

**ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО КРУГЛОМЕРА**© 2016 О. А. Заякин<sup>1,2</sup>, В. Н. Белопухов<sup>3</sup>, А. В. Манухин<sup>1</sup><sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева<sup>2</sup> Самарский филиал Физического института им. П. Н. Лебедева РАН<sup>3</sup> Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Статья поступила в редакцию 11.11.2016

Представлены результаты численного моделирования влияния шумов на информативные параметры кругломера, разработанного в Самарском филиале Физического института РАН. Прибор сканирует поверхность сфокусированным пучком света и определяет координаты зеркально отраженного пучка. Исследовано два алгоритма определения: первый - по «центру тяжести» и второй - аппроксимацией. Цифровая адаптивная пороговая фильтрация сигнала уменьшала влияние модельного шума. Результаты удовлетворительно совпали с данными исследований погрешности от дискретизации сигнала, приведенными в литературе. Гистограммы статистической выборки результатов моделирования измерений объемом 10000 для обоих алгоритмов практически не отличались от нормального распределения. При этом второй алгоритм имел в полтора раза большую погрешность от влияния шумов, чем первый.

*Ключевые слова:* измерение геометрических величин, триангуляция, трехмерный сканер, моделирование численное, оптимизация, параметры, круглость, кольцо подшипника, шум, аппроксимация.

*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.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Приборы на основе оптической триангуляции достаточно широко применяются сейчас для трехмерного сканирования и технического зрения. Зачастую они входят в состав систем автоматизированного проектирования и инженерного анализа. Однако недостаточное качество входного сигнала, или, иначе говоря, отклика первичного преобразователя, в ряде задач серьезно сдерживает их распространение. При этом одним из основных факторов являются оптические и электронные шумы. В связи с чем, конечно, наряду с поисками мер по борьбе с источниками этих шумов и устранению их причин, также являются актуальными исследования алгоритмов обработки входного сигнала на стойкость к их действию. В последнем случае, наряду с фильтрацией шумов, положительный эффект дает

также статистическая обработка. При последней сигнал представляют как случайный процесс с наличием некоторой постоянной составляющей, либо тренда, которые и содержат информативные параметры. Искомые параметры, очевидно, имеют свойство быть более устойчивыми к действию шума, чем единичный отсчет, или же, например, экстремум, как это имеет место при поиске максимума отклика.

Цель нашей работы – уменьшение влияния шумов на входной сигнал типичного триангуляционного прибора. Это должно содействовать расширению области применения приборов указанного типа. В данной работе мы ограничились более подробным рассмотрением двух наиболее часто используемых алгоритмов статистической обработки.

**ПРЕДПОСЫЛКИ**

В нашей работе представлены результаты численных расчетов изменения величин информативных параметров двумерного лазерного триангулятора [1] под влиянием шумов. Этот перспективный прибор, предназначенный для контроля качества формы рабочих поверхностей подшипников, разрабатывался в Самарском филиале Физического института РАН. Результаты расчетов получены с помощью специально соз-

*Заякин Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, научный сотрудник Самарского филиала Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.*

*E-mail: oleg\_zayakin@inbox.ru*

*Белопухов Валентин Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник. E-mail: bvnsam@mail.ru*

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

*E-mail: sachok1394@mail.ru*

данной компьютерной программы. Программа создана на MathCad 14.

Сущность способа, лежащего в основе действия исследуемого прибора, заключается в сканировании контролируемой поверхности узким сфокусированным пучком света лазера и регистрации местоположения пучка света, зеркально отражаемого при этом данной поверхностью, позиционно-чувствительным (в данном случае матричным) фотоприемником на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС). Фотоприемники этого типа широко распространены в настоящее время. Идея способа в чем-то напоминает датчик волнового фронта Шака-Гартмана [2], только у нас гартманограмма, в виртуальном виде, получается последовательным сканированием с дискретным шагом, что заменяет множество субапертур. Это оправдано при контроле поверхностей относительно большой и сложной кривизны, которые встречаются, например, в машиностроении и которые, разумеется, не предполагается использовать в качестве элементов оптики, как это обычно имеет место в задачах с контролем гармановскими датчиками.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Лазерный пучок в кругломере, отраженный от контролируемой поверхности, несет нужную нам информацию. Этот пучок может быть удовлетворительно описан астигматическим, в общем случае, гауссовым пучком [3]. Функция, которая его описывает, есть двумерный гауссиан. Особенности гауссовой функции, точнее, экспоненты - этой функцией она выражена - позволяют ее представить в виде произведения двух одномерных гауссианов [4]. Это позволяет, в свою очередь, создать, при необходимости, расчетную модель погрешности, исследовав по отдельности влияние одинаковых факторов на погрешности указанных двух сомножителей - одномерных гауссианов.

Отметим, что рассмотрение одномерного гауссиана также вполне подходит для оптических полей, формируемых цилиндрическими оптическими элементами, то есть фокусирующих пучок света в линию. Для примера можно назвать похожую по идее систему автоматизированного определения дефектов формы и структуры зеркально отражающих поверхностей [5], или триангуляционные схемы с использованием метода «светового сечения» [6].

Таким образом, в качестве модельной функции нами был взят, для простоты, одномерный гауссиан:

$$y_0(n) = \exp\left(-\frac{2(x-x_0)^2}{L^2}\right), \quad (1)$$

где  $x$  задавался дискретными отсчетами.

Он моделировал распределение мощности лазерного пучка, отраженного контролируемой по-

верхностью, на позиционно-чувствительном фотоприемнике, то есть входной сигнал в триангуляторе в заданный момент. Информативными параметрами в двумерном лазерном триангуляторе являлись координаты центра лазерного пучка на фотоприемнике. Параметр  $x_0$  был задан равным нулю, а амплитуда была принята равной единице. На наш взгляд, это не снижало общности рассмотрения, но, в то же время, упрощало формулы для моделирования.

Шумы, возникающие как от электроники, так и от лазера, моделировались, для простоты, белым шумом, имеющим аддитивную и мультипликативную составляющие:

$$y(x) = \left(1 - \frac{A}{2} + A \chi\right) y_0(x) - B \xi. \quad (2)$$

Первое слагаемое моделировало мультипликативную составляющую шума (неоднородность чувствительности элементов ПЗС-фотоприемника), второе - аддитивную (погрешность амплитудно-цифрового преобразования);  $s$  и  $x$  - случайные величины с равномерных распределением в интервале значений больше нуля, но меньше единицы;  $s$  и  $x$  не зависели друг от друга.

Величины коэффициентов  $A$  и  $B$ , задающих в модели амплитуду шума, были выбраны нами из данных наших же экспериментов [7], а также сведений из литературы [8]:  $A=0,04$ ,  $B=0,005$ .

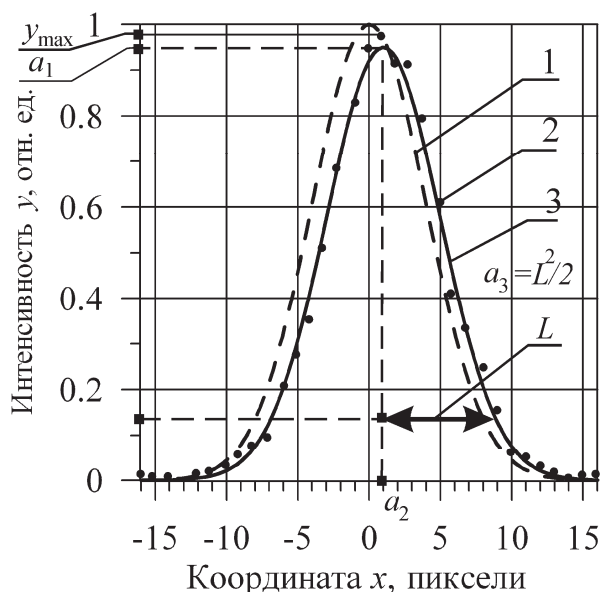
В нашей программе присутствовали два алгоритма расчета центра пятна. По первому из них этот центр вычислялся как «центр тяжести», или, как говорят оптики, «энергетический центр». Он определялся как первый начальный момент модельной функции. Для статистической оценки искомой величины в программе задавалось количество повторений процедуры этого алгоритма. По выборочной дисперсии рассчитывалась статистическая оценка (в виде С.К.О.). Другие параметры сигнала и шума пользователь должен был задавать самостоятельно.

По второму алгоритму искомый центр определялся как координата максимума аппроксимирующей функции. Аппроксимирующая функция в программе задана такого же вида, как и модельная. Это гауссиан с тремя искомыми параметрами (см. рис. 1):

$$y(x) = a_1 \exp\left[-(x - a_2)^2 / a_3\right]. \quad (3)$$

где  $a_1$  - амплитуда;  $a_2$  - координата максимума (нужная нам величина);  $a_3$  - параметр ширины,  $a_3=L^2/2$ . Аппроксимация проводилась по известному методу наименьших квадратов. Для этого находили  $a_1, a_2, a_3$  из системы уравнений:

$$F_1(a_1, a_2, a_3) = \sum_i y(x) = \left\{ y_i - a_1 \exp\left[\frac{(x_i - a_2)^2}{a_3}\right] \right\} \times \exp\left[\frac{(x_i - a_2)^2}{a_3}\right] = 0; \quad (4)$$



**Рис. 1.** Аппроксимация гауссианом:  
1 – функция без шума; 2 – отсчеты функции с добавлением шума; 3 – аппроксимирующий гауссиан

$$F_2(a_1, a_2, a_3) = \sum_i y(x) = \left\{ y_i - a_1 \exp\left[\frac{(x_i - a_2)^2}{a_3}\right] \right\} \times \quad (5)$$

$$\times \exp\left[\frac{(x_i - a_2)}{a_3}\right] \quad x_i = 0;$$

$$F_3(a_1, a_2, a_3) = \sum_i y(x) = \left\{ y_i - a_1 \exp\left[\frac{(x_i - a_2)^2}{a_3}\right] \right\} \times \quad (6)$$

$$\times \exp\left[\frac{(x_i - a_2)}{a_3}\right] \quad x_i^2 = 0.$$

Для решения (4 - 6) использовался метод Ньютона. При этом первое приближение выбиралось в виде:

$$a_{10} = \max(y_i); \quad (7)$$

$$a_{20} = \frac{\sum_i y_i x_i}{\sum_i y_i}; \quad (8)$$

$$a_{30} = -\frac{2 \sum_i y_i (x_i - a_{20})^2}{\sum_i y_i}. \quad (9)$$

После решения системы уравнений

$$F_{10} + \frac{\partial F_{10}}{\partial a_1} \varepsilon_1 + \frac{\partial F_{10}}{\partial a_2} \varepsilon_2 + \frac{\partial F_{10}}{\partial a_3} \varepsilon_3 = 0; \quad (10)$$

$$F_{20} + \frac{\partial F_{20}}{\partial a_1} \varepsilon_1 + \frac{\partial F_{20}}{\partial a_2} \varepsilon_2 + \frac{\partial F_{20}}{\partial a_3} \varepsilon_3 = 0; \quad (11)$$

$$F_{30} + \frac{\partial F_{30}}{\partial a_1} \varepsilon_1 + \frac{\partial F_{30}}{\partial a_2} \varepsilon_2 + \frac{\partial F_{30}}{\partial a_3} \varepsilon_3 = 0, \quad (12)$$

где  $F_{10}=F_1(a_{10}, a_{20}, a_{30})$ ;  $F_{20}=F_2(a_{10}, a_{20}, a_{30})$ ;  $F_{30}=F_3(a_{10}, a_{20}, a_{30})$ , определялась поправка  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ . Затем делалась замена:  $a_{10} \rightarrow a_{10} + \varepsilon_1$ ;  $a_{20} \rightarrow a_{20} + \varepsilon_2$ ;  $a_{30} \rightarrow a_{30} + \varepsilon_3$  в (10 - 12) и находились следующие поправки  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , продолжая процесс до тех пор, пока не выполнялись условия:  $|\varepsilon_1| < \varepsilon_{1 \min}$ ;  $|\varepsilon_2| < \varepsilon_{2 \min}$ ;  $|\varepsilon_3| < \varepsilon_{3 \min}$ .

Пределы допустимых в наших расчетах погрешностей определения параметров гауссиана (амплитуды, координаты центра и полуширины) были заданы соответственно 0,003 (от максимума гауссиана),  $1 \cdot 10^{-6}$  (доли дискретного отсчета ПЗС-фотоприемника) и 0,01 от  $L$  (1).

Из-за значительно большего времени счета, по сравнению с первым алгоритмом, статистическая оценка по второму алгоритму в программе не проводилась. Для этого мы использовали другую программу статистических расчетов, специально созданную нами. Файл данных для нее мы формировали с клавиатуры.

Существенным моментом в нашей программе было применение цифровой адаптивной пороговой фильтрации сигнала, при которой отчеты, меньшие некоторого порогового уровня, заданного в долях максимума отклика, отбрасывались, чтобы они не увеличивали погрешность определения центра отклика. При этом заданный уровень также должен был быть не менее уровня фонового шума. Этот фактор, связанный с отчетами распределения мощности лазерного пучка на краях одномодального оптоэлектронного отклика (1), был обнаружен нами из численного моделирования, благодаря чему мы заблаговременно внесли в нашу программу соответствующие изменения. При этом уровень порога фильтрации был нами выбран опытным путем (по критерию минимума погрешности определения координаты максимума) равным  $\exp(-2)$  от максимума оптоэлектронного отклика (это 13%).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для верификации нашей программы, мы сравнили наши результаты с полученными ранее [9] другими специалистами, которые исследовали влияние дискретности на погрешность оптического триангулятора. В их работах центр отклика определялся по «центру тяжести». Для сравнения мы задали нулевой уровень шума. Сравнение показало, что результаты удовлетворительно совпадали, что придало нам уверенности в правильности наших вычислений.

По результатам работы программы построены гистограммы, по которым видно отклонение рассчитанной координаты центра (или же максимума), возникающее при действии шума. Гистограммы статистической выборки в обоих случаях (объем выборки мы брали равный 10000) практически соответствовали нормальному распределению непрерывной случайной величины.

Результаты показали, что алгоритм аппроксимации гауссианом имел в полтора раза большую погрешность от влияния шумов, чем алгоритм «центра тяжести» (см. рис. 2). Очевидно, что учет двумерности оптического отклика не мог бы качественно изменить этот результат.

Следует признать, что при сравнении с алгоритмом (который мы здесь не рассматривали) поиска центра по медиане, то есть, по равенству площадей под графиком функции отклика, эффект был бы еще скромнее, хотя и не слишком значительным. Утверждают, что это свойство медианного алгоритма отметил еще выдающийся российский ученый Д. И. Менделеев.

## ВЫВОДЫ

Определены величины погрешности нахождения координаты центра входного сигнала триангуляционного прибора от влияния оптических и электронных шумов первичного преобразователя этого прибора. Они удовлетворяли требованиям, предъявляемым в такой практически важной задаче, как, например, [1] контроль круглости радиального профиля желоба колец подшипников.

В то же время исследованный алгоритм аппроксимации этого входного сигнала одномерным гауссианом требовал значительного большего, на два порядка, времени работы цифрового вычислительного устройства (так, количество итераций получалось от 12 до 15, при этом на каждой итерации выполнялся расчет трех параметров вместо одного).

Но при этом с помощью данного алгоритма не получилось достичь меньшей погрешности, чем при использовании гораздо более простого и быстрого алгоритма на основе определения «центра тяжести». То есть он не мог дать нужного эффекта, для которого предназначался.

Желательно продолжать исследования в этом направлении с другими алгоритмами, например, с алгоритмом, основанным на поиске медианы сигнала.

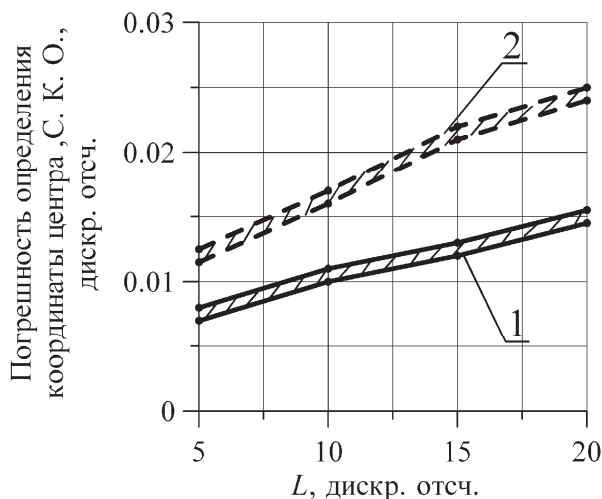


Рис. 2. Результаты численного моделирования: 1 — алгоритм «центра тяжести»; 2 — аппроксимация гауссианом

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем признательность В. Н. Подвигину за полезные обсуждения и помощь в работе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабораторный макет лазерного кругломера / В. Н. Белопухов, М. Ю. Грачев, М. В. Лесников, О. А. Заякин, Ю. О. Попявин // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2012): Сб. науч. тр. Самара, 2012. С. 10 - 13.
2. 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.
3. Method of measuring the astigmatic distance of laser diodes / V. L. Velichanskii, A. S. Zibrov, S. P. Kotova, et al. // Journal of Soviet Laser Research. 1991. Vol. 12, No. 4. P. 341 - 352.
4. Величанский В. Л., Чернышов А. К. Преобразование эллиптического пучка излучения инжекционного лазера в аксиально-симметричный пучок // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1996. № 3 - 4. С. 38 - 45.
5. Automatic detection of surface and structural defects on reflecting workpieces / Y. Caulier, K. Spinnler, M. Arnold, A. Goldschmidt // Photonik International. 2008. No. 2. P. 30 - 32.
6. Буцких В. А. Методы обработки видеoinформации на основе алгоритмов слепой идентификации в системах с лазерными триангуляционными измерителями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2012. 16 с.
7. Заякин О. А. Информационно-измерительная система контроля деталей подшипников на основе двумерной лазерной триангуляции: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.: Самара, 2005. 19 с.
8. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Основы физики приборов



с зарядовой связью. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 320 с.  
9. Волков Е. В., Плотников С. В. Исследование влияния

ширины зондирующего пучка на погрешность измерения триангуляционных систем // Автометрия. 1997. № 2. С. 19 – 25.

## THE INFLUENCE OF NOISE ON THE MEASUREMENT ERROR OF THE PILOT LASER ROUNDNESS METER

© 2016 O. A. Zayakin<sup>1,2</sup>, V. N. Belopukhov<sup>3</sup>, A. V. Manukhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

<sup>2</sup> Lebedev Physical Institute, Samara Branch

<sup>3</sup> Institute of Control of Complex Systems, RAS, Samara

Results of noise influence numerical modeling on the roundness meter informative parameters are presented. This device was developed at Samara Branch of Physical Institute of RAS. This device scans a surface by a focused beam and determines the reflected beam coordinates. Two algorithms were studied: the first one was based on a “weight center” approach, and the second one was based on an approximation. A digital adaptive threshold signal filtering reduced the influence of the modeled noise. The results have satisfactorily coincided with the research data error on the sampling of the signal given in the literature. The statistics sample volume of 10000 histograms of the simulation results of measurements didn't practically distinguish from a normal distribution for both of the algorithms. It proved to be that the second algorithm had the error in one and a half times more that the first one.

*Keywords:* geometrical values measurement, triangulation, three-dimension scanner, numerical modeling, optimization, parameters, roundness, bearing ring, noise, approximation.

---

*Oleg Zayakin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Informational Systems and Technologies Department, Research Fellow. E-mail: olez\_zayakin@inbox.ru*

*Valentin Belopukhov, Candidate of Technics, Research Fellow. E-mail: bvnsam@mail.ru*

*Aleksander Manukhin, Magister at the Informational Systems and Technologies Department. E-mail: sachok1394@mail.ru*