



Точность определения элементов внутреннего ориентирования оптико-электронных аппаратов различными способами формирования эталонной связки векторов

Н. О. Старосотников^{1,2}, Р. В. Федорцев²

¹ ОАО «Пеленг», Минск, Республика Беларусь

² Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В статье описаны методики геометрической калибровки оптико-электронных аппаратов (ОЭА) и способы повышения ее точности. Результаты применяются для геометрической калибровки ОЭА дистанционного зондирования Земли, оптическая система которых сфокусирована на бесконечность, а изображение формируется путем «сшивки» изображений, сформированных несколькими фотоприемниками. Для расширения технологических возможностей калибровочной аппаратуры предложено использовать для формирования тест-объекта цифровое микрозеркальное устройство (DMD), которое позволяет создавать практически любую форму и размер рисунка тест-объекта под задачи калибровки ОЭА. Проведена геометрическая калибровка макета многоматричного ОЭА с помощью разных способов формирования эталонной связки векторов: последовательного проецирования теодолитом перекрестия сетки на фокальную плоскость макета ОЭА, тест-объектами в виде массива точек изготовленного методом литографии на стеклянной подложке и тест-объектом, сформированным

Accuracy of Determining the Elements of Interior Orientation of Optoelectronic Devices by Different Methods in Order to Form a Reference Vector Link

M. A. Starasotnikau^{1,2}, R. V. Feodortsau²

¹ Peleng JSC, Minsk, Republic of Belarus

² Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

The article describes methods of geometric calibration of optoelectronic devices (OED) and ways to improve its accuracy. The results are used for the geometric calibration of the Earth remote sensing OED, the optical system of which is focused to infinity, and the image is formed by “stitching” images formed by several photodetectors. To expand the technological capabilities of calibration equipment, it is proposed to use a digital micromirror device (DMD) to form a test object, which allows you to create almost any shape and size of a test object pattern for the tasks of OED calibration. The geometric calibration of the layout of the multi-matrix OED using different methods of forming a reference bunch of vectors: sequential projection of the grid intersection with the theodolite onto the focal plane of the OED layout, test objects in the form of an array of points made by lithography on a glass substrate, and a test object formed by a DMD device. The features of mathematical processing for each method of forming a reference bunch of vectors are described. The estimation of the error of the geometric calibration of the OED model, performed with various methods of setting the reference bunch of vectors, was carried out: when using theodolite – 0.48”; array of points on a glass substrate – 0.21” and formed DMD – 0.09”.



DMD-устройством. Описаны особенности математической обработки для каждого способа формирования эталонной связки векторов. Проведена оценка погрешности геометрической калибровки макета ОЭА, выполненной при различных способах задания эталонной связки векторов: при использовании теодолита – 0,48"; массива точек на стеклянной подложке – 0,21" и сформированного DMD – 0,09".

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, калибровка, цифровое микрозеркальное устройство, оптико-электронный аппарат, элементы внутреннего ориентирования, фотоприемник

Статья получена: 02.12.2021

Статья принята: 28.01.2022

ВВЕДЕНИЕ

Калибровка заключается в установлении зависимости между показаниями средства измерительной техники (прибора) и размером измеряемой (входной) величины. Геометрическая калибровка подразумевает измерение элементов внутреннего ориентирования (ЭВО) оптико-электронных аппаратов (ОЭА). Геометрическая калибровка позволяет измерить фактическое взаимное расположение фотоприемников, установленных в фокальной плоскости ОЭА, а также искажения, вносимые объективом ОЭА, прежде всего дисторсией [1]. Полученные результаты калибровки используются при последующей обработке изображений. ЭВО ОЭА определяются следующими параметрами: фотограмметрическим (эффективным) фокусным расстоянием; расположением фотоприемников в фокальной плоскости ОЭА; массивом коэффициентов, описывающих дисторсию объектива для каждого пиксела.

ЭВО ОЭА применяются для построения модели связи между пикселами изображения и соответствующей точки предмета, например снятой ОЭА земной поверхностью (для создания топографических карт). Эта процедура необходима также при «сшивке» нескольких изображений, сформированных разными фотоприемниками ОЭА. Согласно методике, предложенной в источнике [2], фотокамера с измерительной точки зрения является угломерным прибором. Поэтому модель связи между пикселами изображения и соответствующей точкой земной поверхно-

Keywords: Earth remote sensing, calibration, digital micromirror device, optoelectronic device, elements of interior orientation, photodetector

Received on: 02.12.2021

Accepted on: 28.01.2021

INTRODUCTION

Calibration consists in establishing the relationship between the readings of the measuring equipment (instrument) and the size of the measured (input) quantity. Geometric calibration involves the measurement of elements of interior orientation (EIO) of optoelectronic devices (OEDs). Geometric calibration makes it possible to measure the actual mutual arrangement of photodetectors installed in the focal plane of the OED, as well as the distortions introduced by the OED lens, primarily distortion [1]. The resulting calibration results are used in subsequent image processing. EIO of the OED are determined by the following parameters: photogrammetric (effective) focal length; the location of photodetectors in the focal plane of the OED; an array of coefficients describing lens distortion for each pixel.

EIO of the OED are used to build a model of the relationship between the pixels of the image and the corresponding point of the object, for example, the earth's surface taken by the OED (to create topographic maps). This procedure is also necessary when "stitching" several images formed by different OED photodetectors. According to the method proposed in the source [2], the camera, from the measuring point of view, is a goniometer. Therefore, the model of the connection between the image pixels and the corresponding point on the earth's surface is produced through an angular representation, and the angles should act as a reference. The accuracy of determining the EIO of the OED is characterized by the reliability of the angular representation during geometric calibration and, as a result, determines the accuracy of topographic maps. In the limit, this is the totality of all angular measurements, i. e. "bundle of rays" [2]. Thus, the reference bundle of vectors is several vectors with a known mutual spatial arrangement relative to each other.

The expansion of remote sensing tasks entails the production of a wide range of OED nomenclature. There are many options for the existence of EIO in them due to various designs of equipment, the format and relative position of photodetectors



сти производится через угловое представление, и в качестве эталона должны выступать углы. Точность определения ЭВО ОЭА характеризуется достоверностью углового представления при геометрической калибровке и, как следствие, определяет точность топографических карт. В пределе это совокупность всех угловых измерений, т. е. «связка лучей» [2]. Таким образом, эталонная связка векторов – несколько векторов с известным взаимным пространственным расположением друг относительно друга.

Расширение задач дистанционного зондирования влечет за собой производство широкой линейки номенклатуры ОЭА. Вариантов существования в них ЭВО множество за счет различных конструкций аппаратуры, формата и взаимного расположения фотоприемников в фокальной плоскости ОЭА, размера пиксела матриц и фокусного расстояния. Для целей геометрической калибровки ОЭА с разными характеристиками изготавливают оптимальный тест-объект в виде стеклянной пластины с требуемым рисунком (взаимным расположением, размером и формой элементов тест-объекта), нанесенным на ее поверхность методом литографии. Однако изготовление тест-объектов с различными рисунками каждый раз влечет за собой временные и технологические затраты.

Для геометрической калибровки можно использоваться угломерное устройство, например теодолит [3], который устанавливается перед калибруемым ОЭА, а зрительная труба теодолита последовательно проецирует перекрестие сетки зрительной трубы, подсвеченное осветителем, установленным вместо окуляра, на различные участки фотоприемника ОЭА. Может быть реализована схема в которой поворачивается непосредственно калибруемый ОЭА, а его поворот измеряется угломерным устройством. Угломерное устройство в таком случае определяет эталонную связку векторов, а погрешность калибровки будет в первую очередь зависеть от точности угломерного устройства.

Для геометрической калибровки часто используются коллимационные схемы [3], в которых в качестве тест-объекта выступает массив точек, одновременно проецируемых на всю фокальную плоскость. Погрешность калибровки в первую очередь зависит от точности определения расстояния между точками. Среднеквадратическая погрешность калибровки в таких случаях может достигать 0,4–0,6" (σ) [3]. В данном случае координаты массива точек, пересчитанные в угловую

in the focal plane of the OED, the pixel size of the matrices and the focal length. For the purposes of geometric calibration of OED with different characteristics, an optimal test object is made in the form of a glass plate with the required pattern (mutual arrangement, size and shape of the elements of the test object), applied to its surface by lithography. However, the production of test objects with different patterns each time entails time and technological costs.

For geometric calibration, you can use a goniometric device, for example, a theodolite [3], which is installed in front of the OED being calibrated, and the spotting scope of the theodolite sequentially projects the crosshairs of the spotting scope grid, illuminated by the illuminator installed instead of the eyepiece, onto different parts of the OED photodetector. A scheme can be implemented in which the directly calibrated OED rotates, and its rotation is measured by a goniometric device. The goniometric device in this case determines the reference bunch of vectors, and the calibration error will primarily depend on the accuracy of the goniometric device.

Collimation schemes [3] are often used for geometric calibration, in which an array of points acts as a test object, and they are simultaneously projected onto the entire focal plane. The calibration error primarily depends on the accuracy of determining the distance between points. The root-mean-square calibration error in such cases can reach 0.4–0.6" (σ) [3]. In this case, the coordinates of the array of points, recalculated into an angular measure, taking into account the focal length of the collimator, set the reference bunch of vectors. The field of view of the collimator and the size of the test object will limit the size of the calibrated field of view of the OED. In this case, it is possible to project the image of the test object with overlap onto the focal plane of the OED at different angles by turning either the collimator or the OED being calibrated, which slightly increases the calibration time, but complicates the process of processing the results. The calibration error by this method in [4] was 0.5" (σ).

The authors proposed a digital micromirror device (Digital Micromirror Device – DMD) for use as a test object. DMD has become widespread in various fields of optoelectronics, in projectors, spectroscopy, lithography, machine vision systems, etc. [5]. In the process of calibration, DMD makes it possible to form a pattern of a test object of almost any shape and size, limited only by

меру с учетом фокусного расстояния коллиматора, задают эталонную связку векторов. Поле зрения коллиматора и размер тест-объекта будут ограничивать величину калибруемого поля зрения ОЭА. В таком случае можно спроецировать изображение тест-объекта с перекрытием на фокальную плоскость ОЭА под разными углами, поворачивая или коллиматор, или калибруемый ОЭА, что незначительно увеличивает время калибровки, но усложняет процесс обработки результатов. Погрешность калибровки таким методом в работе [4] составила 0,5" (σ).

Авторы предложили цифровое микрозеркальное устройство (Digital Micromirror Device – DMD) для использования в качестве тест-объекта. DMD получило широкое распространение в различных областях оптоэлектроники, в проекторах, спектроскопии, литографии, системах машинного зрения и др. [5]. В процессе калибровки DMD позволяет формировать рисунок тест-объекта практически любой формы и размера, ограниченного лишь его физической площадкой, а также обеспечивает возможность одновременного проецирования изображения на все фотоприемники ОЭА с учетом их взаимного расположения. DMD-устройство позволяет экспериментально подобрать параметры рисунка тест-объекта с учетом взаимного расположения фотоприемников как для единичных уникальных ОЭА, требующих изготовления отдельного специального тест-объекта, так и для калибровки ОЭА, использующих фотоприемники в виде «линеек».

Пример использования DMD для геометрической калибровки представлен в [6]. Процедура заключается в проецировании DMD на экран массива точек и съемке этого экрана цифровой камерой [6]. Однако ОЭА для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) имеют большие фокусные расстояния (вплоть до десятков метров) и сфокусированы на бесконечность. Поэтому схема геометрической калибровки [6] для них не подойдет.

Авторы предлагают устанавливать DMD в фокальной плоскости коллиматора и использовать в качестве измерительной шкалы массив микрозеркал DMD с точной равномерной пространственной структурой. Этот вариант обеспечит имитацию бесконечно удаленного предмета и позволит расположить коллиматор и калибруемый ОЭА как можно ближе друг к другу. DMD-устройства изготавливаются методом литографии, позволяющим создавать микрозеркала размером от 5,5 мкм [7]. Поэтому считаем, что погрешность изготовления пространственной

its physical platform, and also provides the possibility of simultaneously projecting an image onto all OED photodetectors, taking into account their relative position. DMD device allows you to experimentally select the parameters of the pattern of the test object, taking into account the relative position of the photodetectors, both for single unique OED, requiring the manufacture of a separate special test object, and for the calibration of OED, using photodetectors in the form of “rulers”.

An example of using DMD for geometric calibration is presented in [6]. The procedure consists in projecting a DMD onto a point array screen and capturing this screen with a digital camera [6]. However, OED for the Earth remote sensing (ERS) have long focal lengths (up to tens of meters) and are focused to infinity. Therefore, the geometric calibration scheme [6] is not suitable for them.

The authors suggest installing the DMD in the focal plane of the collimator and using an array of DMD micromirrors with an accurate uniform spatial structure as a measuring scale. This option will provide an imitation of an infinitely distant object and will allow you to place the collimator and the OED being calibrated as close as possible to each other. DMD devices are fabricated by lithography, which makes it possible to create micromirrors as small as 5.5 μm [7]. Therefore, we believe that the error in manufacturing the spatial structure of DMD micromirrors will lead to calibration results comparable to the results of calibration using a test object on a glass substrate.

To verify this, the authors studied the influence of various methods of forming a reference bunch of vectors on the results of the geometric calibration of the OED with a long-focus lens. For this purpose, calibration methods have been developed that minimize the influence of the considered factors on its accuracy.

OBJECT OF STUDY

As an object of study, a calibrated model of the OED was taken, the main technical characteristics of which are presented in Table 1. The OED is equipped with three photodetectors staggered in the focal plane. Such an arrangement is typical for OED remote sensing, carrying out route scanning surveys, which consists in surveying the Earth's surface along the flight path of the spacecraft. The photodetectors are installed with an overlap used for “stitching” the images formed by several photo-

структуры DMD-микрозеркал приведет к результатам калибровки, сравнимым с результатами калибровки с помощью тест-объекта на стеклянной подложке.

Чтобы убедиться в этом, авторы исследовали влияние различных способов формирования эталонной связки векторов на результаты геометрической калибровки ОЭА с длиннофокусным объективом. Для этой цели были разработаны методики калибровки, минимизирующие влияние рассматриваемых факторов на ее точность.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования взят калибруемый макет ОЭА, основные технические характеристики которого представлены в табл. 1. ОЭА снабжен тремя фотоприемниками, установленными в шахматном порядке в фокальной плоскости. Такое расположение характерно для ОЭА ДЗЗ, осуществляющих маршрутные сканирующие съемки, заключающейся в съемке земной поверхности вдоль трассы полета космического аппарата. Фотоприемники установлены с перекрытием, используемым для «сшивки» изображений, сформированных несколькими фотоприемниками. В таких системах количество фотоприемников может достигать нескольких десятков.

ОПИСАНИЕ СРАВНИВАЕМЫХ СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЭТАЛОННОЙ СВЯЗКИ ВЕКТОРОВ

Модель калибровки (рис. 1) показывает эталонные векторы, которые определяются через линейные координаты тест-объекта Xk_i , Yk_i и фокусное расстояние объектива коллиматора f'_K ; проекции эталонных векторов (теоретические) Xk'_i , Yk'_i ; и проекции эталонных векторов (фактические) X_i' , Y_i' . Для упрощения построения хода лучей объектив коллиматора и объектив макета ОЭА

detectors. In such systems, the number of photodetectors can reach several tens.

DESCRIPTION OF THE COMPARED METHODS OF FORMING A REFERENCE BUNCH OF VECTORS

The calibration model (Fig. 1) shows the reference vectors, which are defined in terms of the linear coordinates of the test object Xk_i , Yk_i and the focal length of the collimator lens f'_K ; projections of reference vectors (theoretical) Xk'_i , Yk'_i ; and projections of reference vectors (actual) X_i' , Y_i' . To simplify the construction of the ray path, the collimator lens and the OED layout lens are shown as a single optical system. From the point of view of mathematical transformations, the optical system of the collimator lens

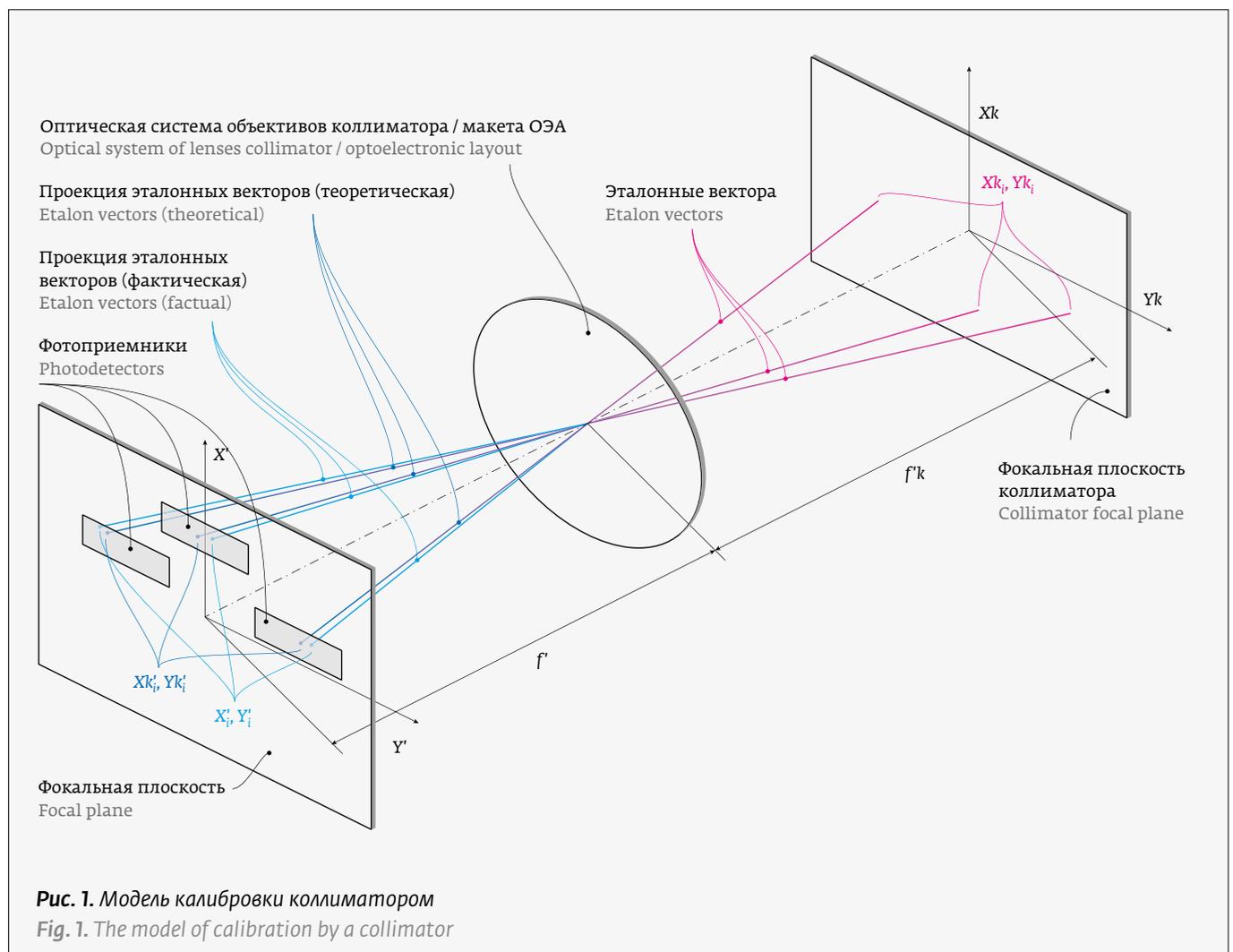
Таблица 1. Основные технические характеристики калибруемого макета ОЭА

Table 1. Main technical characteristics of the calibrated optoelectronic device layout

Технический параметр Technical parameter	Значение Value
Фокусное расстояние объектива f' , мм Lens focal length f' , mm	1000
Количество и тип фотоприемников Nm , шт. Number and type of photodetectors Nm , pcs.	3 КМОП 3 CMOS
Формат фотоприемника, пикселей Photodetector format, pixels	2048×1024
Размер фотоприемника, мм Photodetector size, mm	10,2×5,1
Взаимное расположение фотоприемников Mutual arrangement of photodetectors координаты нулевых пикселей фотоприемников, XO_{Nm} , YO_{Nm} , мм coordinates of zero pixels of photodetectors, XO_{Nm} , YO_{Nm} , mm величина поворота фотоприемников κ_{Nm} , рад rotation value of photodetectors κ_{Nm} , rad	16,6457; 3,0266 -5,8158; 16,9036 5,4382; 2,8406 0,0000000 -0,0013308 -0,0019986
Радиальная дисторсия, мм, не более Radial distortion, mm, no more	0,0004
Размер пикселя p , мм Pixel size p , mm	0,005×0,005
Диаметр входного зрачка, мм Entrance pupil diameter, mm	50

показаны единой оптической системой. С точки зрения математических преобразований оптическую систему объектива коллиматора и объектива ОЭА можно представить как одно целое, пересчитав координаты точек тест-объекта Xk_i , Yk_i в фокальную плоскость макета ОЭА Xk'_i , Yk'_i с помощью масштабного коэффициента, определяемого как отношение фокусов объектива коллиматора и макета ОЭА. Из-за искажений объектива макета ОЭА, вызванных дисторсией и погрешностью изготовления, координаты точек тест-объекта спроецируются в некоторых других положениях. Количество векторов задается таким образом, чтобы равномерно спроецировать их по всей площади фотоприемников калибруемого макета ОЭА, и при этом чтобы оставалась достаточная область между изображениями на фотоприемниках для автоматического вычисления координат центров точек. Для всех трех случаев задания эталонной связки векторов

and the OED lens can be represented as a whole by recalculating the coordinates of the points of the test object Xk_i , Yk_i into the focal plane of the OED layout Xk'_i , Yk'_i using a scale factor defined as the ratio of the foci of the collimator lens and the OED layout. Due to distortions of the lens of the OED layout, caused by distortion and manufacturing error, the coordinates of the points of the test object projected in some other positions. The number of vectors is set in such a way as to uniformly project them over the entire area of the photodetectors of the calibrated OED layout, and at the same time to leave a sufficient area between the images on the photodetectors for automatic calculation of the coordinates of the points centers. For all three cases of setting the reference bunch of vectors, the same number of reference vectors was used – 90 (45 in the direct position of the collimator and 45 in the inverted position).



использовалось одинаковое количество эталонных векторов – 90 (45 в прямом положении коллиматора и 45 – в перевернутом).

Стенд геометрической калибровки (рис. 2) состоит из коллиматора 1, макета ОЭА 2 и осветителя 3 [8]. Коллиматор 1 включает объектив 1a и тест-объект 1b, расположенный в фокальной плоскости объектива 1a. Тест-объектом является стеклянная пластина с рисунком, изготовленным методом литографии. Стеклянная пластина изготовлена из Zerodur (класс расширения 0) для поддержания стабильности размеров при возможном нагреве. Технология изготовления обеспечивает высокую точность взаимного пространственного расположения элементов рисунка тест-объекта за счет использования

The geometric calibration stand (Fig. 2) consists of a collimator 1, an OED layout 2 and an illuminator 3 [8]. The collimator 1 includes a lens 1a and a test object 1b located in the focal plane of the lens 1a. The test object is a glass plate with a pattern made by lithography. The glass plate is made of Zerodur (expansion class 0) to maintain dimensional stability when subjected to heat. The manufacturing technology ensures high accuracy of the mutual spatial arrangement of the elements of the test object pattern through the use of imaging units, e.g., Heidelberg DWL 66+ [9] or KBTEM-OMO EM-5189-02 [10]. The scheme allows you to form a reference bunch of vectors with an error of no more than 0.01". To measure the movement of the coordinate table in these installations, a high-resolution differential interferometric system is used, for example Renishaw RLD10, providing a measurement error of no more than 1 nm [11].

The pattern of the test object is an array of transparent points on an opaque background. The illuminator includes an array of LEDs and milky glass to provide uniform illumination of the test object pattern. On the back side of the board, on which the LEDs are installed, air cooling (fan) is provided for efficient heat dissipation during LED operation.

A DMD is used to form a reference bunch of vectors, then in the geometric calibration scheme, instead of the test object 1b and illuminator 3, a DLP LightCrafter 4500 is installed without lens 1 (Fig. 3). This device provides spatio-temporal

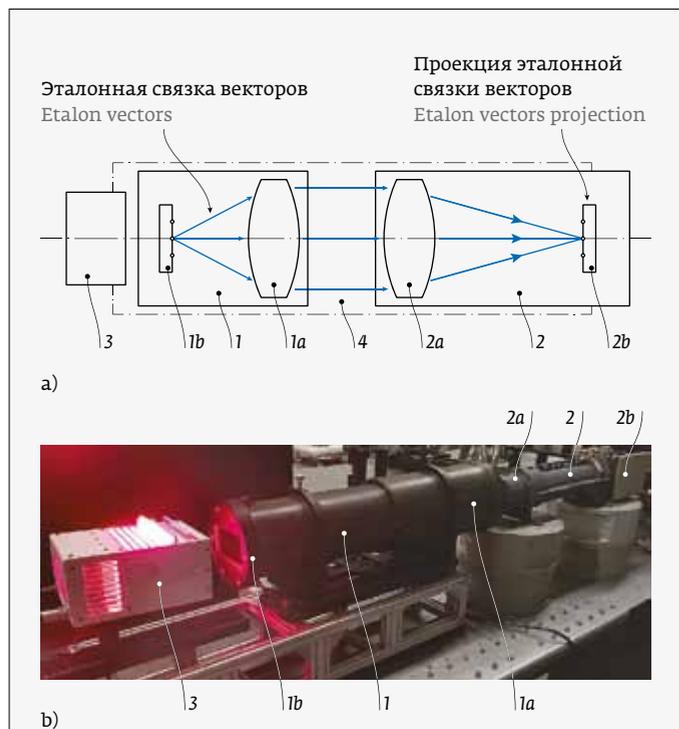


Рис. 2. Схема с ходом луча одного из векторов эталонной связки (а) и внешний вид стенда (b) геометрической калибровки макета ОЭА (кожух не показан): 1 – коллиматор (1a – объектив, 1b – тест-объект); 2 – макет ОЭА (2a – объектив, 2b – фокальная плоскость); 3 – осветитель; 4 – кожух (условно не показан)

Fig. 2. The scheme with one of etalon vector (a) and the external view set-up (b) the geometric calibration of the optoelectronic device layout (a cover not shown): 1 – collimator (1a – lens, 1b – test-object); 2 – optoelectronic device layout (2a – lens, 2b – focal plane); 3 – illuminator; 4 – cover (conventionally not shown)



Рис. 3. Внешний вид DLP LightCrafter 4500: 1 – объектив; 2 – электронная плата

Fig. 3. The external view of the DLP LightCrafter 4500: 1 – lens; 2 – electronic board

установок формирования изображений, например Heidelberg DWL 66+ [9] или КБТЭМ-ОМО ЭМ-5189-02 [10]. Схема позволяет сформировать эталонную связку векторов с погрешностью не более $0,01''$. Для измерения перемещения координатного стола в этих установках используются дифференциальная интерферометрическая система высокого разрешения, например Renishaw RLD10, обеспечивающая погрешность измерения не более 1 нм [11].

Рисунком тест-объекта является массив прозрачных точек на непрозрачном фоне. Осветитель включает массив светодиодов и молочное стекло для обеспечения равномерной подсветки рисунка тест-объекта. С тыльной стороны платы, на которой установлены светодиоды, предусмотрено воздушное охлаждение (вентилятором) для эффективного отвода тепла при работе светодиодов.

Если для формирования эталонной связки векторов используется DMD-устройство, то в схеме геометрической калибровки вместо тест-объекта *1b* и осветителя *3* устанавливается DLP LightCrafter 4500 без объектива *1* (рис. 3). Этот прибор обеспечивает пространственно-временное управление световым потоком от осветителя *3* (рис. 4), промодулированного DMD *1* посредством программного обеспечения [12].

Был рассмотрен другой способ формирования эталонной связки векторов – с помощью теодолита. В роли теодолита использован тахеометр Leica TS30 *1* (погрешность измерения угла – $0,5''$). Прибор устанавливается в схеме (рис. 4) вместо коллиматора *1* и осветителя *3*. Вместо стандартного окуляра в зрительную трубу *2* тахеометра Leica TS30 *1* помещен специально разработанный осветитель *3* для регулируемого уровня подсветки сетки зрительной трубы.

В представленных на рис. 2, 4 и 5 схемах геометрической калибровки имеются нагревающиеся элементы: осветители, фотоприемники. В процессе калибровки осветители и фотоприемники нагревают окружающую их среду, что ведет к появлению градиента показателя преломления. Помимо этого в помещении могут появляться воздушные потоки от систем охлаждения. Эти факторы приводят к тому, что в оптическом тракте схемы геометрической калибровки проецируемые лучи могут отклоняться на некоторую величину. Для снижения этого влияния оптический тракт закрывается кожухом, выполненным из пористого материала типа спанбонд плотностью не более 17 г/м^2 . Кожух устанавливается



таким образом, чтобы нагревающиеся и не входящие в оптический тракт схемы калибровки части осветителя и макета ОЭА были открытыми. Это необходимо для свободного отвода выделяемого ими тепла во время калибровки. Кожух должен быть пористым, чтобы обеспечить отвод тепла из оптического тракта, а также устранить застаивания воздушных масс. Для снижения влияния вибраций оборудование, входящее в схему геометрической калибровки, размещено на виброизолирующий стол.

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТЕСТОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Коллиматор с тест-объектом в виде стеклянной пластины или DMD, калибруемый макет ОЭА и осветитель визуально выставляются соосно. В DMD загружается рисунок тест-объекта с требуемым периодом и размером точек. Подбирается освещенность с учетом интегральной чувствительности фотоприемника и подбирается время накопления заряда фотоприемником таким образом, чтобы сигнал в единицах АЦП был на уровне 80–90% максимума оцифровки (для увеличения отношения сигнал/шум). Это необходимо для точного вычисления центров изображений точек. А также исключается область (более 90% от максимального уровня сигнала), которая характеризуется наибольшей нелинейностью фотоприемника.

Для DMD при недостаточности диапазона регулировки величины тока осветителя в осветительную систему 3 (рис. 4) устанавливают несколько слоев матовой пленки Folarex HS 1x matt 140, которая рассеивает свет аналогично молочному стеклу, уменьшает световой поток на ~50% и делает его равномерным. Подбирается частота работы микрозеркал DMD совместно с величиной тока питания осветителя таким образом, чтобы из-за погрешности несинхронности работы отдельных микрозеркал или блоков микрозеркал DMD и из-за несогласованности частоты работы DMD и фотоприемника ОЭА не наблюдалось мерцание.

По изображению на фотоприемниках ОЭА рисунок тест-объекта располагают в центре фокальной плоскости коллиматора (рис. 5). На каждый фотоприемник ОЭА проецируется матрица из 15 точек (5 – по горизонтали и 3 – по вертикали) рисунка тест-объекта коллиматора.

Съемка идет в рабочем временном режиме ОЭА, чтобы нагрев фотоприемников и соответственно изменение их взаимного пространствен-

control of the light flux from illuminator 3 (Fig. 4), modulated DMD 1 through software [12].

Another method of forming a reference bunch of vectors was considered – using a theodolite. A Leica TS30 total station 1 was used as a theodolite (angle measurement error – 0.5"). The device

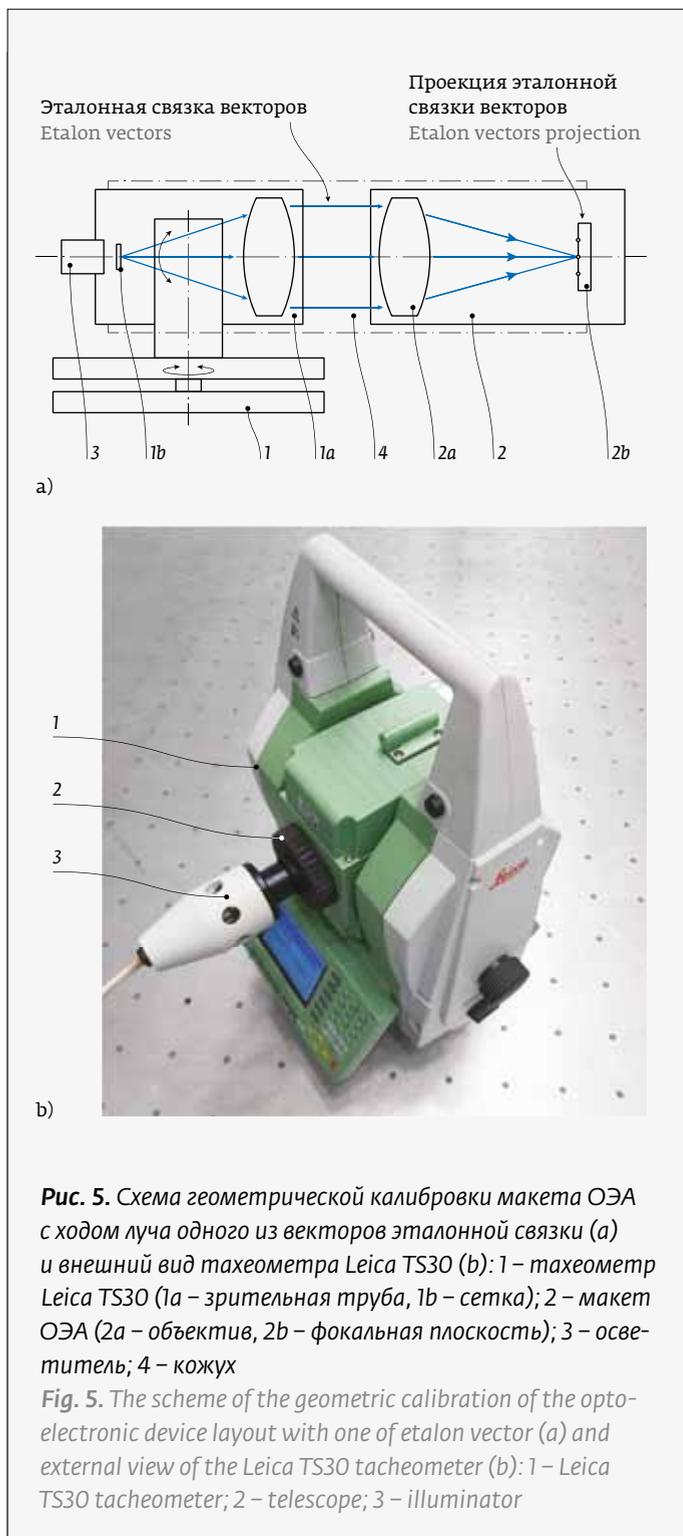
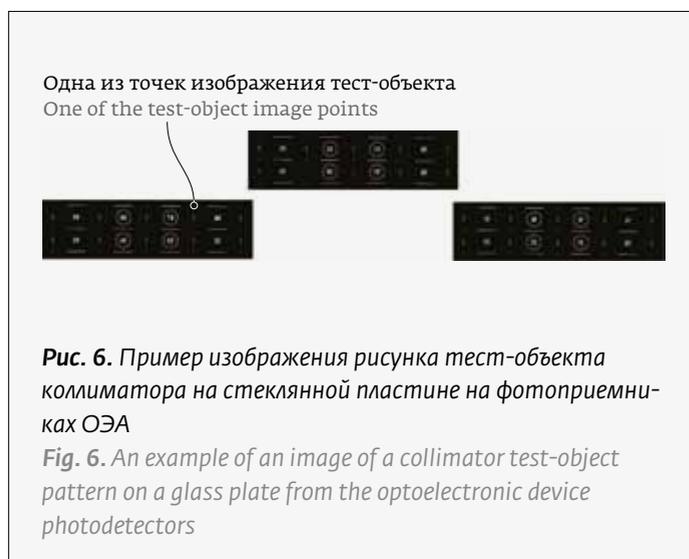


Рис. 5. Схема геометрической калибровки макета ОЭА с ходом луча одного из векторов эталонной связки (а) и внешний вид тахеометра Leica TS30 (b): 1 – тахеометр Leica TS30 (1а – зрительная труба, 1b – сетка); 2 – макет ОЭА (2а – объектив, 2b – фокальная плоскость); 3 – осветитель; 4 – кожух

Fig. 5. The scheme of the geometric calibration of the opto-electronic device layout with one of etalon vector (a) and external view of the Leica TS30 theodolite (b): 1 – Leica TS30 theodolite; 2 – telescope; 3 – illuminator

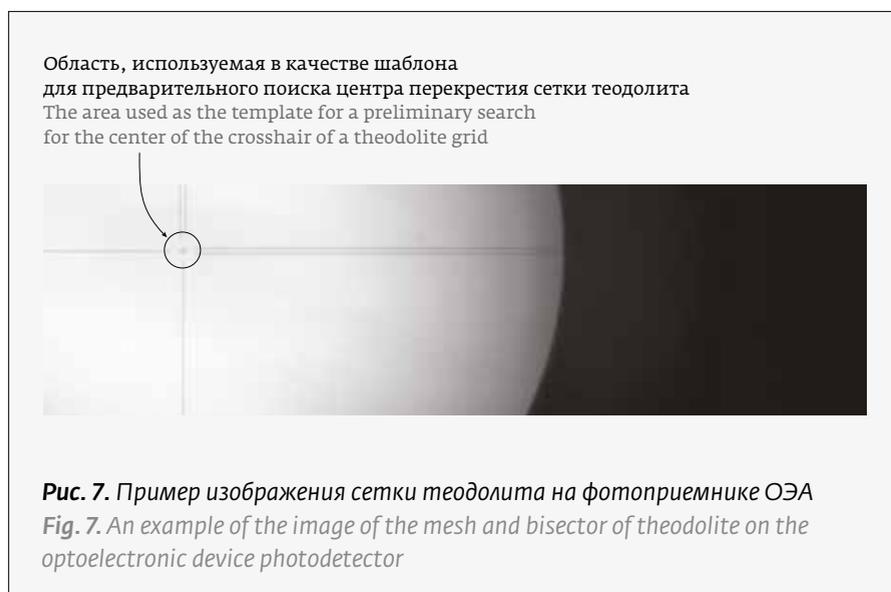


ного положения и переодической структуры пикселей во время калибровки были приближены к рабочему.

Коллиматор поворачивается вокруг своей оптической оси на 180° для устранения систематической погрешности, связанной с коллиматором, тест-объектом на стеклянной подложке или DMD. Аналогичные измерения повторяются для положения коллиматора, повернутого на 180° .

Описание методики получения изображений перекрестия теодолита

Зрительную трубу 2 (рис. 5) теодолита 1 и калибруемый ОЭА визуально выставляются соосно. Обеспечивается освещенность фотоприемника ОЭА 80–90% величины его емкости насыщения.



is installed in the circuit (Fig. 4) instead of the collimator 1 and illuminator 3. Instead of a standard eyepiece, a specially designed illuminator 3 is placed in the spotting scope 2 of the Leica TS30 total station 1 for an adjustable level of illumination of the spotting scope reticle.

In the presented in Fig. 2, 4 and 5 geometric calibration schemes have heating elements: illuminators, photodetectors. During the calibration process, illuminators and photodetectors heat up their environment, which leads to the appearance of a refractive index gradient. In addition, air flows from cooling systems may appear in the room. These factors lead to the fact that in the optical path of the geometric calibration scheme, the projected beams can deviate by some amount. To reduce this effect, the optical path is closed by a casing made of a porous material of the spunbond type with a density of not more than 17 g/m^2 . The casing is installed in such a way that the parts of the illuminator and the OED model that are heated and not included in the optical path of the calibration circuit are open. This is necessary for the free removal of the heat generated by them during calibration. The casing must be porous to ensure heat removal from the optical path, as well as to eliminate the stagnation of air masses. To reduce the effect of vibrations, the equipment included in the geometric calibration scheme, placed on a vibration isolation table.

METHOD FOR OBTAINING IMAGES OF TEST OBJECTS

The collimator with a test object in the form of a glass plate or DMD, the OED to be calibrated, and the illuminator are visually aligned. A test object drawing with the required period and point size is loaded into the DMD. Illumination is selected taking into account the integrated sensitivity of the photodetector and the charge accumulation time of the photodetector is selected so that the signal in ADC units is at the level of 80–90% of the digitization maximum (to increase the signal-to-noise ratio). This is necessary for accurate calculation of the centers of point images. It also excludes the region (more than 90% of the

Линейными перемещениями теодолит выставляется соосно с ОЭА, чтобы разница освещенности по всей фокальной плоскости ОЭА была не более 10–20%. Зрительная труба теодолита последовательно поворачивается таким образом, чтобы спроецировать и произвести съемку сетки теодолита (рис. 7) на каждый фотоприемник ОЭА в 15 различных равномерно расположенных участках аналогично расположению точек на рис. 6 для тест-объекта коллиматора.

Зрительная труба теодолита переводится через зенит, теодолит поворачивается на 180° в плоскости горизонта для устранения систематической погрешности теодолита. Измерения аналогично повторяются для нового положения теодолита.

Особенности математической обработки изображений для тест-объекта

Первоначально определяются координаты проекций эталонной связки векторов на фотоприемники путем вычисления энергетических центров тяжести точек изображения тест-объекта, то есть по распределению яркости в изображении. Для снижения влияния шумов значения сигнала в каждом пикселе возводятся в квадрат [13]. Для снижения влияния на точность вычисления координат энергетического центра тяжести точек фонового сигнала вводился порог, значения сигнала ниже которого принимались «0» [14]. Затем определяются невязки проекции эталонной связки векторов (теоретической) и проекции эталонной связки векторов (фактической) на фотоприемники ОЭА. Невязки входят в систему линейных алгебраических уравнений, решение которых методом наименьших квадратов будет уточнять ЭВО ОЭА [8]: взаимное расположение фотоприемников, фотограмметрическое фокусное расстояние и коэффициенты, описывающие дисторсию объектива. То, насколько правильно уточненные ЭВО ОЭА уменьшают невязки, определяет точность калибровки – среднеквадратическое отклонение (СКО), вычисленное по нескомпенсированным невязкам.

Особенностью калибровки ОЭА с использованием тест-объекта, сформированного DMD, является предварительная подготовка шаблона рисунка тест-объекта. Для этого перед проведением калибровки формируется изображение в любом математическом пакете с требуемым периодом и размером точек. Значения пикселей в формируемом изображении, которые будут выступать для формирования эталонной связки векторов, задаются равными «1», осталь-

maximum signal level), which is characterized by the greatest non-linearity of the photodetector.

For DMD, if the adjustment range of the illuminator current is insufficient, several layers of the Folarex HS 1x matt 140 matte film are installed in the lighting system 3 (Fig. 4), which scatters light like milk glass, reduces the luminous flux by ~50% and makes it uniform. Picked up operating frequency of the DMD micromirrors together with the value of the illuminator supply current in such a way that no flickering is observed due to the error of the non-synchronization of the operation of individual micromirrors or blocks of DMD micromirrors and due to the inconsistency in the frequency of operation of the DMD and the OED photodetector.

According to the image on the OED photodetectors, the pattern of the test object is located in the center of the focal plane of the collimator (Fig. 5). A matrix of 15 points is projected onto each OED photodetector (5 horizontal and 3 vertical) drawing of the test object of the collimator.

Filming is in progress the operating time mode of the OED, so that the heating of the photodetectors and, accordingly, the change in their mutual spatial position and the periodic structure of the

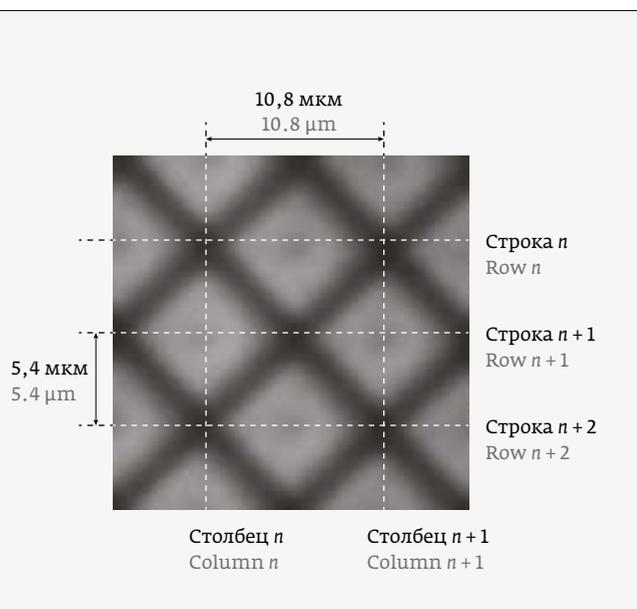


Рис. 8. Нумерация и период строк и столбцов диагональной структуры микрзеркал DLP LightCrafter 4500

Fig. 8. Numbering and period of rows and columns of the diagonal structure of DLP LightCrafter 4500 micromirrors

ные – «0». Учитывается период счета для строк в 2 раза меньший, чем для столбцов, а также то, что программное обеспечение DLP LightCrafter 4500 преобразовывает ортогональное изображение в диагональное, соответствующее структуре микрозеркал, показанной на рис. 8.

Особенности математической обработки изображений перекрестия теодолита

Поскольку изображение сетки теодолита проецируется на все фотоприемники не одновременно, а на изображении существуют значительные перепады освещенности, не связанные с изображением перекрестия сетки, то осуществляется приблизительный поиск перекрестия на всем изображении путем вычисления кросс-корреляции [15] между шаблоном перекрестия сетки теодолита и изображением с фотоприемника ОЭА (рис. 7). В качестве шаблона используется предварительно вырезанная область изображения со всего фотоприемника ОЭА. Далее производится точное вычисление координат энергетического центра тяжести перекрестия и ЭВО аналогично, как и для тест-объекта, установленного в фокальной плоскости коллиматора.

Сравнение результатов по точности

Результаты калибровки в системе координат фокальной плоскости макета ОЭА: проекции эталонной связки векторов и некомпенсированные

pixels during the calibration were close to the working one.

The collimator rotates 180° around its optical axis to eliminate the systematic error associated with the collimator, test object on a glass substrate or DMD. Similar measurements are repeated for the position of the collimator rotated by 180°.

Description of the Theodolite Crosshair Imaging Technique

The spotting scope 2 (Fig. 5) of the theodolite 1 and the calibrated OED are visually aligned coaxially. The illumination of the OED photodetector is provided by 80–90% of the value of its saturation capacitance. By linear movements, the theodolite is set coaxially with the OED, so that the difference in illumination over the entire focal plane of the OED is no more than 10–20%. The theodolite spotting scope is sequentially rotated in such a way as to project and shoot the theodolite grid (Fig. 7) onto each OED photodetector in 15 different evenly spaced sections, similar to the arrangement of points in Fig. 6 for the collimator test object.

The spotting scope of the theodolite is translated through the zenith, the theodolite is rotated 180° in the horizon plane to eliminate the systematic error of the theodolite. The measurements are similarly repeated for the new position of the theodolite.

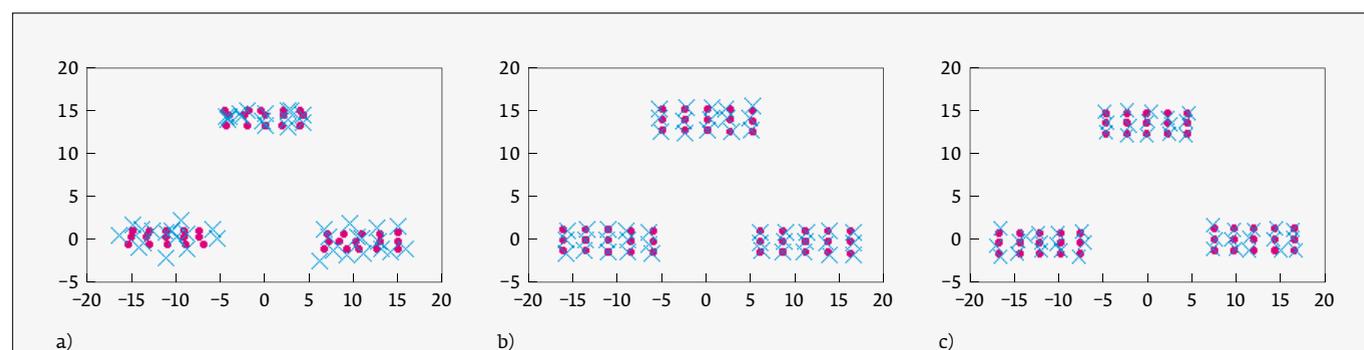


Рис. 9. Графическое представление погрешности калибровки в системе координат фокальной плоскости макета ОЭА, мм: а – тахеометром; б – коллиматором с рисунком тест-объекта, нанесенным на стеклянную подложку; в – коллиматором с рисунком тест-объекта сформированным DLP LightCrafter 4500 (● – проекции эталонной связки векторов, × – некомпенсированные невязки увеличенные в 2000 раз для наглядности)

Fig. 9. A graphic representation of the calibration accuracy. The coordinate system of the focal plane of the optoelectronic device layout, mm: a – by a tacheometer; b – by a collimator with a test-object pattern applied to a glass substrate; c – by a collimator with a test-object pattern formed by DLP LightCrafter 4500 (● – projections of etalon vectors, × – uncompensated residuals magnified by 2000 times for clarity)

Таблица 2. Погрешность геометрической калибровки макета ОЭА

Table 2. The geometric calibration accuracy of the optoelectronic device layout

Погрешность Error	Способ задания эталонной связки векторов для тест-объекта с рисунком в виде Method of specifying a reference bunch of vectors for a test object with a pattern in the form		
	перекрестия crosshairs	массива точек point array	
		тахеометр Leica TS30 Leica TS30 total station	на стеклянной подложке on a glass substrate
Фотограмметрического фокусного расстояния (3σ), мм Photogrammetric focal length (3σ), mm	0,0207	0,0048	0,0183
Геометрической калибровки (3σ), " Geometric gauge (3σ), "	0,48	0,21	0,09

невязки (рис. 9). Для наглядности некомпенсированные невязки увеличены в 2000 раз. Отсутствие одновременного смещения всех невязок для какого-либо фотоприемника характеризует достоверное определение его положения, отсутствие подушкообразного расположения невязок – достоверное определение коэффициентов, описывающих дисторсию объектива. Видно, что невязки носят случайный характер, для случая с тахеометром – в большей степени.

Погрешность геометрической калибровки макета ОЭА в зависимости от способа формирования эталонной связки векторов представлена в табл. 2.

Погрешность определения фотограмметрического фокусного расстояния в ~4 раза больше при использовании тахеометра Leica TS30 по сравнению с тест-объектом, нанесенным на стеклянную подложку. Это обусловлено необходимостью вручную изменять положение зрительной трубы для проецирования перекрестия сетки по всей фокальной плоскости макета ОЭА, что приводит к увеличению времени калибровки, которое составило более 1,5–2 ч. – это больше, чем для тест-объекта на стеклянной подложке и DLP LightCrafter 4500 в 4 раза. За это время фотоприемники макета ОЭА нагреваются и соответственно изменяют свое взаимное пространственное положение и периодическую структуру пикселей. Погрешность определения фотограмметрического фокусного расстояния также больше при использовании DLP LightCrafter 4500 из-за нагрева DMD, которого нет при использовании тест-объекта на стеклянной подложке.

Погрешность геометрической калибровки больше при использовании тахеометра Leica TS30. Это обусловлено погрешностью единичного

Peculiarities of Mathematical Image Processing for a Test Object

Initially, the coordinates of the projections of the reference bunch of vectors on the photodetectors are determined by calculating the energy centers of gravity of the image points of the test object, that is, by the distribution of brightness in the image. To reduce the effect of noise, the signal values in each pixel are squared [13]. To reduce the influence on the accuracy of calculating the coordinates of the energy center of gravity of the points of the background signal, a threshold was introduced, the signal values below which were taken as “0” [14]. Then the residuals of the projection of the reference bunch of vectors (theoretical) and the projection of the reference bunch of vectors (actual) on the OED photodetectors are determined. Residuals are included in the system of linear algebraic equations, the solution of which by the least squares method will refine the EIO of the OED [8]: mutual arrangement of photodetectors, photogrammetric focal length and coefficients describing lens distortion. The extent to which the corrected EIO of the OED reduce the residuals determines the accuracy of the calibration, root-mean-square deviation (RMSD) calculated from the uncompensated residuals.

A feature of the OED calibration using a test object formed by DMD, is the preliminary preparation of the test object pattern template. To do this, before calibration, an image is formed in any mathematical package with the required period and point size. The pixel values in the generated image, which will act to form the reference bunch of vectors, are set equal to “1”, the rest is “0”. It takes into account the counting period for rows 2 times smaller than for columns, as well as the fact

измерения углов тахеометра Leica TS30 в диапазоне 0–360°, которая составила 0,5" (σ), дискретность – 0,1". Предполагается, что эта величина включает как систематическую, так и случайную погрешности. Общую погрешность удалось уменьшить в 3 раза. За счет большого количества измерений (всего 90) удалось снизить случайную погрешность. Измерением малых углов в диапазоне нескольких градусов, переводом через зенит зрительной трубы и поворотом тахеометра на 180° в плоскости горизонта удалось уменьшить систематическую. Основной вклад в погрешность геометрической калибровки при использовании тест-объекта на стеклянной подложке и DLP LightCrafter 4500 вносит погрешность технологии их изготовления, для DLP LightCrafter 4500 такая погрешность меньше в 2 раза.

ВЫВОДЫ

Предложен метод геометрической калибровки ОЭА с длиннофокусным объективом и универсальный способ задания эталонной связки векторов на основе DMD-устройств, устанавливаемых в фокальной плоскости коллиматора, в которых в качестве измерительной шкалы используется массив микрозеркал DMD с точной равномерной пространственной структурой, позволяющей электронным образом сформировать тест-объект любой формы и размеров с имитацией в реальных условиях бесконечно удаленного предмета. Предложенный метод калибровки демонстрирует результаты, по точности не хуже, чем метод калибровки с использованием теодолита и тест-объекта в виде массива точек на стеклянной подложке.

REFERENCES

1. **Lobanov A. N., Burov M. I., Krasnopedcev B. V.** *Fotogrammetriya*. – Moskva: Nedra. 1987. 308p.
Лобанов А. Н., Буров М. И., Краснопевцев Б. В. *Фотограмметрия*. – Москва: Недра. 1987. 308 с.
2. **Semencov A. V., Nikitin V. N.** *Sravnienie rezul'tatov kalibrovki kamer, poluchennyh s ispol'zovaniem razlichnyh metodik i modelej distorsii. Interekspo GEO-Sibir'*. 2015; 4(1):17–23.
Семенов А. В., Никитин В. Н. Сравнение результатов калибровки камер, полученных с использованием различных методик и моделей дисторсии. *Интерэкспо. GEO-Сибирь*. 2015; 4(1):17–23.
3. **Arhipov S. A., Gasich G. V., Zavarzin V. I., Morozov S. A.** *Fotogrammetricheskie parametry optiko-elektronnoj apparatury. Vestnik MGTU im N. E. Baumana. Ser. Priborostroenie*. 2008; 4: 105–115.
Архипов С. А., Гасич Г. В., Заварзин В. И., Морозов С. А. Фотограмметрические параметры оптико-электронной аппаратуры. *Вестник МГТУ им Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2008; 4: 105–115.
4. **Jin Li, Zilong Liu.** *Optical focal plane based on MEMS light lead-in for geometric camera calibration. Microsystems & Nanoengineering*. 2017;3(17058):1–7. DOI: 10.1038/micronano.2017.58.
5. **Stirling Scholes, Ravin Kara, Jonathann Pinnell, Valeria Rodriguez-Fajardo, Andrew Forbes.** *Structured light with digital micromirror*

that the DLP software LightCrafter 4500 converts an orthogonal image to a diagonal one, corresponding to the micromirror structure shown in fig. eight.

Peculiarities of Mathematical Processing of Images of Theodolite Crosshairs

Since the image of the theodolite grid is not projected onto all photodetectors simultaneously, and there are significant differences in illumination on the image that are not associated with the image of the grid crosshair, an approximate search for the crosshair is carried out on the entire image by calculating the cross-correlation [15] between the crosshair template of the theodolite grid and the image from the OED photodetector (Fig. 7). A pre-cut image area from the entire OED photodetector is used as a template. Next, the exact calculation of the coordinates of the energy center of gravity of the crosshairs and EIO is carried out in the same way as for the test object installed in the focal plane of the collimator.

Comparison of Results in Terms of Accuracy

Calibration results in the coordinate system of the focal plane of the OED layout: projections of the reference bunch of vectors and uncompensated residuals (Fig. 9). For clarity, the uncompensated residuals are magnified by a factor of 2000. The absence of a simultaneous shift of all residuals for any photodetector characterizes a reliable determination of its position, the absence of a pincushion arrangement of residuals – a reliable determination of the coefficients describing the lens distortion. It can be seen that the residuals are random in nature, for the case with a total station to a greater extent.

The error of the geometric calibration of the OED layout, depending on the method of forming the reference bunch of vectors, is presented in Table 2.

The error in determining the photogrammetric focal length is ~4 times greater when using a Leica TS 30 total station compared to a test object deposited on a glass substrate. This is due to the need to manually change the position of the spotting scope to project the reticle crosshairs over the entire focal plane of the OED layout, which leads to an increase in the calibration time, which was more than 1.5–2 hours, which is more than for a test object on a glass substrate and DLP LightCrafter 4500 4 times. During this time, the photodetectors of the OED layout heat up and, accordingly, change their mutual spatial position and the periodic structure of pixels. The error in determining the photogrammetric focal length is also greater when using DLP



- devices: a guide to best practice. *Optical Engineering*. 2019; 59(4):041202. DOI: 10.1117/1.OE.59.4.041202.
- Wei Zhang, Weishi Li, Liandong Yu, Hui Luo, Huining Zhao, Haojie Xia. Subpixel projector calibration method for fringe projection profilometry. *Opt. Express* 2017;25: 19158–19169.
 - DLP® Technology and Products. *Literature Number: DLPB010E – Q2 2016*.
 - Starasotnikov N. O., Podskrebkin I. V., Feodortsau R. V. Metodika opredeleniya elementov vnutrennego orientirovaniya mnogomatrixnyh optikoelektronnyh apparatov. *Nauka i tekhnika*. 2020; 3: 55–64. Старосотников Н. О., Подскребкин И. В., Федорцев Р. В. Методика определения элементов внутреннего ориентирования многоматричных оптоэлектронных аппаратов. *Наука и техника*. 2020; 3: 55–64.
 - Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH. DWL 66+ *The Ultimate Photolithography Tool*. Brochure. 09. 2019.
 - Plebanovich V. I. Bezmaskovaya litografiya – trebovanie segodnyashnego dnya. *Elektronika NTB*. 2015;7: 112–118. Плебанович В. И. Безмасковая литография – требование сегодняшнего дня. *Электроника НТБ*. 2015;7: 112–118.
 - Renishaw plc. *High-precision laser interferometer feedback systems*. Brochure. Issued 0112 L-9904-2496-04-A.
 - TI DLP® LightCrafter™ 4500. *Evaluation Module. User's Guide*. Literature Number: DLP011F July 2013 – Revised July 2017.
 - Starasotnikov N. O., Feodortsau R. V. Srovnienie po tochnosti algoritmov opredeleniya koordinat centrov izobrazhenij v optiko-elektronnyh priborah. *Nauka i tekhnika*. 2018;17(1):79–86. DOI:10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86. Старосотников Н. О., Федорцев Р. В. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в опτικο-электронных приборах. *Наука и техника*. 2018;17(1):79–86. DOI:10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86.
 - Starasotnikov N. O., Feodortsau R. V. Metod snizheniya vliyaniya shumov fonovogo signala pri opredelenii koordinat energeticheskogo centra tyazhesti izobrazheniya v OEP. *Materialy 9-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheckoj konferencii "Priborostroenie-2016" 23–25 noyabrya 2016 g.* – Minsk: BNTU. 2016; 133–135. Старосотников Н. О., Федорцев Р. В. Метод снижения влияния шумов фонового сигнала при определении координат энергетического центра тяжести изображения в ОЭП. *Материалы 9-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2016» 23–25 ноября 2016 г.* – Минск: БНТУ. 2016; 133–135.
 - Lewis J. P. Fast Normalized Cross-Correlation. *Vision Interface*. 1995; 120–123 <http://scribblethink.org/Work/nvisionInterface/nip.pdf?browser=Flhelp>.

ОБ АВТОРАХ

Старосотников Николай Олегович – инженер-исследователь (Республика Беларусь, г. Минск, ОАО «Пеленг», НКУ «Космос»; e-mail: starasotnikau@peleng.by; аспирант, приборостроительный факультет, кафедра «Лазерная техника и технология», Белорусский национальный технический университет (Республика Беларусь, г. Минске mail: starasotnikau@gmail.com).

Федорцев Ростислав Валерьевич – к. т. н., доцент, приборостроительный факультет, кафедра «Лазерная техника и технология», Белорусский национальный технический университет Республика Беларусь, г. Минск, e-mail: feodrw@gmail.com.

ВКЛАД АВТОРОВ

Старосотников Н. О. – идея, организация и проведение экспериментов, обработка результатов; Федорцев Р. В. – обсуждения, предложения и замечания. Эксперименты проведены в ОАО «Пеленг».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

LightCrafter 4500, due to DMD heating, which is not present when using a test object on a glass substrate.

Geometric calibration error is greater when using a Leica TS 30 total station. This is due to the error of a single measurement of the angles of the Leica TS 30 total station in the range of 0–360° was 0.5" (σ), discreteness was 0.1". It is assumed that this value includes both systematic and random errors. The overall error was reduced by 3 times. Due to the large number of measurements (90 in total), it was possible to reduce the random error. Measurements of small angles, in the range of several degrees, transfer through the zenith of the spotting scope and rotation of the total station by 180° in the horizon plane managed to reduce the systematic. The main contribution to the geometric calibration error when using a test object on a glass substrate and DLP LightCrafter 4500 introduces an error in their manufacturing technology, for DLP LightCrafter 4500 error is 2 times less.

CONCLUSIONS

The proposed method of geometric calibration of OED with a long-focus lens and a universal method for setting a reference bunch of vectors based on DMD devices installed in the focal plane of the collimator, in which an array of DMD micromirrors with an accurate uniform spatial structure is used as a measuring scale, which makes it possible to electronically form a test object of any shape and size with an imitation of an infinitely distant object in real conditions. The proposed calibration method demonstrates results that are no worse in accuracy than the calibration method using a theodolite and a test object in the form of an array of points on a glass substrate.

ABOUT AUTHORS

Starasotnikau Mikalai Alegavich – Research Engineer (Republic of Belarus, Minsk, Peleng JSC, Kosmos NCU; e-mail: starasotnikau@peleng.by, Technical University (Republic of Belarus, Minsk e-mail: starasotnikau@gmail.com).

Feodortsau Rastislav Valerievich – Cand. of Sciences (Engineer), Associate Professor, Instrumentation Engineering Faculty, Laser Devices and Technology Department, Belarusian National Technical University, Republic of Belarus, Minsk, e-mail: feodrw@gmail.com.

CAUTHORS' CONTRIBUTION

Starasotnikau M. A. – concept, organization and conduct of experiments, processing of results; Feodortsau R. V. – discussions, suggestions and comments. The experiments were carried out at Peleng JSC.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.



FLAMN-22

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ
«Фундаментальные основы лазерных микро- и нанотехнологий»
Санкт-Петербург, Россия



27-30
/06
2022

Симпозиум включает **2** секции:

- Лазерные Микро- и Нанотехнологии,
- Взаимодействие лазерного излучения с веществом

2 специальных научных мероприятия:

- Научная школа для молодых исследователей, инженеров и студентов «Лазерные/оптические системы и технологии»
- 3-я международная научная школа «Биомедицинские лазерные технологии»

6 специальных сессий:

- Surface functionalization and related phenomena.
- Laser-induced plasma- surface phenomena and related technologies (LIFT, LIPAA, CLIMP etc.).
- Physical foundations of laser technologies for nanophotonic and nanoscale systems.
- Ultrafast Laser-Matter Interaction & Technologies.
- Laser-based approaches in Art & Science
- Industrial applications of lasers.

Рабочий язык – английский
Контакты: +7 (911) 085 90 39
E-mail: flamn@itmo.ru



20-22 сентября
Санкт-Петербург
Solo Sokos Hotel
Palace Bridge

ХІХ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ГОЛОГРАФИИ И ПРИКЛАДНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ТЕХНОЛОГИЯМ

HOLOEXPO Science & Practice пройдет в обновленном формате, который предусматривает изменения в программе мероприятия, расширение тематики и состава участников. Изменения уже отразились в названии конференции. Новое название HOLOEXPO Science & Practice раскрывает главную цель конференции – объединить научное сообщество и производственные компании для обсуждения новых разработок, выявления и практической реализации перспективных технологий в области голографии и прикладной оптики.

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ

В программу конференции добавлены новые тематические секции, среди которых: управление параметрами лазерного излучения, динамическая голография, микрооптика и метаматериалы и др. Выступления будут разделены на два параллельных потока, что даст возможность выбрать секцию в соответствии с вашими научными интересами. А главное – обсудить более широкий спектр вопросов. Дополнительно на конференции запланированы семинары, которые пройдут во вторник, 20 сентября, накануне основной деловой программы.

НЕФОРМАЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

В первый день конференции пройдет вечерний коктейль, на котором будет можно поприветствовать старых друзей и установить новые деловые знакомства в непринужденной атмосфере. Традиционно состоится вручение наград Оптического общества имени Д.С. Рождественского, а в заключительный день – гала-ужин.

РЕГИСТРАЦИЯ И ПРИЕМ ДОКЛАДОВ

Регистрация и прием заявок для выступления с докладом доступны на сайте конференции www.holoexpo.ru.
При ранней регистрации до 20 мая 2022 г. предусмотрены значительные скидки.