

## АДАПТАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОИСКА КООРДИНАТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ИЗОБРАЖЕНИЯ АВТОКОЛЛИМАЦИОННОЙ ТОЧКИ ДЛЯ РАБОТЫ С ЦИФРОВЫМ АВТОКОЛЛИМАТОРОМ

С.В. Мишин<sup>1</sup>, Н.Н. Кулакова<sup>2</sup>, А.В. Тарасишин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Красногорский механический завод им. С.А. Зверева, Красногорск,  
Московская обл., Российская Федерация  
e-mail: SvyatoslawMishin@yandex.ru

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: nnkulakova@gmail.com

*Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на качество изображения оптических систем, является децентрировка оптических поверхностей и линз в целом, которая неизбежно возникает при механической обработке линз и установке оптических компонентов в оправы. В связи с этим определение погрешностей центрирования является одним из важнейших этапов в изготовлении оптических систем. В настоящее время необходима разработка отечественных автоматизированных приборов для высокоточного измерения погрешностей центрирования. Цель настоящей работы — адаптация алгоритма для определения координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки для работы с цифровым автоколлиматором. Автоматизация процесса измерения децентрировки существенно повысит точность контроля и его производительность, что позволит наглядно отображать результаты контроля для их дальнейшего анализа.*

**Ключевые слова:** автоколлиматор, децентрировка, алгоритм, энергетический центр, измерение, автоматизация.

## ADAPTATION OF THE ALGORITHM FOR SEARCHING THE COORDINATES OF THE ENERGY CENTRE IN THE IMAGE OF AN AUTOCOLLIMATING POINT FOR WORKING WITH DIGITAL AUTOCOLLIMATOR

S.V. Mishin<sup>1</sup>, N.N. Kulakova<sup>2</sup>, A.V. Tarasishin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Krasnogorskiy Zavod (Zverev Mechanical Plant), Krasnogorsk,  
Moscow Region, Russian Federation  
e-mail: SvyatoslawMishin@yandex.ru

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: nnkulakova@gmail.com

*One of the most significant factor affecting the image quality of optical systems is decentering of optical surfaces and lenses as a whole, which inevitably occurs when machining and installing optical lens components in the frame. For that reason, error determination in the process of centering is a vital step in the optical systems manufacture. At the present time, it is necessary to develop domestic automation equipment for high-precision measurement of centering errors. The purpose of this work was to adapt the algorithm to determine the coordinates of the energy center*

*of the autocollimating point image for working with the digital autocollimator. The automation of the decentring measurement process will significantly increase the accuracy and control of its performance, which will make it possible to clearly display the monitoring results for further analysis.*

**Keywords:** autocollimator, decentring, algorithm, energy center, measuring, automatization.

При изготовлении оптических систем неизбежна децентрировка оптических поверхностей, которая возникает при механической обработке линз и установке оптических компонентов в оправы. При этом оптическая ось линзы, проходящая через центры кривизны сферических поверхностей, не совпадает с осью, определяемой базовыми поверхностями линзы.

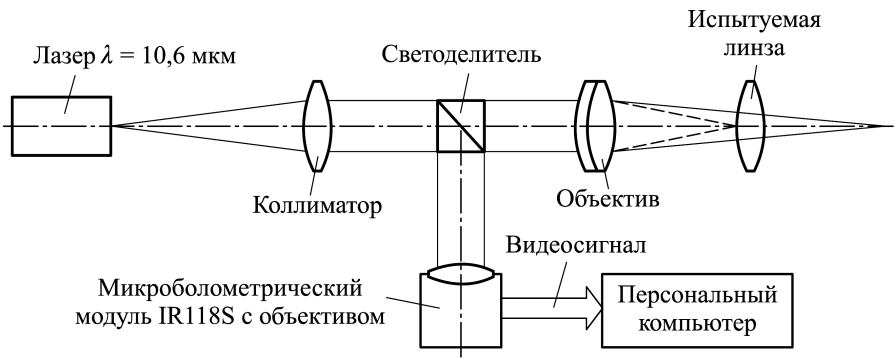
Децентрировка вызывает появление дополнительных aberrаций, ухудшающих качество изображения. На основании данных контроля децентрировки линз в дальнейшем оценивают возможные способы крепления линз, т.е. выбирают базовые поверхности и поверхности посадки для установки линз в оправы и оправ в корпус, обоснуют необходимость введения юстировочных подвижек элементов.

В настоящее время линзы диаметром до 200 мм составляют 95...98% общей номенклатуры оптических деталей. Одним из широко используемых способов контроля децентрировок таких линз является автоколлимационный способ. Он позволяет найти смещение центра кривизны поверхности линзы с оси вращения, определяемой базовыми поверхностями линзы. Данный способ используется в широком классе контрольно-юстировочных приборов, построенных по схеме автоколлимационной трубки А.А. Забелина [1–3]. Автоколлимационный способ применяют для контроля центрировки одиночных и склеенных линз, клиновидности клеящего слоя, перпендикулярности опорного торца линзы или оправы к базовой оси линзы.

В промышленности наибольшее распространение получили отечественные автоколлимационные трубки ЮС-13, ЮС-13М, ПК-654 и Т-198. Их можно использовать непосредственно на центрировочных станках, которые обеспечивают точность измерения погрешностей центрирования 0,01...0,05 мм.

Среди зарубежных аналогов наиболее известны такие приборы, как Trioptics Opticentric 3D, OTS 200, OTS 500, Centering Scope CS-A1100 [4, 5]. По сравнению с ними отечественные приборы имеют следующие недостатки: отсутствие автоматизации процесса измерения децентрировки; низкая точность контроля, которая уже не удовлетворяет современным требованиям оптического производства; невозможность контроля линз, непрозрачных в видимой области спектра.

В настоящее время сложилась необходимость в разработке отечественных автоматизированных приборов для высокоточного измерения децентрировки. Актуальность данной задачи опирается на современную экономическую политику РФ.



**Рис. 1.** Схема макета прибора для измерения децентрировки линз

Целью настоящей работы является адаптация алгоритма для определения координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки для работы с цифровым автоколлиматором. Автоматизация процесса измерения децентрировки существенно повысит точность контроля, его производительность, позволит наглядно отображать результаты контроля для их дальнейшего анализа.

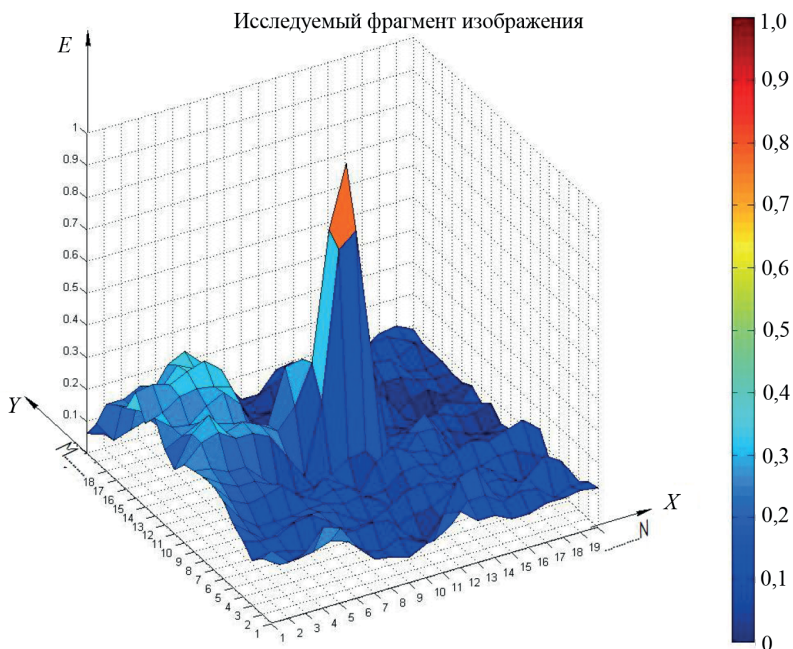


**Рис. 2.** Снимок автоколлимационной точки

Для написания и отладки алгоритма использован макет прибора для измерения погрешности центрирования линзы автоколлимационным методом. Схема макета приведена на рис. 1.

В качестве регистрирующего устройства в схеме макета используется неохлаждаемый микроболлометрический модуль IR118S с объективом. Изображение автоколлимационной точки фиксируется чувствительным сенсором модуля. Аналоговый сигнал с модуля поступает через плату видеозахвата на персональный компьютер, где уже цифровое изображение автоколлимационной точки сохраняется в виде снимка в формате BMP (рис. 2).

Для поиска координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки была выбрана система MATLAB. Главное преимущество этой системы при ее использовании в качестве среды для работы с цифровыми изображениями состоит в разнообразном наборе функций обработки многомерных числовых массивов. Изображение автоколлимационной точки является зависимостью освещенности  $E$  от пространственных координат  $x$  и  $y$  —  $E(x; y)$ . Значения освещенности  $E(x; y)$  будут являться числовым массивом для дальнейшей обработки в системе MATLAB. В системе MATLAB и ее модуле



**Рис. 3. Трехмерное представление изображения автоколлимационной точки в системе MATLAB**

обработки изображений Image Processing Toolbox отсчет начинается с точки  $(x; y) = (1; 1)$  (рис. 3) [6, 7].

Таким образом, исследуемый фрагмент снимка автоколлимационной точки представляется в системе MATLAB в виде матрицы размером  $M \times N$ . В общем виде ее можно записать так:

$$E = \begin{pmatrix} (1; 1) & \dots & (1; N) \\ \vdots & & \vdots \\ (M; 1) & \dots & (M; N) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В трехмерном представлении системы MATLAB анализируемое изображение автоколлимационной точки имеет вид, представленный на рис. 4.

Общий принцип поиска энергетического центра изображения автоколлимационной точки состоит в нахождении координат минимального значения оценочной функции вида

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M=20} \sum_{j=1}^{N=20} (\delta(x_i; y_j))^2}{MN}}, \quad (2)$$

где  $\delta(x_i; y_j) = |E(x_i; y_j) - g(x_i; y_j)|$  — разность между реальным  $E(x_i; y_j)$  и идеальным  $g(x_i; y_j)$  распределениями освещенности

в изображении автоколлимационной точки, вычисленная для каждого пиксела снимка с координатами  $(x_i; y_j)$ ;  $x_i, y_j = 1 \dots 20$  — координаты пиксела снимка, в котором вычисляется разность распределений освещенности.

В случае лазерного источника излучения идеальной функцией рассеяния является гауссоида, описывающая распределение интенсивности в нулевой моде:

$$g(x, y) = e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right]}, \quad (3)$$

где  $(x_0; y_0)$  — координаты центра идеального изображения точки;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — параметры этой функции.

Поиск координат минимума оценочной функции осуществляется путем последовательного перемещения функции Гаусса по всему снимку с шагом 0,5 пиксела. Найденные координаты минимума функции  $\Delta$  принимаются за координаты центра изображения автоколлимационной точки.

Алгоритм определения координат центра изображения автоколлимационной точки состоит из следующих этапов.

1. Загрузить в систему MATLAB сохраненный в формате BMP снимок изображения автоколлимационной точки.

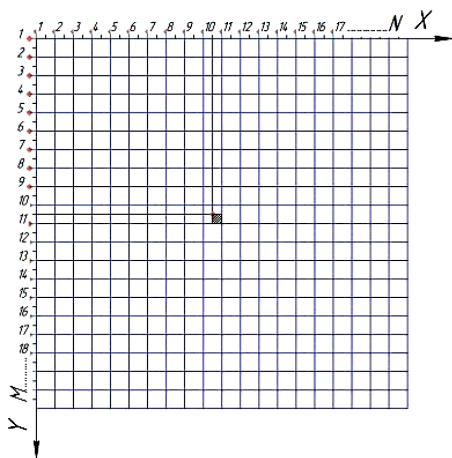
2. Выполнить нормирование уровней освещенности для каждого пиксела изображения автоколлимационной точки с помощью средств среды MATLAB. Получить исходное изображение автоколлимационной точки в виде матрицы:

$$E = \begin{pmatrix} E(1; 1) & \dots & E(1; j) \\ \vdots & & \vdots \\ E(i; 1) & \dots & E(i; j) \end{pmatrix}.$$

3. Задать значения параметров  $\sigma_x = 0,7$  и  $\sigma_y = 0,7$  для функции Гаусса (см. формулу (3)), описывающей идеальное распределение освещенности в изображении автоколлимационной точки.

4. Вычислить разности между реальным и идеальным распределениями освещенности в изображении автоколлимационной точки для каждого пиксела снимка  $(x_i : y_j)$ :  $\delta(x_i; y_j) = |E(x_i; y_j) - g(x_i; y_j)|$ , где

$$g(x_i; y_j) = e^{-\left[\frac{(x_i-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y_j-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right]}, \text{ а } x_i = 1 \dots N, y_j = 1 \dots M.$$



**Рис. 4.** Центр изображения автоколлимационной точки

$$5. \text{ Вычислить оценочную функцию } \Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M=20} \sum_{j=1}^{N=20} (\delta(x_i; y_j))^2}{MN}},$$

где  $x_i = 1 \dots N$ ,  $y_j = 1 \dots M$ .

6. Найти такие значения переменных  $(x_0; y_0)$ , при которых оценочная функция  $\Delta$  принимает минимальное значение. Эти координаты являются искомыми координатам центра изображения автоколлимационной точки.

На рис. 4 показано местоположение найденного с помощью предложенного алгоритма поиска энергетического центра изображения автоколлимационной точки с точностью до 0,5 px. Из рисунка следует, что энергетический центр изображения автоколлимационной точки находится в пикселе с координатами (10; 10), а именно — в IV четверти данного пиксела (заштрихованная область на рис. 4). Для более точного определения искоемых координат необходимо уменьшить значение шага, с которым перемещается аппроксимирующая функция Гаусса по фрагменту изображения.

К достоинствам данного метода стоит отнести его простоту и наглядность. Однако он не лишен следующих недостатков:

а) алгоритм не предусматривает предварительного подавления шумов в изображении. Поэтому пока его можно применять только на малошумных изображениях;

б) большое число итераций.

Дальнейшая работа над алгоритмом предполагает введение предварительной бинаризации и сегментации изображения. Данные операции помогут значительно сократить число итераций при определении координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки и, следовательно, сократить время вычислений и нагрузку на ЭВМ.

Ввиду своей простоты данный алгоритм может быть записан на языках программирования высокого уровня, таких как C++, Java и др. Алгоритм может служить основой для вычислительного программного обеспечения ряда современных цифровых автоколлимационных приборов, позволяющих осуществлять измерения с высокой степенью точности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Экспериментальный анализ инструментальной погрешности измерительного канала оптико-электронной системы контроля поверхностей сложной формы* / Н.В. Барышников, Д.Г. Денисов, И.В. Животовский, В.Е. Карасик, В.Я. Менделеев // Метрология. 2014. № 11. С. 3–15.
2. *Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т.* Оптические измерения / под общ. ред. Д.Т. Пуряева. М.: Машиностроение, 1997. 264 с.

3. *Погарев Г.В.* Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1970. 200 с.
4. *Русинов М.М.* Юстировка оптических приборов. М.: Недра, 1969. 326 с.
5. *Королев А.Н., Гарцуев А.И., Полещук Г.С., Трегуб В.П.* Цифровой автоколлиматор // *Оптический журнал*. 2009. № 10. С. 42–47.
6. *Гонзалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений / пер. с англ. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
7. *Дьяконов В.* MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Спец. справ. СПб.: Питер, 2002. 608 с.

## REFERENCES

- [1] Baryshnikov N.V., Denisov D.G., Zhivotovskii I.V., Karasik V.E., Mendeleev V.Ya. Experimental analysis of instrumental uncertainty in the measurement channel of an optoelectronic system for monitoring surfaces of complex shape. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 57, no. 12, pp. 3–15.
- [2] Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T., ed. by Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya [Optical Measurements]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997. 264 p.
- [3] Pogarev G.V. *Yustirovka opticheskikh priborov [Optical Instrument Alignment]*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1970. 200 p.
- [4] Rusinov M.M. *Yustirovka opticheskikh priborov [Optical Instrument Alignment]*. Moscow, Nedra Publ., 1969. 326 p.
- [5] Korolev A.N., Gartsuev A.I., Poleshchuk G.S., Tregub V.P. A digital autocollimator. *Opticheskiy zhurnal [Journal of Optical Technology]*, 2009, no. 10, pp. 42–47.
- [6] Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
- [7] D'yakonov V. *MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazheniy. Spetsial'nyy spravochnik [Signal and Image Processing. Special reference book]*. St. Petersburg, Piter Publ., 2002. 608 p.

Статья поступила в редакцию 8.07.2015

Мишин Святослав Валерьевич — инженер-конструктор ПАО “Красногорский механический завод им. С.А. Зверева” (Российская Федерация, Московская обл., 143403, Красногорск, Речная ул., д. 8).

Mishin S.V. — Design Engineer of Krasnogorskiy Zavod (Zverev Mechanical Plant) (Rechnaya ul. 8, Krasnogorsk, Moscow Region, 143403 Russian Federation).

Кулакова Надежда Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Kulakova N.N. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Laser and Optic-Electronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Тарасишин Андрей Валентинович — канд. физ.-мат. наук, начальник расчетно-конструкторского отдела оптических систем гражданского и специального назначения ПАО “Красногорский механический завод им. С.А. Зверева” (Российская Федерация, Московская обл., 143403, Красногорск, Речная ул., д. 8).

Tarasishin A.V. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Design Department of optical systems of civil and special purpose, Krasnogorskiy Zavod (Zverev Mechanical Plant) (Rechnaya ul. 8, Krasnogorsk, Moscow Region, 143403 Russian Federation).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Мишин С.В., Кулакова Н.Н., Тарасишин А.В. Адаптация алгоритма поиска координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки для работы с цифровым автоколлиматором // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 2. С. 117–124. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-117-124

**Please cite this article in English as:**

Mishin S.V., Kulakova N.N., Tarasishin A.V. Adaptation of the algorithm for searching the coordinates of the energy centre in the image of an autocollimating point for working with digital autocollimator. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 2, pp. 117–124. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-117-124