$ – полином аппроксимации, при первой итерации равен нулю; pp – степень полинома.

3. Пересчитываются координаты коллиматора в систему координат фокальной плоскости ОЭА

$$XkP_{i2}, YkP_{i2} = v XkP_{i2}, YkP_{i2} \cdot (f / f_k);$$

где XkP_{i2}, YkP_{i2} – эталонные координаты точек

тест-объекта коллиматора; $v = \begin{cases} 1 & \text{для } P=1 \\ -1 & \text{для } P=2 \end{cases}$ –

коэффициент, характеризующий поворот коллиматора на 180° вокруг оптической оси; f – фокусное расстояние объектива ОЭА; f_k – фокусное расстояние коллиматора.

4. Вычисление эффективного фокусного расстояния.

Приводят координаты к общему центру.

Вычисляются невязки.

Вычисляется поворот вокруг оптической оси для каждого фотоприемника.

Компенсируется поворот вокруг оптической оси для каждого фотоприемника.

Определяется эффективное фокусное расстояние методом наименьших квадратов

$$f_{\text{эф}} = f + f \frac{\sum \left(\left(\sqrt{XfP_{i2}^2} + YfP_{i2}^2 \right) - \frac{-\sqrt{XkfP_{i2}^2} + YkfP_{i2}^2}{\sum \left(\sqrt{XkfP_{i2}^2} + YkfP_{i2}^2 \right)} \right)}{\sum \left(\sqrt{XkfP_{i2}^2} + YkfP_{i2}^2 \right)}.$$

Пересчитываются невязки $dXfP_{i2}, dYfP_{i2}$ с новым эффективным фокусным расстоянием.

Вычисляется средняя квадратическая погрешность (СКП; SKP) эффективного фокусного расстояния

$$SKPf = \sqrt{\sum_P \left(\sqrt{\frac{\sum (dXfP_{i2})^2}{TNm-1}} \sqrt{\frac{\sum (dYfP_{i2})^2}{TNm-1}} \right)^2}.$$

Выполняется весь расчет заново с уточненным фокусным расстоянием.

5. Проводится компенсация элементов внешнего ориентирования.

Координаты переводятся в векторный вид направляющих косинусов

$$VkP_{i2}, VP_{i2} = \frac{1}{\sqrt{(XkP_{i2}, XP_{i2})^2 + (YkP_{i2}, YP_{i2})^2 + f_{\text{эф}}^2}} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} XkP_{i2}, XP_{i2} \\ YkP_{i2}, YP_{i2} \\ f_{\text{эф}} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Вычисляются элементы внешнего ориентирования в первом приближении:

- вычисляются невязки координат;
- вычисляется поворот вокруг оптической оси OZ

$$\kappa P_{np} = \frac{\sum_T (XnP_{i2} dXP_{i2})}{\sum_T (XnP_{i2}^2)}. \quad (2)$$

Примечание. Для вычисления поворота вокруг оптической оси OZ используют координаты, приведенные к общему центру;

- вычисляется поворот вокруг оси OX

$$\omega P_{np} = \arctg \left(\frac{\sum_T dYP_{i2}}{Tf} \right); \quad (3)$$

- вычисляется поворот вокруг оси OY

$$\alpha P_{np} = \arctg \left(\frac{\sum_T dXP_{i2}}{Tf} \right); \quad (4)$$

- выполняется пересчет векторов с учетом компенсации элементов внешнего ориентирования

$$VkP_{i2} = My(\alpha P)Mx(\omega P)My(\kappa P)VkP_{i2}, \quad (5)$$

где Mx, My, Mz – матрицы поворота вокруг осей OX, OY, OZ ;

- пересчитываются невязки.

Уточнение ЭВО

Вычисление уточненного поворота вокруг оптической оси для каждого фотоприемника

$$\kappa P_{np} = \kappa P_{np} + \sum_P \frac{\sum_T (XnP_{i1} dXP_{i1})}{\sum_T (XnP_{i1}^2)} / 2. \quad (6)$$

Вычисление уточненных линейных координат для каждого фотоприемника

$$Xnp0, Ynp0 = Xnp0, Ynp0 + \sum_P \left(\frac{\sum_T dXP_{i1}, \sum_T dYP_{i1}}{T} \right) / 2. \quad (7)$$

Порядок компенсации элементов внешнего и внутреннего ориентирований по формулам (1)–(7):

- компенсируется поворот вокруг оптической оси OZ κP как среднее поворота для ФП1 и ФП3 κP_{np} для положений коллиматора $P = 1$ и $P = 2$;

- компенсируется поворот вокруг оси OX ωP как среднее поворота для ФП1 и ФП3 ωP_{np} для положений коллиматора $P = 1$ и $P = 2$;

- компенсируется поворот вокруг оси OY αP как среднее поворота для ФП1 и ФП3 αP_{np} для положений коллиматора $P = 1$ и $P = 2$;

- выполняется весь расчет заново с уточненными элементами внешнего ориентирования;

- уточняется поворот вокруг оптической оси для каждого фотоприемника κP_{np} как среднее в двух положениях коллиматора;

- уточняются линейные координаты для каждого фотоприемника $Xnp0, Ynp0$ как среднее в двух положениях коллиматора;

- выполняется весь расчет заново с уточненными ЭВО.

6. Вычисление коэффициентов полинома аппроксимации дисторсии и остаточных поправок геометрического положения фотоприемников.

Вычисляются невязки dX_{i3}, dY_{i3} по всем измерениям в прямом и перевернутом положениях коллиматора, где $i3 = 0 \dots (TNm - 1) \cdot 2$ – номер точки тест-объекта коллиматора, спроецированной на фокальную плоскость ОЭА, в прямом и перевернутом положениях коллиматора.

Решением системы линейных алгебраических уравнений методом наименьших квадратов вычисляются остаточные невязки:

$$DX_{i3} = fx \frac{(V_{i3})_0}{(V_{i3})_2} + Sfx' \left(\frac{(V_{i3})_0}{(V_{i3})_2} \right)^2; \quad (8)$$

$$DY_{i3} = fy \frac{(V_{i3})_1}{(V_{i3})_2} + Sfy' \left(\frac{(V_{i3})_1}{(V_{i3})_2} \right)^2. \quad (9)$$

Пересчитываются невязки.

Вычисляются весовые коэффициенты Qx, Qy параметров из системы линейных алгебраических уравнений (8), (9).

Вычисляется СКП эффективного фокусного расстояния

$$SKPf = \sqrt{\frac{\sum (dX_{i3})^2}{(TNm-1) \cdot 2-1}} Qx \cdot \sqrt{\frac{\sum (dY_{i2})^2}{TNm-1}} Qy.$$

Вычисляются коэффициенты остаточного полинома аппроксимации ЭВО решением систем линейных алгебраических уравнений методом наименьших квадратов

$$P_{i3,pp} = Xn_{i3}^{pm} Yn_{i3}^{pn},$$

где $pm = 0 \dots \sqrt{pp}$; $pn = 0 \dots \sqrt{pp} - pm$; pp – степень полинома, номера комбинаций pm и pn .

Вычисляются невязки с учетом вычисленных остаточных поправок.

Вычисляется СКП геометрической калибровки

$$SKP = \sqrt{\arctg \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum (d3X_{i3})^2}{(TNm-1) \cdot 2-1}}}{f} \right) \times \arctg \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum (d3Y_{i3})^2}{(TNm-1) \cdot 2-1}}}{f} \right)}.$$

Представление результатов расчета

Полученные в процессе геометрической калибровки ЭВО макета ОЭА с техническими характеристиками из табл. 1 и СКП определения ЭВО макета ОЭА представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты геометрической калибровки элементов внутреннего ориентирования макета оптико-электронного аппарата

Results of geometric calibration of elements for internal orientation of optoelectronic device layout

Наименование технического параметра	Значение
Фотограмметрическое фокусное расстояние $f_{\text{ф}}$, мм	999,7519
СКП определения фотограмметрического фокусного расстояния $SKPf$, мм	0,0016
СКП геометрической калибровки SKP , рад	0,0000003 (0,07")

На рис. 5 представлены остаточные невязки восстановления направления на эталонные точки тест-объекта коллиматора.

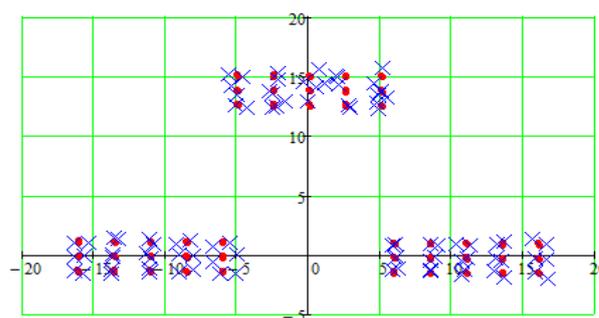


Рис. 5. Результаты расчета в системе координат фокальной плоскости макета оптико-электронного аппарата, мм: ● – эталонные координаты точек тест-объекта коллиматора; × – увеличенные в 3000 раз остаточные невязки восстановления направления на точки тест-объекта коллиматора

Fig. 5. Calculation results in the focal plane coordinate system of optoelectronic device, mm: ● – reference coordinates of collimator test object points; × – residual residuals of direction restoration to points of collimator test object increased by 3000 times

ВЫВОД

Проведена геометрическая калибровка макета многоматричного оптико-электронного аппарата с тремя фотоприемниками. Разработанная методика разделения элементов внешнего ориентирования за счет обработки измеренных данных по всем фотоприемникам и элементов внутреннего ориентирования за счет обработки по каждому фотоприемнику в прямом и перевернутом положениях коллиматора, а также представленные способы снижения влияющих факторов на точность геометрической калибровки элементов внутреннего ориентирования оптико-электронного аппарата обеспечивают высокую точность (не более 0,1"–0,2"). Данная методика позволяет применять ее для геометрической калибровки оптико-электронных аппаратов с большим количеством фотоприемников, чем представлено в качестве примера в статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Старосотников, Н. О. Высокоточный цифровой автоколлиматор для измерения малых углов / Н. О. Старосотников // Новые направления развития приборостроения: материалы 7-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., 23–25 апр. 2014 г. Минск: БНТУ, 2014. С. 244.
2. Jinyun, Yan. Dynamic Imaging Model and Parameter Optimization for a Star Tracker / Yan Jinyun, Jiang Jie,

- Zhang Guangjun // *Optics Express*. 2016. Vol. 24, Iss. 6. P. 5961–5983. <https://doi.org/10.1364/oe.24.005961>
3. Adaptive Thresholding and Dynamic Windowing Method for Automatic Centroid Detection of Digital Shack – Hartmann Wavefront Sensor / Xiaoming Yin [et al.] // *Applied Optics*. 2009. Vol. 48, Iss. 32, P. 6088–6098. <https://doi.org/10.1364/ao.48.006088>.
 4. Huang Zhengrong. Accurate Projector Calibration Based on a New Point to Point Mapping Relationship Between the Camera and Projector Images / Huang Zhengrong, Jiangtao Xi, Yanguang Yu // *Applied Optics*. 2015. Vol. 54, Iss. 3. P. 347–356. <https://doi.org/10.1364/ao.54.000347>.
 5. Лобанов, А. Н. Фотограмметрия / А. Н. Лобанов, М. И. Буров, Б. В. Краснопецев. М.: Недра, 1987. 308 с.
 6. Фотограмметрические параметры оптико-электронной аппаратуры / С. А. Архипов [и др.] // *Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2008. № 4. С. 105–115.
 7. Старосотников, Н. О. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприемниками / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // *Наука и техника*. 2015. № 5. С. 71–76.
 8. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MatLab / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. М.: Изд-во «Техносфера», 2006. 616 с.
 9. Старосотников, Н. О. Метод снижения влияния шумов фонового сигнала при определении координат энергетического центра тяжести изображения в ОЭП / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // *Приборостроение-2016: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф.*, 23–25 нояб. 2016 г. Минск: БНТУ, 2016. С. 133–135.
 10. Старосотников, Н. О. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах // Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 1. С. 79–86. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86>.
- Поступила 11.11.2019
Подписана в печать 17.03.2020
Опубликована онлайн 30.09.2020
- REFERENCES
1. Starasotnikau N. O. (2014) Highly-Accurate Digital Auto-collimator for Measuring Small Angles. *Novye Napravleniya Razvitiya Priborostroeniya: Materialy 7-i Mezhdunar. Stud. Nauch.-Tekhn. Konf.*, 23–25 Apr. 2014 g. [New Directions in Instrumentation Development: Proceedings of the 7th International Students’ Scientific and Technical Conference, April 23–25, 2014]. Minsk, BNTU, 244 (in Russian).
 2. Jinyun Yan, Jiang Jie, Zhang Guangjun (2016) Dynamic Imaging Model and Parameter Optimization for a Star Tracker. *Optics Express*, 24 (6), 5961–5983. <https://doi.org/10.1364/oe.24.005961>.
 3. Xiaoming Yin, Xiang Li, Liping Zhao, Zhongping Fang (2009) Adaptive Thresholding and Dynamic Windowing Method for Automatic Centroid Detection of Digital Shack – Hartmann Wavefront Sensor. *Applied Optics*, 48 (32), 6088–6098. <https://doi.org/10.1364/ao.48.006088>.
 4. Huang Zhengrong, Jiangtao Xi, Yanguang Yu (2015) Accurate Projector Calibration Based on a New Point to Point Mapping Relationship Between the Camera and Projector Images. *Applied Optics*, 54 (3), 347–356. <https://doi.org/10.1364/ao.54.000347>.
 5. Lobanov A. N., Burov M. I., Krasnopevtsev B. V. (1987) *Photogrammetry*. Moscow, Nedra Publ. 308 (in Russian).
 6. Arkhipov S. A., Gasitch G. V., Zavarzin V. I., Morozov S. A. (2008) Photogrammetric Parameters of Optical and Electronic Apparatus. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni N. E. Baumana = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, (4), 105–115 (in Russian).
 7. Starasotnikau N. O., Feodortsau R. V. (2015) Estimation of Accurate Determination for Coordinates of Gravity Energy Center in Collimator Test-Object in Respect of Control Schemes for Optoelectronic Devices with Matrix Photo-Detectors. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 71–76 (in Russian).
 8. Gonzalez R., Woods R., Eddins S. (2004) *Digital Image Processing Using MatLab*. New Jersey, Prentice Hall.
 9. Starasotnikau N. O., Feodortsau R. V. (2016) Method for Decreasing Influence of Background Signal Noise while Determining Energy Gravity Centre Coordinates for Images in Electrooptical Devices. *Priborostroenie-2016: Materialy 9-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.*, 23–25 Noyab. 2016 g. [Instrumentation-2016: Materials of the 9th International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 133–135 (in Russian).
 10. Starasotnikau N. O., Feodortsau R. V. (2018) Accuracy Comparison of Algorithms for Determination of Image Center Coordinates in Optoelectronic Devices. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (1), 79–86. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86> (in Russian).
- Received: 11.11.2019
Accepted: 17.03.2020
Published online: 30.09.2020