



Отметим, что для  $k=l$  при  $T_0 \leq \tau_0$  и  $\tau_0 \leq T_0 \leq 2\tau_0$  по отношению к  $\langle P(x_l) \rangle / 2\Delta_k$  имеют место мультипликативные погрешности равные соответственно 1 и  $(2\tau_0 - T_0) / T_0 [1 + (L-1)(T_0 - \tau_0) / \tau_0]$ . При этом отсутствуют аддитивные погрешности. При  $T_0 \geq 2\tau_0$  мультипликативная погрешность пропадает и появляется аддитивная  $(T_0 - 2\tau_0) / 2\Delta_k L T_0$ .

### Выводы

При линейной корреляционной функции  $\rho(\tau)$  традиционная гистограмма увеличивает погрешность измерения распределений  $\langle w_l[X] \rangle$ , поскольку столбцы гистограмм «расплываются» и налагаются друг на друга. Так, при переходе от экстраполяции к интерполяции процесса мультипликативная погрешность при  $T_0 \leq \tau_0$  и  $k=l$  уменьшается в  $\ln \left[ 1 + (L-1) \frac{T_0}{\tau_0} \right] / (L-1) \frac{T_0}{\tau_0}$  раз, а аддитивная погрешность при  $T_0 \geq 2\tau_0$  и  $k=l$  в  $\frac{T_0 - \tau_0}{T_0 - 2\tau_0}$  раз. Это позволяют не только оценить достоверность измерений плотности распределения вероятности  $\langle w_l(X) \rangle$  эргодических случайных процессов, но и оптимизировать их.

### Литература

1. Заико А. И., Нагаев О. Н. Измерение плотности вероятности эргодического случайного процесса // Труды междунар. НТК «Перспективные информационные технологии (ПИТ 2015)». – Т.1. – Самара: СНЦ РАН, 2015. – С.54-60.
2. Заико А. И. Случайные процессы. Модели и измерения: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 2006. – 207 с.
3. Заико А. И. Случайный процесс Заико с равномерным законом распределения // Вестник УГАТУ. – 2008. – Т.11. – № 1(28). – С. 188-193.
4. Zaiko A. I. Random signal with uniform distribution // Measurement Techniques. – 1999. – v. 42. – Juni. – P. 11-13.

О.А. Заякин<sup>1</sup>, В.Н. Белоухов<sup>2</sup>, В.Д. Треумов<sup>1</sup>

### ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ МАКСИМУМА ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ОТКЛИКА КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва,

<sup>2</sup>Институт 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 гартманогрмма, 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);  $\chi$  и  $\xi$  - случайные величины с равномерным распределением в интервале значений больше нуля, но меньше единицы;  $\chi$  и  $\xi$  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 искомым центром 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:

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

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

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

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

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

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

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

Пределы допустимых в наших расчетах погрешностей определения параметров гауссиана (амплитуды, координаты центра и полуширины) были заданы соответственно 0,003 (от максимума гауссиана),  $1 \times 10^{-6}$  (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 проводи-



лась. 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.

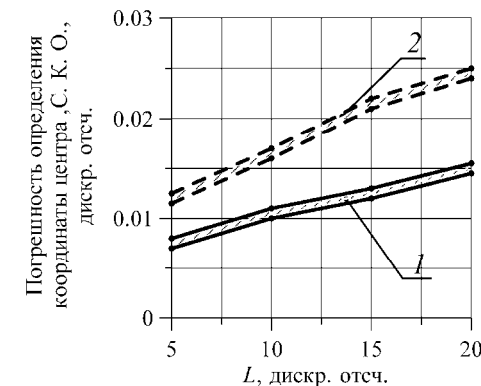
По результатам работы программы построены гистограммы, по которым видно отклонение рассчитанной координаты центра (или же максимума), возникающее при действии шума. Гистограммы статистической выборки в обоих случаях (объем выборки мы брали равный 10000) практически соответствовали нормальному распределению 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 практической важной задаче [1], как, например, контроль круглости радиального профиля желоба колец подшипников.

В то же время исследуемый алгоритм аппроксимации требовал



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

Рис. 1 - Результаты численного моделирования



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.

#### 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. Плотночников // Автометрия. - 1997. - №2. - С. 19 - 25.

А.В. Кауров

### ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ОБОРУДОВАНИЯ НАБЛЮДЕНИЯ В СРЕДНЕМ И ДАЛЬНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ

(АО «РКЦ «Прогресс»)

В данном докладе будет рассказано о создании технологии изготовления фотоприёмных устройств (ФПУ-ИК), обеспечивающих разработку высокодетального ИК-канала для перспективных систем оптико-электронного наблюдения.

Основными задачами были:

- разработка технологии гибридной сборки фоточувствительной матрицы, мультиплексора и светофильтров;
- разработка, изготовление и испытания опытных образцов ИК-приемников;
- разработка технологий, обеспечивающих высокодетальный уровень разрешения;
- технология обработки информации, в том числе устранения неравномерности чувствительности ИК-приемников, сшивки фотозон ИК-приемников, реализации цифрового режима ВЗН ИК-приемников, фильтрации частотно-шумовых искажений;



- разработка, изготовление и испытания макетных образцов, подтверждающие эффективность предлагаемых технологий;

Информационный макет ФПУ-ИК предназначен для исследования информационных возможностей параметрического ряда ИК-приемников на базе InSb (3...5 мкм), Si<Ga> (8...14 мкм).

Информационный макет ФПУ-ИК должен обеспечивать:

- а) установку в ФПУ-ИК матричных ИК-приемников;
- б) возможность смены в ФПУ-ИК типа приемника для сравнительной оценки их информационных возможностей;
- в) имитацию основных характеристик оптической системы (светосила, спектральный диапазон работы, фоновая засветка приемников и т.д.);
- г) имитацию фоно-целевой обстановки:
  - мира с регулируемым температурным контрастом 0,1-5 К;
  - фон с регулируемой температурой от минус 10°C до плюс 40°C;
  - д) температурный уровень криостатирования приемников от 20К до 120К.

По результатам испытаний на информационном макете ФПУ-ИК должны быть оценены при различной фоно-целевой обстановке:

- разрешение ИК-канала по тепловой mire;
- радиометрическая чувствительность (НЕΔТ) ИК-канала;
- допустимые температурные уровни криостатирования элементов ФПУ.

Использование фотоприемника, работающего в режиме временной задержки и накопления (ВЗН), даёт возможность увеличения времени накопления сигнала на отсчете изображения, обеспечивая необходимое отношение сигнал/шум при больших значениях скорости бега изображения и, соответственно, повысить производительность системы в целом.

Экспериментальные исследования эффективности ВЗН подтвердили степенную зависимость роста отношения сигнал/шум от числа шагов накопления с показателем в диапазоне от 0,4 до 0,49.

Другим важным преимуществом ВЗН является улучшение однородности характеристик чувствительности фотоприемника и снижение уровня геометрического шума за счет усреднения по пикселям в направлении сканирования изображения.

ВЗН-организация не требует обязательно плотного расположения фоточувствительных областей соседних пикселей в строке - для эффективной работы ВЗН важно лишь одно, чтобы каждый элемент сцены был просмотрен («накоплен») последовательно всеми элементами строки ВЗН, и чтобы выходные сигналы этих пикселей были просуммированы в соответствующих фазах. То, какое расстояние при этом имеется между последовательными пикселями в направлении сканирования, решающего значения не имеет. Соответствующая конструкция прибора получила название разреженной структуры ВЗН. В основе концепции разреженной структуры ВЗН лежит то обстоятельство, что нет необходимости располагать пиксели в направлении