



Получено: 17.11.2021 г. | Принято: 29.11.2021 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.66.78>

Научная статья

АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ УГЛОВЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ СЧИТЫВАЮЩЕЙ ГОЛОВКОЙ

Б.Г.Турухано¹, зав. ЛГИИС, Заслуженный изобретатель РФ, ORCID: 0000-0002-6441-4259
Н.Турухано¹, вед. науч. сотр., Заслуженный изобретатель РФ, ORCID: 0000-0001-6983-5725
В.В.Коротаев², руководитель НИЦ, ORCID: 0000-0001-7102-5967
А.С.Васильев², доц., инженер-исследователь, ORCID: 0000-0002-2080-3252
С.Н.Ханов¹, вед. инженер-электронщик, ORCID: 0000-0001-5237-1725
О.Г.Ермоленко¹, вед. инженер-технолог, ORCID: 0000-0002-0460-0746
Д.Л.Константинов¹, студент, ORCID: 0000-0002-3899-8182 / turukhano_bg@pnpi.nrcki.ru

Аннотация. Изучение элементов топологии углоизмерительной структуры оптического диска осуществляется с использованием высокоточных угловых оптико-электронных преобразователей. Для высокоточного определения угловых параметров и других характеристик оптических дисков необходимо дать численную оценку главных составляющих погрешности считывающей головки и определить основные параметры ее узлов. Погрешности определяются с использованием методов цифровой обработки изображения. В связи с тем, что требуемые погрешности имеют субмикронную величину, необходимо учитывать, что оптическая система имеет свой предел разрешающей способности, которая позволит различать отдельные дефекты заданного размера. При достижении последнего захваченного изображения на основе расчетных значений формируется файл-отчет для контролируемой топологии оптического диска, в котором указывают координаты положения штрихов на каждой из дорожек и величину необходимой поправки.

Ключевые слова: угловая погрешность, оптический диск, считывающая головка, обработка экспериментальных данных, кодовые и считывающие лимбы

Для цитирования: Б.Г.Турухано, Н.Турухано, В.В.Коротаев, А.С.Васильев, С.Н.Ханов, О.Г.Ермоленко, Д.Л.Константинов. Анализ составляющих угловых погрешностей при обработке данных считывающей головкой. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 1. С. 66–78. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.66.78>

Received: 17.11.2021 | Accepted: 29.11.2021 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.66.78>

Original paper

ANALYSIS OF THE ANGULAR ERRORS COMPONENTS WHEN PROCESSING DATA BY THE READING HEAD

B.G.Turukhano¹, Head of LGIIS, Honored Inventor of RF, ORCID: 0000-0002-6441-4259
N.Turukhano¹, Leading Researcher, Honored Inventor of RF, ORCID: 0000-0001-6983-5725
V.V.Korotaev², Head of the Research Center, ORCID: 0000-0001-7102-5967
A.S.Vasiliev², Associate Professor, Research Engineer, ORCID: 0000-0002-2080-3252
S.N.Khanov¹, Leading electronics engineer, ORCID: 0000-0001-5237-1725
O.G.Ermolenko¹, Leading Engineer Process Engineer, ORCID: 0000-0002-0460-0746
D.L.Konstantinov¹, student, ORCID: 0000-0002-3899-8182 / turukhano_bg@pnpi.nrcki.ru

¹ ФГБУ "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова" Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Ленинградская обл., г. Гатчина, Россия / Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P.Konstantinov of NRC "Kurchatov Institute"

² Университет ИТМО / ITMO University, Saint Petersburg, Russia



Abstract. A study of the topology elements of the optical disk angle-measuring structure is carried out using high-precision angular optoelectronic converters and a high-resolution reading head. For high-precision determination of angular parameters and other characteristics of optical disks, it is necessary to make a numerical estimate of the main components of the reading head error and determine the main parameters of its nodes. As the required errors have a submicron value, it is necessary to take into account that the optical system has its own resolution limit, which will allow of distinguishing individual defects of a given size. When the last captured image is reached, a report file is generated based on the calculated values for the controlled topology of the optical disk, which specifies coordinates of the stroke positions on each of the tracks and the value of the necessary correction.

Keywords: angular error, optical disk, reading head, treatment of experimental data, code and reading limbs

For citation: B.G.Turukhano, N.Turukhano, V.V.Korotaev, A.S.Vasiliev, S.N.Khanov, O.G.Ermolenko, D.L.Konstantinov. Analysis of the components of angular errors in the data processing of the reading head. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 1. PP. 66–78. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.66.78>

ВВЕДЕНИЕ

Анализ составляющих погрешности считывающей головки

В данной работе исследуются погрешности считывающей головки при сканировании кодовых и считывающих лимбов с помощью датчиков угла оптико-электронных преобразователей и углоизмерительной машины повышенной точности с использованием считывающей головки повышенной точности.

Процессы электронно-лучевой литографии для получения кодовых и считывающих лимбов не имеют ограничений по разрешению и представляются наиболее перспективными [1].

Преимущество данного метода изготовления кодовых и считывающих лимбов заключается не только в их высокой разрешающей способности, но и в возможности автоматизировать процесс их считывания с использованием персонального компьютера, что позволяет значительно повысить производительность труда при формировании и анализе записанной информации.

Другой метод [2] также позволяет получать кодовые и считывающие лимбы высокого нанометрового разрешения.

В связи с тем, что в настоящее время разрешение самих кодовых и считывающих лимбов может достигнуть наноуровня, для изучения элементов топологии углоизмерительных структур необходимо особое внимание обратить на построение самой оптико-электронной системы считывания информации с использованием датчиков угла оптико-электронных преобразователей и углоизмерительной машины со считывающей головкой.

При заданных параметрах считывающей головки предельная погрешность составит не более 0,96".

INTRODUCTION

Analysis of reading head error components

This work studied the scanning errors of the reading head when scanning code and readout limbs with electrooptic angle encoders and an angular measuring machine with increased accuracy using a reading head with enhanced accuracy.

The electron-beam lithography processes for obtaining the code and readout limbs have no resolution limitations and appear to be most promising [1].

The advantage of this method of fabricating the code and reading limbs is not only in their high resolution but also in the ability to automate the reading process using a personal computer, which significantly increases productivity when generating and analysing the recorded information.

The other method [2] also produces coding and reading limbs with high nanoscale resolution.

As nowadays the resolution of code and readout limbs can reach nanoscale levels in order to study the topology elements of angle measuring structures, it is necessary to pay special attention to the construction of electrooptic information reading system itself using angle sensors of electrooptic converters and angle measuring machine with reading head.

With the given reading head parameters, the limiting accuracy will be no more than 0.96".

Selection and calculation of the main parameters of the angle measuring machine reading head elements

For high accuracy determination of the angular parameters and other characteristics of the working samples and photomasks of optical limbs, circular scales, rasters and multi-digit code disks, it is necessary to make a numerical estimation of the basic components of the reading head error, which is a part of the



Выбор и расчет основных параметров элементов считывающей головки углоизмерительной машины

Для высокоточного определения угловых параметров и других характеристик рабочих образцов и фотошаблонов оптических лимбов, круговых шкал, растров и многоразрядных кодовых дисков необходимо дать численную оценку основным составляющим погрешности считывающей головки, входящей в состав углоизмерительной машины. Для определения величины погрешности элементов считывающей головки необходимо определить и задать основные параметры узлов головки.

Главным, определяющим точностным, фактором считывающей головки является линейное увеличение всей оптико-электронной части. Для большинства задач погрешность оптического диска не должна превышать $\pm 0,065$ мкм для углоизмерительных структур диаметром не менее 90 мм, при этом размер неровности края лежит в диапазоне от 0,1 до 0,5 мкм. Обеспечение требуемой погрешности возможно при условии использования методов цифровой обработки изображения дефекта штриха, занимающего на поверхности матричного приемника излучения не менее трех фоточувствительных элементов. Задав размер элемента матричного приемника излучения и величиной размера дефекта, определим требуемое линейное увеличение β считывающей головки по формуле:

$$\beta = \frac{3 \times P_x}{W_s}, \quad (1)$$

где P_x – горизонтальный размер фоточувствительного элемента приемника излучения, мкм; W_s – минимальный размер дефекта штриха, мкм.

Проведенный анализ показал, что в поставленной задаче оптимальным будет использование приемника излучения на основе ПЗС-структуры типа Sony ICX834 с размером чувствительного элемента 3,1 мкм. Для обеспечения требуемой погрешности необходимо реализовать оптическую систему с линейным увеличением 93х.

При заданном линейном увеличении и пространственном разрешении 4330×2854 пикселей приемника излучения за один кадр можно получить наблюдаемое линейное поле размером 144×93 мкм.

В связи с тем, что требуемые погрешности имеют субмикронную величину, необходимо учитывать, что оптическая система имеет предел разрешающей способности, которая позволит различать отдельные дефекты заданного размера. Предельная разрешающая способность Δ , в соответствии с критерием Аббе, определяется формулой:

$$\Delta = \frac{\lambda}{2 \times A_{06}}, \quad (2)$$

angle-measuring machine. To determine the error value of the reading components, it is necessary to determine and specify the basic parameters of the reading head assemblies.

The main and critical factor that defines the reading head accuracy is the linear magnification of the entire electrooptic part. For most tasks the optical disc error should not exceed ± 0.065 μm for angle measuring structures with a minimum diameter of 90 mm, and the edge roughness size in the range of 0.1 to 0.5 μm . The required error can be achieved by using digital image processing methods of the stroke defect, which occupies at least three photosensitive elements on the surface of the matrix radiation receiver. By specifying the element size of the radiation matrix receiver and the defect size, we determine the required linear magnification β of the reading head by the formula:

$$\beta = \frac{3 \times P_x}{W_s}, \quad (1)$$

where P_x - horizontal dimension of the photosensitive element of the radiation receiver, μm ; W_s - minimum dimension of the stroke defect, μm .

The analysis has shown that the optimum solution is to use a Sony ICX834 CCD-based receiver with a 3.1 μm sensing element. An optical system with a linear magnification of 93x has to be implemented in order to provide the required accuracy.

At a given linear magnification and spatial resolution of 4330×2854 pixels of the radiation receiver, an observable linear field of 144×93 μm can be obtained in a single frame.

As far as the required errors are of sub-micron magnitude, it should be considered that the optical system has a limit of resolution that will distinguish individual defects of a given size. The resolution limit Δ , according to the Abbe criterion, is defined by the formula:

$$\Delta = \frac{\lambda}{2 \times A_{06}}, \quad (2)$$

where λ is the operating wavelength; A_{06} is the numerical aperture of the lens.

For a large value of linear magnification, the numerical aperture equals, approximately, a unit. The operating wavelength should be as short as possible and must match the sensitivity of the radiation receiver. In the case of a silicon radiation receiver the maximum sensitivity and quantum efficiency is at a wavelength of 450 nm.

Taking these values into account, the limiting resolution will be 0.22 μm . Therefore, the minimum possible size resolvable by the reading head optical system will be a stroke defect of 0.2 μm . According



где λ – рабочая длина волны; $A_{об}$ – числовая апертура объектива.

Для большого значения линейного увеличения объектива числовая апертура приблизительно равна единице. Рабочая длина волны должна быть минимальна и согласована с чувствительностью приемника излучения. Для случая кремниевого приемника излучения максимум чувствительности и квантовой эффективности приходится на длину волны 450 нм. С учетом этих значений, величина предельной разрешающей способности составит 0,22 мкм. Таким образом, минимально возможным размером, разрешаемым оптической системой считывающей головки, будет дефект штриха 0,2 мкм. Согласно выражению (1), для выбранного приемника полезное линейное увеличение составит $\beta = 50\times$, а размер линейного поля 290×190 мкм.

Еще одной важной составляющей погрешности считывающей головки является динамическая погрешность, обусловленная вращением углоизмерительной структуры в процессе проведения измерений. Динамическая погрешность будет определяться величиной смазывания оптического изображения, которое, в свою очередь, зависит от скорости движения и времени экспонирования фоточувствительных элементов. Для расчета скорости вращения углоизмерительной структуры относительно считывающей головки примем ее максимальный диаметр равным 165 мм. Линейная длина пути внешнего радиуса углоизмерительной структуры составит $S_{уим} = 520$ мм. С учетом линейного увеличения оптической системы $50\times$, размера наблюдаемого линейного поля $H \cdot V = 290 \times 190$ мкм, а также максимально возможной частоты захвата кадров $f_{ps} = 7$ кадров/с получим, что для заданного линейного поля необходимо выполнить соотношение

$$N_F = \frac{S_{уим}}{H} = 1800 \text{ кадров.}$$

Время, необходимое

для захвата такого количества кадров, равно

$$t = \frac{N_F}{f_{ps}} = 260 \text{ с.}$$

В этом случае необходимая средняя

скорость для считывания дорожки на максимально возможном радиусе углоизмерительной структуры составит $v = 2$ мм/с, а угловая скорость вращения равна $\omega = 0,024$ рад/с = 1.4 град/с.

Погрешности от наклона фотоприемного блока считывающей головки

Одним из источников погрешности считывающей головки является систематическая погрешность, обусловленная наклоном установки матричного

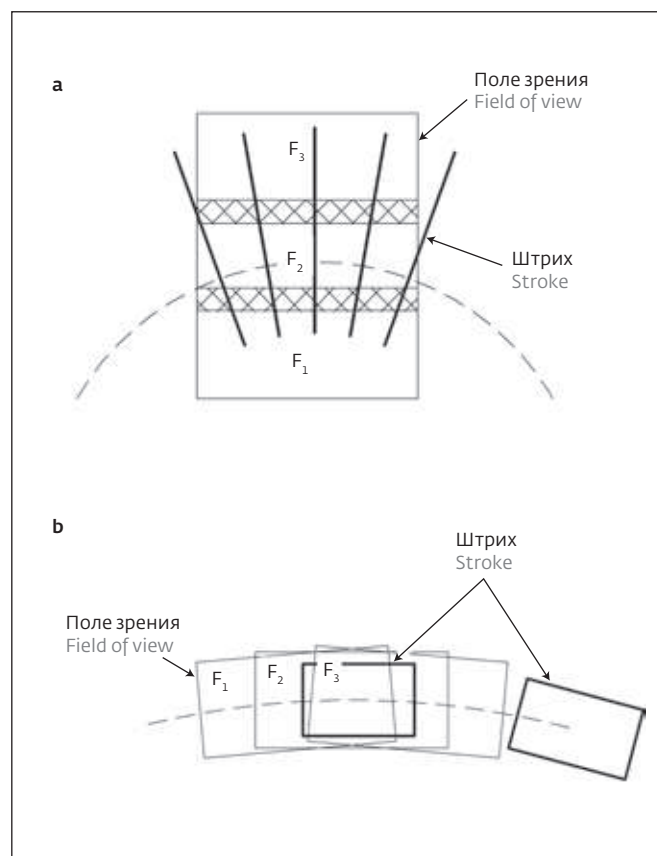


Рис.1. Процесс шивки изображений штриха по вертикали (а) или горизонтали (б)

Fig.1. The process of stitching images vertically (a) or horizontally (b)

to expression (1), for the selected receiver, the useful linear magnification will be $\beta = 50\times$ and the linear field size $290 \times 190 \mu\text{m}$. Another important component of reading head uncertainty is the dynamic uncertainty arising due to rotation of the angle structure during measurement. The dynamic error will be determined by the amount of blurring of the optical image which, in turn, depends on the speed and exposure time of the photosensitive elements.

To calculate the rotation speed of the angle measuring structure in relation to the reading head, we take its maximum diameter to be 165 mm. The linear path length of the outer radius of the angle measuring structure will be $S_{уим} = 520$ mm. In view of linear magnification of optical system $50\times$, observed linear field size $H \cdot V = 290 \times 190 \mu\text{m}$, and also maximum possible frame rate $f_{ps} = 7$ fps, we conclude that for the given linear field it is necessary to adhere to the

$$\text{ratio } N_F = \frac{S_{уим}}{H} = 1800 \text{ frames.}$$



приемника излучения относительно контролируемой углоизмерительной структуры.

В таком случае необходимо учитывать погрешность установки приемника относительно осей OX и OY . Поворот матрицы вокруг оси OZ (параллельно плоскости наблюдаемой структуры) не приведет к формированию погрешности. Координаты $(\tilde{x}_ц, \tilde{y}_ц)$ штрихов при наклоне фотоприемного блока можно вычислить при помощи матрицы поворота:

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_ц \\ \tilde{y}_ц \\ 0 \end{bmatrix} = M_R \begin{bmatrix} x_ц \\ y_ц \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $(x_ц, y_ц)$ – координаты штриха при отсутствии наклона фотоприемного блока; M_R – матрица поворота, которую вычислим с помощью углов Тэйта – Брайана. В нашем случае поворот вокруг оси OZ не оказывает влияния на точность определения координат штриха. Тогда результирующая матрица поворота после перемножения примет вид:

$$M_R = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta & \cos\alpha & \sin\alpha\cos\beta \\ \cos\alpha\sin\beta & -\sin\alpha & \cos\alpha\sin\beta \end{pmatrix}. \quad (4)$$

С учетом (4), выражение (3) можно записать как:

$$\begin{cases} \tilde{x}_ц = x_ц\cos\beta \\ \tilde{y}_ц = x_ц\sin\alpha\sin\beta + y_ц\cos\alpha. \end{cases} \quad (5)$$

Погрешность, вызванная наклоном фотоприемной головки, будет определяться из выражения:

$$\delta X_{\text{РПОИ}} = \sqrt{(\tilde{x}_ц - x_ц)^2 + (\tilde{y}_ц - y_ц)^2} \frac{P_x}{\beta}, \quad (6)$$

где P_x – размер пикселя матричного приемника излучения по горизонтали, мкм; β – линейное увеличение оптической системы считывающей головки.

Задавшись предельными значениями углов наклона фотоприемной головки $\alpha=1$ и $\beta=50\times$, получаем $\delta X_{\text{РПОИ}} = 0,06''$ для максимального размера диаметра рабочей зоны лимба 90 мм.

Случайная составляющая погрешности, вызванная шумами фотоприемника считывающей головки

С учетом требований высокоточного измерения дефекта границы штриха и, как следствие, большого линейного увеличения оптической системы, одним из факторов, влияющих на суммарную погрешность считывающей головки, будут шумы фотоприемника. Появление шума на изображении приведет к случайному перераспределению

The time required to capture this number of frames

is $t = \frac{N_F}{\text{fps}} = 260$ s. In this case the average speed required

to read the track at the maximum possible radius of the angle-measuring structure will be $v=2$ mm/s and the angular rotation speed is $\omega=0.024$ rad/s = 1.4 deg/s.

Errors caused by inclining of the photoreceiver unit reading head

One of the sources of the reading head error is the systematic error due to inclination of the matrix photodetector installation relative to the angle-measuring structure being monitored.

In this case it is necessary to take into account the error in the receiver positioning relative to the OX and OY axes. Rotation of the matrix around the OZ axis (parallel to the plane of the observed structure) will not produce an error. Coordinates of the strokes $(\tilde{x}_ц, \tilde{y}_ц)$ arising at inclination of the photodetector unit can be calculated using the rotation matrix:

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_ц \\ \tilde{y}_ц \\ 0 \end{bmatrix} = M_R \begin{bmatrix} x_ц \\ y_ц \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

where $(x_ц, y_ц)$ – are the coordinates of the stroke in the absence of tilting of the photodetector unit; M_R – is the rotation matrix which we calculate using the Tait-Brian angles. In our case the rotation around the OZ axis produces no effect on the accuracy of the stroke coordinates. Then the resulting rotation matrix after multiplication will look like:

$$M_R = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta & \cos\alpha & \sin\alpha\cos\beta \\ \cos\alpha\sin\beta & -\sin\alpha & \cos\alpha\sin\beta \end{pmatrix}. \quad (4)$$

According to (4), expression (3) can be written as:

$$\begin{cases} \tilde{x}_ц = x_ц\cos\beta \\ \tilde{y}_ц = x_ц\sin\alpha\sin\beta + y_ц\cos\alpha. \end{cases} \quad (5)$$

The error caused by inclination of the photodetector head will be determined from the expression:

$$\delta X_{\text{РПОИ}} = \sqrt{(\tilde{x}_ц - x_ц)^2 + (\tilde{y}_ц - y_ц)^2} \frac{P_x}{\beta}, \quad (6)$$

where P_x is the horizontal pixel size of the matrix photodetector, μm ; β is the linear magnification of the reading head optical system.

By setting the photodetector angle limits $\alpha=1$ and $\beta=50\times$, we obtain $\delta X_{\text{РПОИ}} = 0.06''$ for a maximum working area diameter of 90 mm.



энергии изображения штриха и появлению погрешности в результате определения границ штриха.

Шум фотоприемника считывающей головки был рассчитан по методу переноса фотонов. Эта модель линейна, поэтому все составляющие шума складываются. Суммарный шум σ_y^2 в ПЗС-матрице складывается из следующих составляющих:

$$\sigma_y^2 = K^2\sigma_d^2 + \sigma_q^2 + K(\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}), \quad (7)$$

где K – усиление камеры, σ_d^2 – вариация темнового шума; σ_q^2 – вариация шума квантования; μ_y – количество фотонов, накопленных в течение времени экспозиции; $\mu_{y,\text{dark}}$ – количество темновых фотонов.

Величину $(\mu_y - \mu_{y,\text{dark}})$ можно найти из выражения для отношения сигнал/шум SNR:

$$\text{SNR} = \frac{\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}}{\sigma_y} \Rightarrow K(\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}) = K \cdot \text{SNR} \cdot \sigma_y. \quad (8)$$

Вариация шума квантования рассчитывается следующим образом:

$$\sigma_q^2 = \frac{1}{12} \left(\frac{\mu_{p,\text{sat}}}{2^k} \right)^2, \quad (9)$$

где $\mu_{p,\text{sat}}$ – емкость насыщения пикселя, то есть максимальное количество фотоэлектронов, которое он может удерживать при сохранении нелинейного отклика, k – разрядность АЦП. С учетом (9), выражение (7) принимает вид:

$$\sigma_y(\sigma_y - K \cdot \text{SNR}) = K^2\sigma_d^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{\mu_{p,\text{sat}}}{2^k} \right)^2, \quad (10)$$

откуда может быть найдена величина δ_y .

Для указанных данных $\delta_y = 14,78$ электронов, а вариация шума $\sigma_y^2 = 218,58$ электронов, что соответствует

$n_v = \frac{\sigma_y^2 \cdot \eta}{100} = 370,47$ фотонов, попавших

на фотоприемник. Напряжение, соответствующее шуму приемника излучения, равно $\bar{U}_{\text{ш}} = \bar{U}_s \cdot n_v \cdot t_{\text{эксн}} = 28,65$ мВ.

Связь между рассчитанным значением шумового напряжения и отклонением сигнала, снимаемого с фотоприемника, в единицах АЦП, выражается следующим соотношением:

$$\delta U_{\text{ADC}} = \frac{\bar{U}_{\text{ш}} \cdot 2^k}{U_{\text{max}}}, \quad (11)$$

где U_{max} – максимальное значение напряжения с фотоприемника, равное 3,3 В. Тогда $\delta U_{\text{ADC}} = 140$, что соответствует аналогичному отклонению в значениях яркости пикселя на изображении и составляет 0,0085 от его полной разрядности.

Random error component caused by photodetector reading head noise

Given the requirements for high accuracy in measuring the stroke-face defect and the resulting high linear magnification of the optical system, one of the factors influencing the total error of the reading head will be the photodetector noise. Occurrence of noise in the image will result in a random redistribution of the stroke image energy and will create an error as a result of the stroke boundary detection.

The photodetector noise of the reading head has been calculated using the photon transfer method. This model is linear, so all the noise components add up. The total noise σ_y^2 in the CCD sensor is the sum of the following components:

$$\sigma_y^2 = K^2\sigma_d^2 + \sigma_q^2 + K(\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}), \quad (7)$$

where K is the camera magnification; σ_d^2 – dark noise variation, σ_q^2 – quantization noise variation; μ_y is the number of photons accumulated during the exposure time; $\mu_{y,\text{dark}}$ is the number of dark photons.

The value $(\mu_y - \mu_{y,\text{dark}})$ can be found from the expression for the signal-to-noise ratio SNR:

$$\text{SNR} = \frac{\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}}{\sigma_y} \Rightarrow K(\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}) = K \cdot \text{SNR} \cdot \sigma_y. \quad (8)$$

The variation in quantization noise is calculated as follows:

$$\sigma_q^2 = \frac{1}{12} \left(\frac{\mu_{p,\text{sat}}}{2^k} \right)^2, \quad (9)$$

where $\mu_{p,\text{sat}}$ is the saturation capacity of a pixel, i.e. the maximum number of photoelectrons it can hold while maintaining a non-linear response, k is the ADC resolution. Taking into account (9), expression (7) takes a form:

$$\sigma_y(\sigma_y - K \cdot \text{SNR}) = K^2\sigma_d^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{\mu_{p,\text{sat}}}{2^k} \right)^2, \quad (10)$$

Hence, the δ_y value can be found.

For the given data $\delta_y = 14.78$ electrons and noise variation $\sigma_y^2 = 218.58$ electrons, corresponding to

$n_v = \frac{\sigma_y^2 \cdot \eta}{100} = 370.47$ photons hitting the photodetector.

The voltage corresponding to the radiation receiver noise is $\bar{U}_{\text{ш}} = \bar{U}_s \cdot n_v \cdot t_{\text{эксн}} = 28,65$ мВ.

The relationship between the calculated value of the noise voltage and the deviation of the signal taken from the photodetector, in ADC units is expressed by the following relation:



Для разработанного алгоритма обработки составляющая погрешности, вызванная шумами фотоприемника считывающей головки, составит $\delta X_{\text{ПОИ}} = 0,012''$.

Составляющая погрешности алгоритма обработки изображения штриха

Алгоритм обработки изображения, получаемого считывающей головкой системы, заключается в нахождении дефектов и деформаций элементов топологии лимбов, к которым относятся неровность края штриха, сколы и выбоины на границе штриха, микроцарапины и загрязнения на поверхности лимба.

Исходя из заданных условий для определения размера дефекта в работе алгоритма должны быть предусмотрены следующие операции: нахождение каждого отдельного штриха, вычисление номинальной прямой, относительно которой будет рассчитываться дефект штриха и расчет дефекта для обнаруженного штриха.

Обнаружение штриха осложнено тем, что при высоком увеличении оптической системы считывающей головки некоторые штрихи, в зависимости от того, на какой из рабочих дорожек они расположены, не полностью попадают в поле зрения системы, или штрихи дорожки не укладываются по высоте поля зрения. Для того чтобы в дальнейшем правильно определить дефект штриха и его положение на лимбе, необходимо соблюсти условие попадания на обрабатываемое изображение не менее двух полных изображений штрихов. Реализация этого условия возможна с использованием метода сшивки изображений.

Сшивка большой последовательности изображений является затруднительной и неоправданной операцией, поскольку при сохранении разрешающей способности изображения выходное сшитое изображение будет занимать огромный объем памяти, который сложно будет как обрабатывать, так и хранить на запоминающем устройстве. Поэтому сшивку рекомендуется делать для минимальных участков лимба, достаточных для определения пространственного положения отдельного штриха и его дефекта.

Дальнейшее обнаружение штриха целесообразно производить по одномерному представлению $S(x)$ зарегистрированного изображения $f(x, y)$. Рис.2 иллюстрирует результат представления исходного изображения штриха в форме одномерного сигнала. Затем на одномерном представлении изображения необходимо найти области интереса, содержащие штрихи. В найденных областях определяются параметры штриха, включая его дефект положения центра. Процесс обнаружения

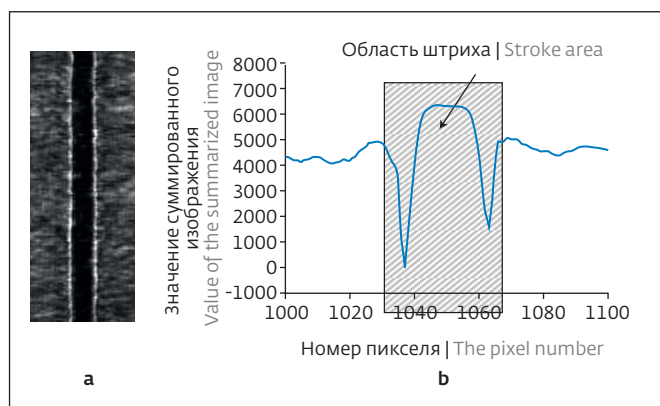


Рис.2. Пример представления исходного изображения штриха лимба (а), в одномерном виде (б)

Fig.2. An example of a one-dimensional representation of the original limb stroke (a), the feature image (b)

$$\delta U_{\text{ADC}} = \frac{\bar{U}_{\text{ш}} \cdot 2^k}{U_{\text{max}}}, \quad (11)$$

where U_{max} is the maximum voltage value at the photodetector equal to 3.3 V. Then $\delta U_{\text{ADC}} = 140$, which corresponds to a similar deviation in pixel brightness values in the image, makes 0.0085 of its full digit capacity.

For the developed processing algorithm, the error component caused by photodetector reading head noise will be $\delta X_{\text{ПОИ}} = 0,012''$.

The error component of the stroke image processing algorithm

The processing algorithm of the image obtained by the reading head of the system is aimed at detection of defects and deformations in elements of the limb topology, which include roughness of the stroke edge, chipping and nicks on the stroke, microscratches and dirt on the limb surface.

Based on the given conditions, the following operations must be included in the algorithm so as to determine the defect size: finding each individual stroke, calculating the nominal straight line relative to which the defect of the stroke will be calculated and calculating the defect for the detected stroke.

Stroke detection is complicated by the fact that at high magnification of the reading head optical system some strokes, depending on the working tracks they are located on, do not fall completely into the system field of view, or the strokes of the track do not fit within the height of the field of view. In order to be able to correctly identify a defective stroke and its position on the limb, it is necessary to observe the condition of at least two complete images of the strokes on the processed



не определяет точность расчета дефекта и положения штриха и не влияет на итоговую погрешность. Для увеличения вероятности правильного обнаружения штриха необходимо обеспечить высокий уровень яркости и равномерности подсветки участка лимба в заданной области поля зрения считывающей головки.

Для дальнейшего анализа параметров топологии элементов лимба необходимо выполнить вычисление номинальных прямых, относительно которых будут рассчитываться дефекты штрихов. Для этого необходимо и достаточно определить две точки, через которые может быть построена только одна прямая. Нахождение точек для построения номинальной прямой границы штриха производится на основе определения точек начала штриха в верхней и нижней части кадра. Для этого производится представление изображения верхней части кадра на основе суммирования отдельных строк с 1 до $N/2$ и от $N/2$ до N . В результате формируются два энергетических распределения изображений штриха в верхней и нижней части кадра (рис.3).

После нахождения номинальной прямой границ штриха определяются положения точек границы начала и конца каждого штриха в верхней и нижней части кадра (рис.4). Для этого достаточно найти производную и определить центр в области максимальных и минимальных пиков сигнала:

$$S_1^d(x) = \frac{\partial S_1(x)}{\partial x}, \quad S_2^d(x) = \frac{\partial S_2(x)}{\partial x}, \quad (12)$$

где $S_1^d(x)$, $S_2^d(x)$ – производная для функций сигнала $S_1(x)$, $S_2(x)$ в верхней и нижней части кадра соответственно.

Нахождение центра производной в заданной области сигнала целесообразно реализовать на основе алгоритма взвешенного суммирования:

$$C' = \frac{\sum_{x=0}^M S_n^d(x) \cdot x}{\sum_{x=0}^M S_n^d(x)}. \quad (13)$$

Для того чтобы исключить влияние фоновой составляющей, целесообразно использовать алгоритм взвешенного суммирования в окне $[A_{st}, A_{sp}]$:

$$C' = \frac{\sum_{x=A_{st}}^{A_{sp}} S_n^d(x) \cdot x}{\sum_{x=A_{st}}^{A_{sp}} S_n^d(x)}, \quad (14)$$

где $A_{st} = \max\{S_n^d(x) - 3\}$ и $A_{sp} = \max\{S_n^d(x) + 3\}$.

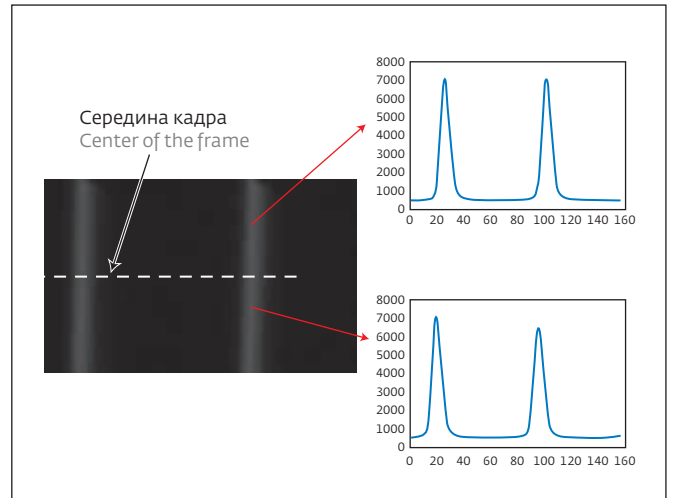


Рис.3. Операция нахождения точек начала и конца штриха по длине на основе суммирования половин кадра
Fig.3. The operation for finding the start and end points of a stroke by length, based on the summation of halves of a frame

image. This condition can be met by using the image stitching method.

Stitching a large image sequence is a difficult and unreasonable operation since, while maintaining image resolution, the output merged image will occupy a huge amount of memory which would be difficult both to process by and to store in a storage device. It is therefore recommended that the stitching be done for

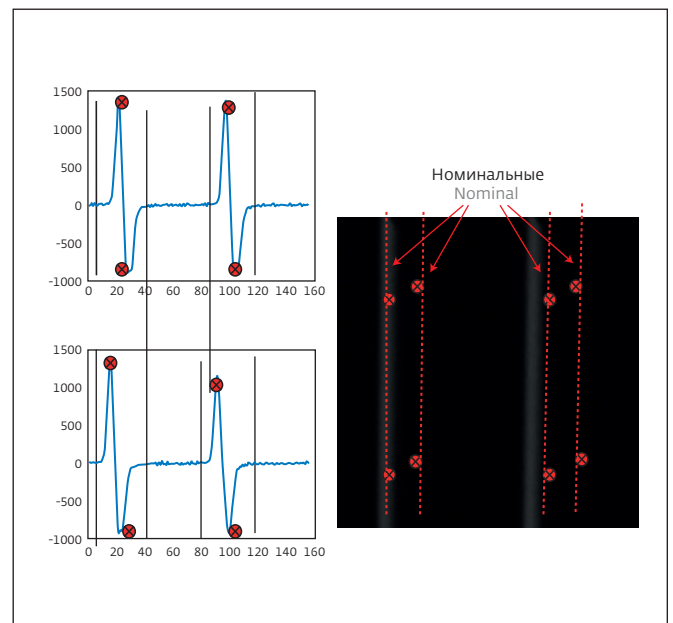


Рис.4. Операция нахождения номинальных прямых границ штрихов по точкам производной сигналов $S_1(x)$, $S_2(x)$
Fig.4. The operation for finding the nominal straight edge of the strokes from the signal derivative points $S_1^d(x)$, $S_2^d(x)$



Через полученные пары координат центров производных сигналов строится номинальная прямая $L_n \subset (C', y)$ для n -го штриха.

Относительно найденных номинальных прямых рассчитывается величина дефекта и деформации границы каждого штриха, которая определяется как среднеквадратическое отклонение абсолютной разности координат границ штриха относительно номинальной прямой в каждой N -ой строке изображения:

$$w_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta x_w - \overline{\Delta x_w})^2}. \quad (15)$$

Для разработанного алгоритма величина погрешности алгоритма будет определяться с погрешностью определения центральной точки производной n -го сигнала $S_n^d(x)$ методом взвешенного суммирования и будет равна:

$$\delta X_{\text{dip}} = 0,01 \cdot \frac{P_x}{\beta}, \quad (16)$$

где P_x – размер пикселя матричного приемника излучения по горизонтали, мкм; β – линейное увеличение оптической системы считывающей головки; 0,01 – погрешность метода взвешенного суммирования. С учетом значений линейного увеличения и размера фоточувствительного элемента $\delta X_{\text{dip}} = 0.0026''$.

Составляющая погрешности смазывания изображения вследствие движения лимба при круговом считывании

Движение контролируемой углоизмерительной структуры с угловой скоростью ω вызывает смазывание цифрового изображения наблюдаемых штрихов. Согласно геометрической оптике, в первом приближении можно записать величину прироста размера изображения штриха как линейную величину смазывания Δ_1 , которая при времени экспозиции фотоприемника $t_{\text{эксп}}$ для наблюдаемого штриха в виде вертикальной линии равна:

$$\Delta_1 = \omega t_{\text{эксп}} / \left(\frac{z_0}{f} - \frac{z_0 + l_h / 2}{z_0 + l_h} \right), \quad (17)$$

где l_h – размер штриха в горизонтальном направлении.

Если не компенсировать влияние смазывания, то с учетом того, что используется алгоритм определения энергетического центра для определения границ штриха, возникает систематическая погрешность $\delta X_{\text{смаз}}$, равная:

$$\delta X_{\text{смаз}} = \frac{\Delta_1}{2} = \omega t_{\text{эксп}} / 2 \left(\frac{z_0}{f} - \frac{z_0 + l_h / 2}{z_0 + l_h} \right). \quad (18)$$

minimal areas of the limb, sufficient to determine the spatial position of the individual stroke and its defect.

It is useful to further detect the stroke using the one-dimensional $S(x)$ representation of the recorded image $f(x, y)$. Figure 2 illustrates the result of representing the original image of a stroke in the form of a one-dimensional signal. The regions of interest containing the strokes must then be found in the one-dimensional representation of the image.

In the detected areas the stroke parameters are defined, including its centre position defect. The detection process does not determine accuracy of the calculated flaw or stroke position and has no effect on the resulting error. A high level of brightness and uniformity of illumination of the limb area within a given field of view of the reading head is required to increase probability of correct stroke detection.

To further analyse parameters of the limb element topology, it is necessary to calculate the nominal lines with respect to which the stroke faults will be calculated. For this purpose it is necessary and sufficient to determine two points through which only one line can be drawn. Finding points for drawing the nominal line of the stroke boundary is done on the basis of determining the stroke start points at the top and bottom of the frame. This is done by representing the image of the upper part of the frame based on the summation separately of the lines from 1 to $N/2$ and from $N/2$ to N . As a result, two energy distributions of the stroke images in the upper and lower part of the frame are formed (Fig.3).

After finding the nominal straight stroke edge, the positions of the start and end points of each stroke at the top and bottom of the frame are determined (Fig.4). For this purpose it is enough to find the derivative and determine the centre in the area of maximum and minimum peaks of the signal:

$$S_1^d(x) = \frac{\partial S_1(x)}{\partial x}, \quad S_2^d(x) = \frac{\partial S_2(x)}{\partial x}, \quad (12)$$

where $S_1^d(x)$, $S_2^d(x)$ is the derivative for the signal functions $S_1(x)$, $S_2(x)$ at the top and bottom of the frame, respectively.

Finding the centre of the derivative in a given signal area is expediently implemented on the basis of a weighted summation algorithm:

$$C' = \frac{\sum_{x=0}^M S_n^d(x) \cdot x}{\sum_{x=0}^M S_n^d(x)}. \quad (13)$$

In order to eliminate the influence of the background component, it is useful to use a weighted summation algorithm in window $[A_{st}, A_{sp}]$:



Из приведенного выражения видно, что $\delta X_{\text{смаз}}$ зависит от времени экспозиции и скорости перемещения штриха (скорости движения углоизмерительной структуры).

Погрешность определения координат границ штриха (18) можно также выразить от вариации времени экспозиции $\delta t_{\text{эксп}}$:

$$\delta X_{\text{эксп}} = \left[\omega / 2 \left(\frac{z_0}{f'} - \frac{z_0 + l_h / 2}{z_0 + l_h} \right) \right] \delta t_{\text{эксп}}. \quad (19)$$

Изменение интервала времени экспозиции ПОИ $\delta t_{\text{эксп}}$ зачастую обусловлено эксплуатационным фактором воздействия на электронные компоненты системы, генерирующие временные электрические импульсы задания времени экспозиции. Нарушение временных характеристик вызвано, в первую очередь, нестабильностью, которая обуславливается изменениями температуры, напряжения питания и другими факторами. Для соответствующих электронных компонентов производители представляют градуировочную таблицу корректировки воздействия температуры на выходной сигнал. Тогда величина вариации времени экспозиции приемника излучения будет выражаться:

$$\delta t_{\text{эксп}} = \Delta T [U_{\text{exp}} \cdot k_u + t_{\text{exp}} \cdot k_t], \quad (20)$$

где k_u , k_t – поправочные коэффициенты изменения выходных характеристик операционного усилителя и цифро-аналогового преобразователя при изменении температуры на ΔT .

С учетом (20), выражение (19) можно записать в виде:

$$\delta X_{\text{эксп}} = \left[\omega / 2 \left(\frac{z_0}{f'} - \frac{z_0 + l_h / 2}{z_0 + l_h} \right) \right] \Delta T [U_{\text{exp}} \cdot k_u + t_{\text{exp}} \cdot k_t]. \quad (21)$$

Из выражения видно, что чем больше скорость перемещения, тем больше влияние нестабильности экспозиции на погрешность измерения координаты границы штриха.

Оценим предельную величину погрешности, обусловленную смазыванием изображения и временем экспонирования при заданной угловой скорости вращения лимба. При минимальном времени экспозиции 0,04 мс величина составляющей погрешности смазывания изображения вследствие движения лимба при круговом считывании составит $\delta X_{\text{эксп}} = 0,012''$, при максимальном времени экспозиции 84,8 мс погрешность составит 8,3 мкм. Таким образом, для минимизации погрешности от смазывания изображения необходимо выполнять регистрацию изображения на минимальной экспозиции.

$$C' = \frac{\sum_{x=A_{st}}^{A_{sp}} S_n^d(x) \cdot x}{\sum_{x=A_{st}}^{A_{sp}} S_n^d(x)}, \quad (14)$$

where $A_{st} = \max\{S_n^d(x) - 3\}$ and $A_{sp} = \max\{S_n^d(x) + 3\}$.

A nominal line $L_n \subset (C', y)$ for the n -th stroke is plotted through the resulting pairs of coordinates of the centres of the derived signals.

With respect to the found nominal lines, the magnitude of the defect and the boundary deformation of each line is calculated, which is defined as the standard deviation of the absolute difference between the coordinates of the line boundaries with respect to the nominal line in each N -th line of the image:

$$w_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta x_w - \overline{\Delta x_w})^2}. \quad (15)$$

For the developed algorithm, the error value of the algorithm will be determined with the error of determining the central point of the derivative of the n -th signal $S_n^d(x)$ by the weighted summation method and will be equal to:

$$\delta X_{\text{dip}} = 0,01 \cdot \frac{P_x}{\beta}, \quad (16)$$

where P_x is a pixel size of matrix radiation receiver measured horizontally, μm ; β is linear magnification of optical system of the reading head; 0.01 is an error of the weighted summation method. Taking into account values of linear magnification and size of photosensitive element $\delta X_{\text{dip}} = 0.0026''$.

Component of the blurring error due to motion of the limb during circular reading

Movements of the controlled angular measuring structure with angular velocity ω cause blurring of the digital image of the observed strokes. According to geometric optics, in the first approximation, we can write the value of the increase in the size of the stroke image as a linear blurring value Δ_l , which, at the exposure time of the photodetector $t_{\text{эксп}}$ for the observed stroke as a vertical line, is equal to:

$$\Delta_l = \omega t_{\text{эксп}} / \left(\frac{z_0}{f'} - \frac{z_0 + l_h / 2}{z_0 + l_h} \right), \quad (17)$$

where l_h is a stroke size measured horizontally.

If the blurring effect is not compensated for, then, given that the energy centre algorithm is used to determine the stroke boundaries, there is a systematic error $\delta X_{\text{смаз}}$ which is equal to:

$$\delta X_{\text{смаз}} = \frac{\Delta_l}{2} = \omega t_{\text{эксп}} / 2 \left(\frac{z_0}{f'} - \frac{z_0 + l_h / 2}{z_0 + l_h} \right). \quad (18)$$



Влияние деформации объекта контроля (клиновидность и неплоскостность поверхности лимба) и неточности его установки

Важным источником погрешности при контроле элементов топологии лимба является его форма, а именно, наличие таких ее отклонений, как клиновидность и неплоскостность поверхности. Другой источник погрешности – неточности установки лимба, а именно эксцентриситет и неперпендикулярность оси вращения.

Клиновидность подложки лимба подобно классической призме приводит к изменению ориентации луча на выходе из подложки. При вращении лимба луч будет описывать коническую поверхность синхронно с вращением подложки. Ошибка измерения δX_z , вызванная клиновидностью лимба, находится из соотношения [17]:

$$\delta X_z = z \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (22)$$

где θ – допуск на клиновидность; z – рабочий отрезок объектива.

При задании, $z = 0,25^\circ$ мм, $\beta = 50\times$, а величина θ ограничена требованиями данного задания

до 120 угловых секунд. Тогда $\delta X_z = 0,06''$.

Аналогичным образом можно найти погрешность вследствие неперпендикулярности поверхности лимба из соотношения:

$$\delta X_{\perp} = \frac{z}{\beta} \cdot \frac{(n-1)}{n} \cdot \arctan\left(\frac{d}{2\rho}\right), \quad (23)$$

где ρ – допуск на перпендикулярность, равный примерно 3 мкм для любого участка лимба диаметром $d = 100$ мм. При таких данных $\delta X_{\perp} = 0,86''$.

Таким образом, систематическая составляющая погрешности измерений, обусловленная деформацией лимба, равна:

$$\delta X_s = \delta X_z + \delta X_{\perp} = 0,92''.$$

Погрешность, вызванная биением шпинделя углоизмерительного устройства, также как и погрешности эксцентриситета и аберраций оптической системы, носит систематический характер и изменяется периодически. Данная составляющая погрешности может быть скомпенсирована на этапе юстировки шкалы и устранена введением соответствующих поправочных коэффициентов, которые определяются на основе данных, получаемых с блоков обработки линейной и угловой координаты о текущем пространственном положении лимба относительно считывающей головки.

It follows from the above expression that $\delta X_{\text{смаз}}$ depends on the exposure time and the stroke speed (the speed of the angular measuring structure).

The error of the stroke boundary coordinates (18) can also be expressed by variation of the exposure time $\delta t_{\text{эксцп}}$:

$$\delta X_{\text{эксцп}} = \left[\omega / 2 \left(\frac{z_0}{f} - \frac{z_0 + l_h}{z_0 + l_h} / 2 \right) \right] \delta t_{\text{эксцп}}. \quad (19)$$

Variation of the exposure time interval $\delta t_{\text{эксцп}}$ is often caused by an operational factor affecting the electronic components of the system that generates temporal electrical pulses of the exposure time reference. Disturbances in timing characteristics are primarily caused by instabilities due to changes in temperature, supply voltage, and other factors. For the appropriate electronic components, the manufacturers provide a calibration chart to correct for the effect of temperature on the output signal. The value of the variation of the exposure time of the radiation receiver will then be expressed as:

$$\delta t_{\text{эксцп}} = \Delta T [U_{\text{exp}} \cdot k_u + t_{\text{exp}} \cdot k_t], \quad (20)$$

where k_u , k_t are correction factors for changes in output characteristics of operational amplifier and digital-to-analogue converter when the temperature changes by ΔT .

Given (20), expression (19) can be written as:

$$\delta X_{\text{эксцп}} = \left[\omega / 2 \left(\frac{z_0}{f} - \frac{z_0 + l_h}{z_0 + l_h} / 2 \right) \right] \Delta T [(U_{\text{exp}} \cdot k_u + t_{\text{exp}} \cdot k_t)]. \quad (21)$$

From this expression, it can be seen that the higher the travel speed, the greater the effect of the exposure instability on the stroke boundary coordinate error.

Let us estimate the limiting value of the error due to image blurring and exposure time at a given angular velocity of limb rotation. At minimum exposure time of 0.04 ms the magnitude of error component of the image blurring due to limb motion at circular readout will make $\delta X_{\text{эксцп}} = 0,012''$, at maximum exposure time of 84.8 ms the error will estimate 8.3 μm . Thus, to minimize the error from image blurring, it is necessary to perform image registration at the minimum exposure.

Effects of the control object deformation (wedge-shaped and non-planar limb surfaces) and inaccuracy of its mounting

An important source of error in checking elements of limb topology is the shape of the limb, namely its deviations such as wedge-shaped and non-planar surfaces. Inaccuracies in the positioning of the limb, namely eccentricity and non-perpendicularity of the axis of rotation produce still another source of the error.



Суммарная погрешность основных составляющих погрешностей считывающей головки

Используя полученные значения составляющих погрешности, по известной методике, можно провести расчет суммарной погрешности считывающей головки. Выражение для суммарной погрешности машины при контроле величины дефекта элементов топологии углоизмерительной структуры имеет вид:

$$\Sigma \Delta X_c = \sqrt{\delta X_{\text{ПОИ}}^2 + \delta X_{\text{dip}}^2 + \delta X_{\text{эксц}}^2 + \delta X_s}. \quad (24)$$

Расчет и исследование погрешности повышенной точности, обусловленные вышеперечисленными составляющими, показали, что величина суммарной погрешности не превышает 0,038 мкм.

ВЫВОДЫ

Для обеспечения необходимых требований повышенной точности с использованием считывающей головки для анализа изображений элементов топологии углоизмерительных структур необходимо построение оптико-электронной системы на базе матричного ПЗС-фотоприемника с размером фоточувствительного элемента не менее 3,1 мкм и разрешением 4330×2854 пикселей и разрядность АЦП не менее 12. Система должна работать в отраженном свете на рабочей длине волны 450 нм. При величине линейного увеличения $\beta = 50\times$ и ограничении предельной разрешающей способности в 0,2 мкм дефекты меньшего размера различимы не будут. Размер линейного поля зрения при заданном увеличении составит 290×190 мкм. Необходимая средняя скорость для считывания дорожки на максимально возможном радиусе углоизмерительной структуры составит $v = 2$ мм/с, а угловая скорость вращения равна $\omega = 1,4$ град/с. При заданных параметрах считывающей головки предельная погрешность составит не более 0,96" (0,038 мкм).

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также размещение статей на сайте журнала и передачу НЭБ eLIBRARY.RU.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Абрамов Н.А., Тамбовский А.Д., Букин А.М.** и др. Устройство для контактного экспонирования фоторезиста. Патент на полезную модель № 166307 U1, 2016 г.
2. **Жарик Г.А., Дагесян С.А.** и др. Литография нанометрового разрешения на основе напыляемого полистирола. ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2017. No. 6.

The wedge shape of the limb substrate, similar to a classical prism, causes the beam to change orientation at the exit from the substrate. As the limb rotates, the beam will describe a tapered surface synchronously with the rotation of the substrate. The measurement error δX_z caused by the wedge shape of the limb is found from the relation [17]:

$$\delta X_z = z \cdot \text{tg } \theta, \quad (22)$$

where θ is the wedge-shape tolerance, z is the working distance of the lens.

When given, $z = 0,25^\circ$ mm, $\beta = 50\times$, and the value of θ is limited by the requirements of this assignment to 120 angular seconds. Then $\delta X_z = 0.06''$.

Similarly, you can find the error due to non-perpendicularity of the limb surface from the ratio:

$$\delta X_{\perp} = \frac{z}{\beta} \cdot \frac{(n-1)}{n} \cdot \arctan\left(\frac{d}{2\rho}\right), \quad (23)$$

where ρ is the perpendicularity tolerance, equal to about 3 μm for any section of the limb with a diameter $d = 100$ mm. With these data $\delta X_{\perp} = 0.86''$.

Thus, the systematic component of the measurement error due to the deformation of the limb equals:

$$\delta X_s = \delta X_z + \delta X_{\perp} = 0,92''.$$

As with eccentricity and optical system aberrations, the error caused by the angular measuring spindle run-out is systematic and varies periodically. This component of the error can be compensated for at the scale alignment stage and is eliminated by the introduction of suitable correction factors which are derived from the linear and angular coordinate processing units on the current spatial position of the limb relative to the reading head.

Total error of the main error components of the reading head

Using these error components, it is possible to calculate the total error of the reading head using the known procedure. The expression for the total error of the machine when controlling the magnitude of the defect of the elements of the topology of the angle-measuring structure is as follows:

$$\Sigma \Delta X_c = \sqrt{\delta X_{\text{ПОИ}}^2 + \delta X_{\text{dip}}^2 + \delta X_{\text{эксц}}^2 + \delta X_s}. \quad (24)$$

Calculation and study of the enhanced accuracy error due to the above components showed that the total error does not exceed 0.038 μm .

CONCLUSIONS

In order to meet the required enhanced accuracy requirements using a reading head for analysis of the



3. EMVA Standard 1288 Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras // November 29, 2010 Issued by European Machine Vision Association <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.0.pdf>
4. Горбачев А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе: Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013.
5. Shortis M.R., Clarke T.A., Short T. "Comparison of some techniques for the sub pixel location of discrete target images", Photonics for Industrial.
6. Липлянин А.Ю., Хижняк А.В., Михненко Е.И., Мамченко А.С. Анализ методов восстановления оптико-электронных изображений, смазанных при движении. Доклады БГУИР. 2018. № 2.
7. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. М.: Радио и связь, 1981.
8. ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями.

Декларация о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

images of the topology elements of angle-measuring structures, an optoelectronic system based on a matrix CCD photodetector with a photosensitive element size of at least $3.1 \mu\text{m}$ and a resolution of 4330×2854 pixels and an ADC resolution of at least 12 digits must be designed. The system should operate in reflected light at an operating wavelength of 450 nm. With a linear magnification value of $\beta = 50 \times$ and a resolution limit of $0.2 \mu\text{m}$, smaller defects will not be distinguishable. The size of the linear field of view at a given magnification will be $290 \times 190 \mu\text{m}$. The average speed required to read the track at the maximum possible radius of the angle measuring structure will be $v = 2 \text{ mm/s}$ and the angular velocity of rotation is $\omega = 1.4 \text{ deg/s}$. With the given reading head parameters, the margin of error will be no more than $0,96''$ ($0.038 \mu\text{m}$).

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SELibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The author declares that he has no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Самохин А.Б.
**ОБЪЕМНЫЕ СИНГУЛЯРНЫЕ
 ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ
 ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ**

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 218 с. ISBN 978-5-94836-618-0.

Цена 840 руб.

В книге с помощью сингулярных интегральных уравнений рассматриваются различные классы задач электродинамики. Монография состоит из двух частей. В первой части выводятся объемные сингулярные интегральные уравнения, описывающие задачи рассеяния электромагнитных волн на трехмерных неоднородных и анизотропных структурах, а также сингулярные уравнения с запаздыванием по времени, описывающие задачи взаимодействия нестационарного поля с ограниченной материальной средой. С использованием полученных уравнений доказываются теоремы существования и единственности решения различных классов задач рассеяния волн. Во второй части излагаются итерационные методы для решения уравнений, математически строго обосновывается применение метода Галеркина и метода коллокации для численного решения уравнений, описывающих задачи рассеяния волн на трехмерных неоднородных и анизотропных структурах. Предлагаются эффективные алгоритмы численного решения сингулярных уравнений.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru



КОМПОЗИТ-ЭКСПО

Четырнадцатая международная специализированная выставка

29 - 31 марта 2022

Россия, Москва,
ЦВК «Экспоцентр», павильон 1



Основные разделы выставки:

- Сырье для производства композитных материалов, компоненты: смолы, добавки, термопластики, углеродное волокно и т.д.
- Наполнители и модификаторы
- Стеклопластик, углепластик, графитопластик, базальтопластик, базальтовые волокна, древесно-полимерный композит (ДПК) и т.д.
- Полуфабрикаты (препреги)
- Промышленные (готовые) изделия из композитных материалов
- Технологии производства композитных материалов со специальными и заданными свойствами
- Оборудование и технологическая оснастка для производства композитных материалов
- Инструмент для обработки композитных материалов
- Измерительное и испытательное оборудование
- Сертификация, технический регламент
- Компьютерное моделирование
- Утилизация

Специальный раздел:
КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ



выставка участник системы



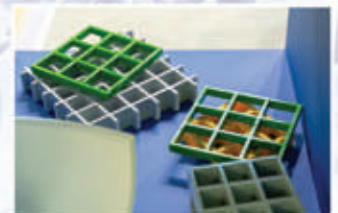
независимый выставочный аудит

Параллельно проводится выставка:



ПОЛИУРЕТАНЭКС

Тринадцатая международная специализированная выставка
www.polyurethanex.ru



Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд,
дом 7, строение 10, офис 507 | Тел.: 8 495 988-1620
E-mail: info@composite-expo.ru | Сайт: www.composite-expo.ru

Организаторы:



[youtube.com/user/compoexporussia](https://www.youtube.com/user/compoexporussia)



[@compoexporus](https://twitter.com/compoexporus)



[@compo](https://t.me/compo)



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

**100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ**



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosfera.ru



Стоимость 1056 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1287 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1716 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru