

УДК 531.717.81 : 514.8 : 51-74

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ КРУГЛОМЕР, ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2017 О.А. Заякин, А.В. Манухин, А.А. Ростов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева

Статья поступила в редакцию 16.11.2017

Описана физическая и математическая модель экспериментального лазерного кругломера. Прибор сканирует поверхность сфокусированным пучком света и определяет координаты зеркально отраженного лазерного пучка. Приведены предварительные результаты серии измерений с целью оценки их основной погрешности. По их анализу определены основные факторы погрешности измерений и сделан вывод о том, что прибор нуждается в усовершенствовании и что его метрологические характеристики могут быть улучшены. Учитывая недостаток финансирования разработки, предложено сбор и предварительную обработку данных проводить там, где для этого есть технические возможности, а вычисления, связанные с получением профиля и контурных картин поверхности изделия, контролируемого прибором, а также статистическую обработку полученных данных, выполнять в «облаке». Приведена структура и функционал программного комплекса кругломера, который отличается распределенностью вычислений.

*Ключевые слова:* измерение геометрических величин, триангуляция, трехмерный сканер, круглость, кольцо подшипника, математическая модель, статистическая обработка данных, «облачные вычисления».

*Работа выполнена при государственной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности СГАУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 годы.*

*Работа также частично выполнялась в рамках НИР*

*«Анализ и синтез световых полей в лазерной метрологии и технологии»*

*(№ гос. регистрации 01910042666) в Самарском филиале Физического института РАН.*

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основная задача разрабатываемого программного комплекса – исследование основной погрешности экспериментального лазерного кругломера. От существующего прототипа данный комплекс отличается распределенностью вычислений, которые выполняются в «облаке». Это создаст условие для кооперации различных групп ученых и специалистов, что расширит экспериментальную базу и тем самым ускорит ход исследований.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в данной области техники для контроля поверхности используют в основном устройства на основе интерференцион-

ных методов [1, 2]. Контролируемая поверхность сложной формы вносит искажения во входной сигнал. Исправление данных искажений на уровне контролирующей аппаратуры является дорогостоящей задачей. Применяемый в настоящей работе метод триангуляции позволяет обойтись без дорогостоящей оптики и как следствие – сделать оборудование более доступным.

Данный метод является одной из разновидностей методов триангуляции, которая основана на использовании зеркальной составляющей отраженного пучка света (рис. 1). Ее иногда также называют дефлектометрией. Можно также найти ее некоторое идейное сходство с известными датчиками Шака-Гартмана [3]. Их чувствительность может достигать  $5 \times 10^{-4}$  мкм, что сравнимо с лучшими интерферометрами.

Данный метод представляет интерес для применения в различных задачах [4]. Это имеет место благодаря его большей чувствительностью по сравнению с наиболее распространенной разновидностью метода триангуляции. Она основана на анализе оптического изображения световой точки, или же световой структуры на контролируемой поверхности. Однако применение сдерживается отсутствием функции преобразования в каждом конкретном случае.

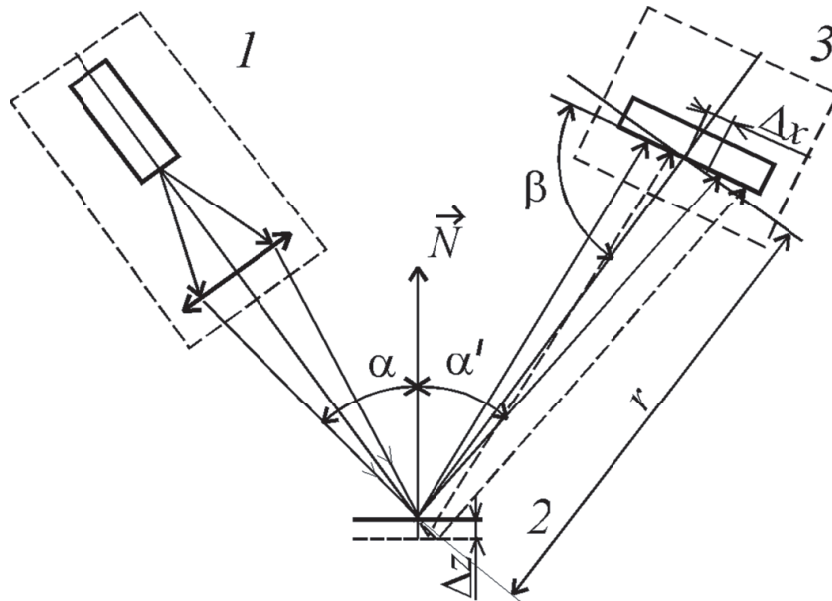
*Заякин Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий. E-mail: oleg\_zayakin@inbox.ru*

*Манухин Александр Владимирович, магистрант кафедры информационных систем и технологий.*

*E-mail: manuxin.alexander@yandex.ru*

*Ростов Алексей Алексеевич, магистрант кафедры информационных систем и технологий.*

*E-mail: rostovchik512@mail.ru*



**Рис. 1.** Схема разновидности триангуляционного метода, использованного в работе:  
 1 – источник излучения; 2 – контролируемая поверхность; 3 – матричный фотоприемник;  
 $\vec{N}$  – вектор нормали к освещенной точке поверхности 2;  
 $r$  (на данном рисунке) – расстояние от поверхности до фотоприемника;  
 $\Delta z$  – высота неровности на поверхности;  
 $\Delta x$  – смещение центра пятна зеркально отраженного пучка света на фотоприемнике 3;  
 $\alpha, \alpha'$  – углы падения и отражения пучка света на поверхность 2

### МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

Исследование контролируемой поверхности ведется пучком света, который представлен одним лучом с нулевой поперечной шириной. Физической основой данной системы являются законы геометрической оптики. В оптической однородной среде свет распространяется прямолинейно. Это позволяет использовать прямые линии для анализа распространения света. Учет ширины пучка приводит к искажению формы светового пятна. Влияние этого фактора должно исследоваться экспериментально. На рис. 2 представлена оптико-механическая схема прибора [5]. Падающий на поверхность луч  $\vec{a}$  перпендикулярен плоскости  $YOZ$  и зеркально отражается относительно вектора нормали  $\vec{N}$ . Отраженный луч  $\vec{b}$  фиксируется матричным фотоприемником. На основании законов геометрической оптики углы между нормалью и этими лучами света равны между собой, и к тому же все три луча лежат в одной плоскости. Это описывается системой векторных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{-\vec{a} \times \vec{N}}{|\vec{a}|} = \frac{\vec{N} \times \vec{b}}{|\vec{b}|}, & (1) \\ \frac{(-\vec{a} \cdot \vec{N})}{|\vec{a}|} = \frac{(\vec{b} \cdot \vec{N})}{|\vec{b}|}. & (2) \end{cases}$$

Информативным параметром является положение пятна света на матричном фотопри-

емнике. Оно измеряется в сферической системе координат с центром на оси  $OZ$ , там, где эту ось пересекает горизонтальная плоскость, в которой лежит падающий луч. Горизонтальный угол  $\psi$  отсчитывается от оси  $OX$  (рис. 2), а вертикальный угол  $\theta$  – от указанной горизонтальной плоскости. Сканирование поверхности контролируемого объекта производится путем его разворота вдоль оси  $OZ$  и дискретного перемещения источника света на величину шага по прямой  $AB$  в точках с координатами  $z_k = z_{k-1} + \Delta z$ . Данные действия позволяют из векторных уравнений (1), (2) получить математическую модель автоматизированной системы (кругломера):

$$\begin{cases} F_y \cdot b_z - F_z \cdot b_y = 0; & (3) \\ \frac{F_x \cdot b_z - F_z \cdot b_x}{\sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}} - F_z = 0; & (4) \\ \frac{F_x \cdot b_y - F_y \cdot b_x}{\sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}} - F_y = 0; & (5) \\ \frac{F_x \cdot b_x + F_y \cdot b_y + F_z \cdot b_z}{\sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}} - F_x = 0. & (6) \end{cases}$$

При решении системы уравнений (3) – (6) необходимо осуществить переход в цилиндрическую систему координат с центром в точке  $O$  и осью  $OZ$  (рис. 2).

Координата  $\varphi_c$  во время сканирования радиального профиля, которое производится путем

поворота поверхности 2 при неподвижных других элементах сканера, слегка колеблется вокруг своей средней величины. Координаты  $\varphi$  и  $\varphi_R$  монотонно изменяются от нуля или какой-либо начальной величины на  $2\pi$  радиан или на минус  $2\pi$  радиан, как показано на рис. 2.

Решение системы (3) – (6) может быть получено в форме дифференциального уравнения (ДУ) вида

$$\frac{d\rho_c}{d\varphi_c} = \rho_c \cdot \Phi(\rho_c, \varphi_R, z_R), \quad (7)$$

где  $z_R$  – смещение источника излучения 1;  $\rho_c$  – соответствует точке на поверхности 2 с координатой  $\varphi_c$ , пояснения к остальным обозначениям см. на рис. 2.

При линеаризации правой части исходного дифференциального уравнения (7) в области средних значений ее аргументов приходим к ДУ:

$$\frac{1}{R_0} \cdot \left( \frac{dH}{d\varphi} - a \cdot H \right) = b \cdot \varepsilon + c \cdot \gamma, \quad (8)$$

где  $a, b, c$  получены из правой части исходного ДУ;  $H$  – высота профиля относительно окружности с радиусом  $R_0$ ;  $\varepsilon = \psi - \bar{\psi}$ ;  $\gamma = \theta - \bar{\theta}$ . Индекс «0», а также черта означают среднее интегральное значение по радиальному профилю. Функции  $H, \varepsilon, \gamma$  имеют аргументом  $\varphi$  – азимутальную координату точки на радиальном профиле контролируемой поверхности.

В свою очередь линеаризованное ДУ (8) решается применением дискретного преобразования Фурье и решением является алгебраическая связь между гармониками Фурье-спектра профиля  $H$  одинаковой пространственной частоты и правой части ДУ.

Правая часть уравнения записывается в виде ряда Фурье:

$$W(\varphi_i) = \sum_{j=1}^{[N/2]} \alpha_j \cdot \cos(j \cdot \varphi_i) + \beta_j \cdot \sin(j \cdot \varphi_i). \quad (9)$$

Коэффициенты данного ряда (9) вычисляются по формулам:

$$\alpha_j = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} W(\varphi_i) \cdot \cos(j \cdot \varphi_i), \quad (10)$$

$$\beta_j = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} W(\varphi_i) \cdot \sin(j \cdot \varphi_i), \quad (11)$$

$$\alpha_{N/2} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} (-1)^i \cdot W(\varphi_i). \quad (12)$$

Таким образом, нам удалось найти связь между параметрами гармоники Фурье-спектра функций  $\varepsilon$  и  $\gamma$  соответствующей гамоники Фурье-спектра высот  $H$ .

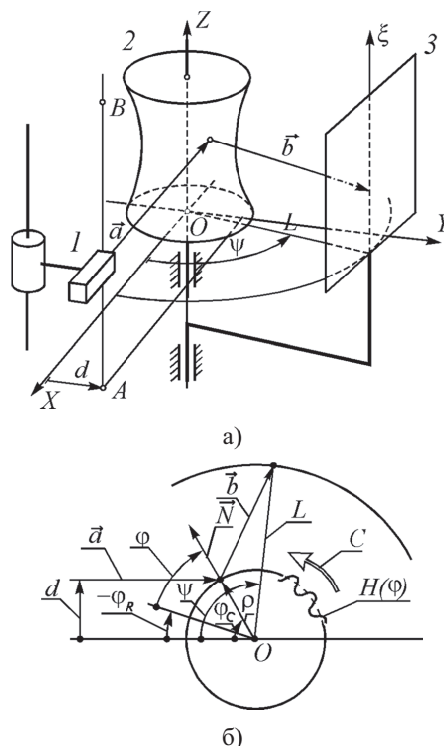


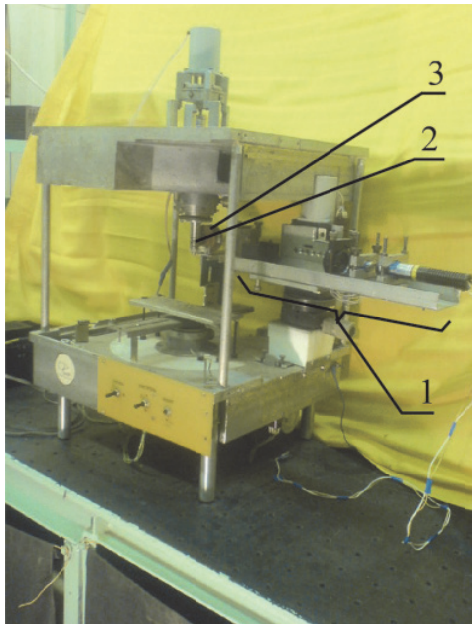
Рис. 2. Оптико-механическая схема прибора:  
а – общий вид; б – вид снизу;

1 – источник излучения; 2 – контролируемая поверхность; 3 – видеокамера;  $AB, C$  – направления сканирования;  $\vec{a}$  – падающий и  $\vec{b}$  – отраженный лучи света;  $y, x$  – координаты точки падения отраженного луча на фотоприемник;  $d$  – смещение источника излучения;  $L$  – радиус поворота каретки с видеокамерой;  $\varphi$  – азимутальная координата освещенной точки поверхности 2 в системе координат, связанной с этой поверхностью;  $\varphi_R$  – угол поворота поверхности 2;  $\varphi_c$  – азимутальная координата освещенной точки поверхности 2 в системе координат, связанной со сканером

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Лабораторный макет прибора (рис. 3) был создан в Самарском филиале Физического института им. П. Н. Лебедева РАН. О его технических характеристиках сообщалось на конференции «Высокие технологии в машиностроении» в Санкт-Петербурге в 2008 году.

Предварительные результаты серии измерений с целью оценки их основной погрешности приведены в [6]. Отметим, что при этом прибор обеспечивал дискретность показаний с радиального профиля 600 отсчетов при контроле желоба внутреннего кольца шарикоподшипника типа 201. При этом радиус радиального профиля по дну желоба составлял 8,34 мм. В этих измерениях в источнике излучения в приборе использовался полупроводниковый лазер ближнего инфракрасного диапазона с длиной волны 0,78 мкм. Диаметр диафрагмы, ограничивающей параллельный коллимированный пучок



**Рис. 3.** Оптико-механический блок прибора:

1 – источник излучения;

2 – контролируемая поверхность; 3 – фотоприемник

лазера, составлял 3 мм, в пределах ее апертуры распределение мощности пучка лазера было близким к равномерному.

### ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам статистического анализа этих измерений были определены основные факторы погрешности измерений. Наиболее важный из них связан с качеством узла поворота контролируемой детали. Сделан вывод о том, что, во-первых, прибор может достичь предельной погрешности измерений, требуемых стандартом [7] (радиальная погрешность 0,05 мкм). Кроме того, уже в этой версии прибор уверенно выявлял дефекты формы поверхности для части качеств колец подшипников в соответствии с методикой [8]. Однако прибор нуждается в усовершенствовании, его метрологические характеристики могут быть улучшены. Это связано также с переходом на более коротковолновый излучатель – полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 0,405 мкм (фиолетовый цвет). При уменьшении параметра  $L$  прибора с 35 до 20 мм это дает требуемую методикой дискретность отчетов радиального профиля 2000 на оборот. При этом диаметр ограничивающей диафрагмы должен быть увеличен до 5 мм при сохранении равномерной освещенности в пределах ее апертуры. Это показали расчеты и эксперименты, сделанные авторами.

Учитывая недостаток финансирования разработки, мы предлагаем сбор и предварительную обработку данных проводить там, где для этого есть технические возможности, а вычис-

ления, связанные с получением профиля и контурных картин поверхности изделия, контролируемого прибором, а также статистическую обработку полученных данных, выполнять в «облаке».

### СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНАЛ КОМПЛЕКСА

Входной сигнал в программном комплексе – это файл, в котором в символьных кодах записаны зависимости  $\varepsilon(\varphi)$  и  $\gamma(\varphi)$  для радиального профиля контролируемой поверхности, а также параметры настройки оптической схемы и дискретность сканирования по  $\varphi$  и  $z$ . Комплекс обрабатывает сразу целую серию таких файлов, полученных при повторных измерениях, для каждого из файлов рассчитывает  $H(\varphi)$  и статистические параметры отклонений от круглости, включая границы доверительного интервала, попутно оценивая вероятность принадлежности выборки к нормальному закону распределения. Кроме того, оценивается и погрешность в каждом отсчете радиального профиля  $H(\varphi)$ , при условии, если серия измерений выполнена при одинаковом начальном положении контролируемой детали и координате  $z$ .

На рис. 4 представлена диаграмма вариантов использования автоматизированной системы. Отметим, что здесь слово «волнистость» понимается как любое отклонение от круглости, по выбору пользователя.

Автоматизированная система разрабатывается на языке высокого уровня Java с применением Spring Framework и позволяет производить вычисления в многопользовательском режиме.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описана физическая и математическая модель лазерного кругломера, приведена структура и функционал его программного комплекса, которые отличаются распределенностью вычислений. Авторы в своем предложении учли экспериментальные результаты, полученные ими ранее.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Белопухова В.Н. за разработку основы аппаратно-программного комплекса, Понявина Ю.О. и Чigareва А.С. за разработку «локальной» версии программы статистического анализа результатов измерений экспериментального лазерного кругломера, а также Треумова В.Д. и Попика С.И. за помощь в расчетах параметров источника излучения в приборе.



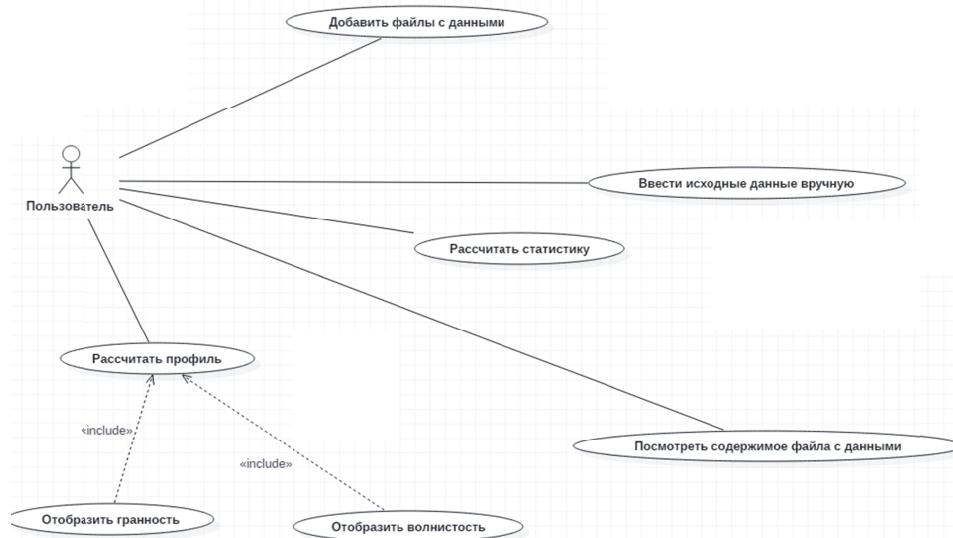


Рис. 4. Диаграмма вариантов использования автоматизированной системы

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sato Atsushi. Высокоточный профилометр типа Maxim 3D-5700 // Кэйсоку гидзюцу. = Instruments and Automation. 1991. No. 2, Vol. 19. С. 54 – 58. (Яп., рез. англ.).
2. Осипович И. Р., Пуряев Д. Т. Интерферометрический метод контроля формы асферических поверхностей качества прецизионных подшипников // Вестник Московского государственного технического университета. Сер. Приборостроение. 1999. Вып. 3. С. 65 – 75, 128.
3. Calibration of a Shack-Hartmann sensor for absolute measurements of wavefronts / A. Chernyshov, U. Sterr, F. Riehle, J. Helmske, J. Pfund // Applied Optics. 2005. No. 30, Vol. 44. P. 6419 – 6425.
4. Roschani M., Beyerer J. Planungs-basierte Oberflächeninspektion in der Deflectometrie mittels Greedy. Optimierung = Вероятностный метод выбора оптимальных сенсорных конфигураций при тестировании поверхности с помощью дефлектометрии // Technische Messen = Технические измерения. 2013. 80, No. 6. С. 189 – 195. (Нем., рез. англ.).
5. Заякин О. А. Получение профилей и контурных картин поверхностей вращения способом триангуляции с использованием зеркально отраженного излучения // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Физ.-мат. науки. 2007. №2 (15). С. 95 – 101.
6. Заякин О. А. Информационно-измерительная система контроля деталей подшипников, погрешность измерений отклонений от круглости // Высокие технологии в машиностроении: Материалы международной научно-технической конференции. Самара: Изд. Самарского гос. техн. ун-та, 2004. С. 118 – 120.
7. ГОСТ 17353-89. Приборы для измерений отклонений формы и расположения поверхностей вращения. Типы. Общие технические требования. Введ. 1991-01-01; ИУС2-96, утв. в декабре 1995 г. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 9 с.
8. Подшипники качества. Допуски круглости и волнистости поверхностей качества подшипников категорий А и В: Руководящий документ РД ВНИПП.013-00. Введ. 2000 -06- 01 ; срок действия до 2018- 01 – 01. М.: НПО ВНИПП, 2000. 15 л.

### PILOT LASER ROUNDNESS METER, RESEARCH FOR THE MAIN MEASUREMENT ERROR

© 2017 O.A. Zayakin, A.V. Manukhin, A.A. Rostov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The physical and mathematical models for a pilot roundness meter are described. This device scans a surface by a focused beam and determines the reflected beam coordinates. Preliminary results of a measurements series are presented to estimating its main error. The error main factors are evaluated from analyzing this series. Then it was found that the device needs for improving its metrological performance. Taking into account a lack in founding of this research it is proposed to perform a data acquisition and pre-calculating, where the proper technical possibilities are presented. Meanwhile all calculations related with the surface under test profile and map retrieval, and the statistical calculations have to be performed in a “cloud”. The roundness meter structure and features are presented. It is characterized with distributed computing.  
 Keywords: geometrical values measurement, triangulation, three-dimension scanner, roundness, bearing ring, mathematical model, statistical data treatment, “cloud” computing.

Oleg Zayakin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Information Systems and Technologies Department. E-mail: olez\_zayakin@inbox.ru  
 Aleksander Manukhin, Magister at the Department of Information Systems and Technologies. E-mail: manuxin.alexander@yandex.ru  
 Aleksey Rostov, Magister at the Department of Information Systems and Technologies. E-mail: rostovchik512@mail.ru