



О. А. Заякин¹, В. Н. Белопухов², В. Д. Треумов¹

ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ МАКСИМУМА ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ОТКЛИКА КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

(¹Самарский государственный аэрокосмический университет)

(²Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара)

Представлены результаты численных расчетов изменения величин информативных параметров двумерного лазерного триангулятора [1] под влиянием электронных 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 созданной 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, только у нас гартманограмма, в виртуальном виде, получается последовательным сканированием с дискретным шагом, что заменяет множество субапертур.

В качестве модельной функции был взят, для простоты, одномерный гауссиан:

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

где x задается дискретными отсчетами.

Он моделировал распределение мощности лазерного пучка, отраженного контролируемой поверхностью, на позиционно-чувствительном фотоприемнике, то есть входной сигнал в триангуляторе в заданный момент. Информативными параметрами в двумерном лазерном триангуляторе являются координаты центра лазерного пучка на фотоприемнике.

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); χ и ξ -случайные величины с равномерным распределением в интервале значений больше нуля, но меньше единицы; χ и ξ не зависят друг от друга.

Величины коэффициентов A и B , задающих в модели амплитуду шума, были выбраны нами из данных наших же экспериментов [2], а также сведений из литературы [3]: $A=0,04$, $B=0,005$.

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:

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

где a_1 - амплитуда; a_2 - координата максимума (нужная нам величина); a_3 - полуширина. Аппроксимация проводилась по известному методу наименьших квадратов. Для этого находили a_1 , a_2 , a_3 из системы уравнений:

$$\begin{aligned} F_1(a_1, a_2, a_3) &= \sum_i y(x) = \{y_i - a_1 \exp[(x_i - a_2)^2 / a_3]\} \exp[(x_i - a_2) / a_3] = 0; \\ F_2(a_1, a_2, a_3) &= \sum_i y(x) = \{y_i - a_1 \exp[(x_i - a_2)^2 / a_3]\} \exp[(x_i - a_2) / a_3] x_i = 0; \\ F_3(a_1, a_2, a_3) &= \sum_i y(x) = \{y_i - a_1 \exp[(x_i - a_2)^2 / a_3]\} \exp[(x_i - a_2) / a_3] x_i^2 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для решения (2) использовался метод Ньютона. При этом первое приближение выбиралось в виде:

$$a_{10} = \max(y_i); a_{20} = \frac{\sum_i y_i x_i}{\sum_i y_i}; a_{30} = -\frac{2 \sum_i y_i (x_i - a_{20})^2}{\sum_i y_i}. \quad (5)$$

Решив систему

$$\begin{aligned} F_{10} + \frac{\partial F_{10}}{\partial a_1} \varepsilon_1 + \frac{\partial F_{10}}{\partial a_2} \varepsilon_2 + \frac{\partial F_{10}}{\partial a_3} \varepsilon_3 &= 0; \\ F_{20} + \frac{\partial F_{20}}{\partial a_1} \varepsilon_1 + \frac{\partial F_{20}}{\partial a_2} \varepsilon_2 + \frac{\partial F_{20}}{\partial a_3} \varepsilon_3 &= 0; \\ F_{30} + \frac{\partial F_{30}}{\partial a_1} \varepsilon_1 + \frac{\partial F_{30}}{\partial a_2} \varepsilon_2 + \frac{\partial F_{30}}{\partial a_3} \varepsilon_3 &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$



где $F_{10} = F_1(a_{10}, a_{20}, a_{30})$; $F_{20} = F_2(a_{10}, a_{20}, a_{30})$; $F_{30} = F_3(a_{10}, a_{20}, a_{30})$, определась поправка $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Затем делалась замена

$$a_{10} \rightarrow a_{10} + \varepsilon_1; a_{20} \rightarrow a_{20} + \varepsilon_2; a_{30} \rightarrow a_{30} + \varepsilon_3 \quad (7)$$

в (6) и находились следующие поправки $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, продолжая процесс до тех пор, пока не выполнялись условия:

$$|\varepsilon_1| < \varepsilon_{1 \min}; |\varepsilon_2| < \varepsilon_{2 \min}; |\varepsilon_3| < \varepsilon_{3 \min}. \quad (8)$$

Пределы допустимых в наших расчетах погрешностей определения параметров гауссиана (амплитуды, координаты центра и полуширины) были заданы соответственно 0,003 (от максимума гауссиана), 1×10^{-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, 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%).

Для верификации нашей программы, мы сравнивали наши результаты с полученными ранее [4] другими специалистами, которые исследовали влияние дискретности на погрешность оптического триангулятора. В их работах центр отклика определялся по «центру тяжести». Для сравнения мы задавали 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 несколько меньшую устойчивость к шумам, чем алгоритм «центра тяжести» (см. рис. 1).

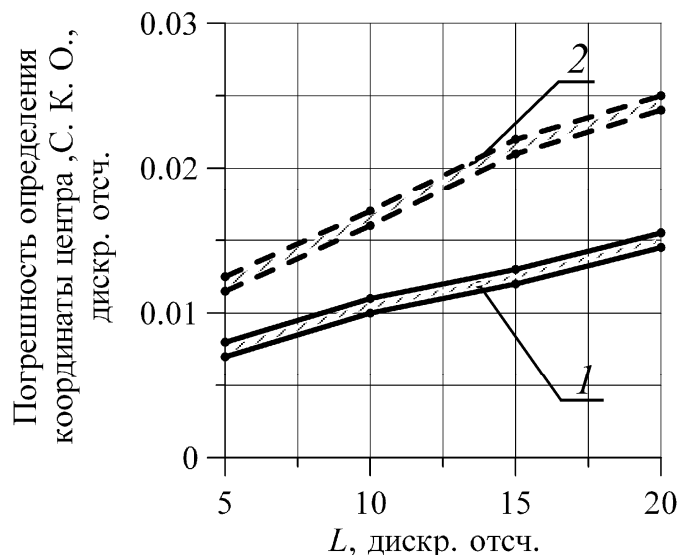


Следует признать, что при сравнении с алгоритмом (который мы здесь не рассматривали) поиска центра по медиане, то есть, по равенству объемов под графиком функции отклика, эффект был бы еще скромнее, хотя и не слишком значительно.

Полученные величины удовлетворяли требованиям в такой практически важной задаче [1], как, например, контроль круглости радиального профиля желоба колец подшипников.

В то же время исследуемый алгоритм аппроксимации требовал значительного большего, на два порядка, времени работы цифрового вычислительного устройства (так, количество итераций получалось от 12 до 15), но при этом не мог дать нужного эффекта, для которого он предназначался.

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



1 – алгоритм «центра тяжести»;
2 – аппроксимация гауссианом

Рис. 1 – Результаты численного моделирования

Литература

1. Белопухов, В. Н. Лабораторный макет лазерного кругломера [Текст] / В. Н. Белопухов, М. Ю. Грачев, М. В. Лесников, О. А. Заякин, Ю. О. Понявин // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2012) : сб. науч. тр.- Самара: Изд. Самарского научного центра РАН, 2012. - С. 10 - 13. - ISBN 978-5-93424-627-4.

2. Заякин, О. А. Информационно-измерительная система контроля деталей подшипников на основе двумерной лазерной триангуляции [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: специальность 05.11.16. - Самара: 2005. - 19 с.

3. Носов, Ю. Р. Основы физики приборов с зарядовой связью [Текст] / Ю. Р. Носов, В. А. Шилин. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. - 320 с.

4. Волков, Е. В. Исследование влияния ширины зондирующего пучка на погрешность измерения триангуляционных систем [Текст] / Е. В. Волков, С. В. Плотников // Автометрия. - 1997. - №2. - С. 19 - 25.