

ОПТИКА ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 531.715.2

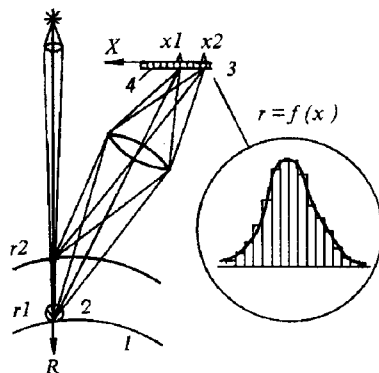
С. В. Плотников

(Новосибирск)

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Проведено сравнение методических погрешностей, возникающих при различных способах обработки сигналов в триангуляционных измерительных системах. Получены значения погрешностей при обработке модельных сигналов методами: на основе аппроксимации сигнала гаусс-функцией, медианным и по центру тяжести. Для двух последних при обработке реальных сигналов получены близкие значения погрешностей. Исследовано влияние предварительной пороговой обработки реальных сигналов и установлена значительная зависимость вычисляемых координат от величины порога.

Введение. В настоящее время оптические системы размерного контроля находят широкое применение во многих отраслях промышленности. Интерес к подобным системам вызван их высокой точностью и производительностью в сочетании с бесконтактным способом измерений. Многие задачи размерного контроля оптимально решаются применением систем на основе триангуляционного метода измерений [1]. Суть его состоит в формировании на поверхности контролируемого изделия 1 светового пятна 2, построении изображения 3 этого пятна, определении положения изображения x и расчете по известным соотношениям координаты поверхности r (рис. 1). Как правило, в реальных триангуляционных системах изображение пятна проецируется на многоэлементный фотоприемник 4, дискретный по координате аналоговый сигнал которого затем преобразуется в цифровой. Таким образом, полученный сигнал является дискретным по координате и квантованным по уровню. Форма сигнала в целом близка к профилю интенсивности зондирующего пучка и имеет колоколообразное распределение. Задача последующей обработки сигнала состоит в том, чтобы связать с сигналом числовой параметр (положение центра тяжести, медианы и т. п.), который можно считать координатой x изображения пятна относительно фотоприемника. Выбор метода обработки сигнала определяется двумя факторами: с одной стороны, он не должен вносить существенных погрешностей, а с другой — допускать при его реализации малый объем необходимых вычислений. Первое из требований вытекает из ограничений на суммарную погрешность измерительной системы, второе — из соображений



изображения пятна относительно фотоприемника. Выбор метода обработки сигнала определяется двумя факторами: с одной стороны, он не должен вносить существенных погрешностей, а с другой — допускать при его реализации малый объем необходимых вычислений. Первое из требований вытекает из ограничений на суммарную погрешность измерительной системы, второе — из соображений

Рис. 1. Триангуляционный метод измерения

обеспечения необходимого быстродействия. На практике эти требования часто оказываются противоречивыми, чем и объясняется как многообразие предлагаемых различными авторами [1, 2] методов обработки сигналов, так и большой интерес и активные изыскания в этой области разработчиков триангуляционных измерительных систем.

В настоящей работе проведено сравнение наиболее часто используемых методов определения координаты изображения пятна по величине погрешности определения координаты на модельных (полученных путем численного моделирования) и реальных сигналах.

Обработка модельных сигналов. Цель численных экспериментов заключалась в сравнении погрешностей определения координаты пятна x различными способами: методом центра тяжести (x — координата центра тяжести распределения сигнала), медианным методом (x — координата, при которой площади сигнала справа и слева равны) и на основе аппроксимации сигнала гаусс-функцией (x — центр аппроксимирующей гаусс-функции) [2]. Исходные сигналы формировались путем численного моделирования, причем их параметры выбирались близкими к параметрам реальных сигналов типичных триангуляционных систем. Для формирования модельных сигналов в качестве исходного использовалось распределение в виде гаусс-функции

$$s(x) = A \exp(-((x - x_0)/L)^2),$$

где A — амплитуда, L — полуширина, x_0 — координата центра распределения. Значение амплитуды выбиралось равным 150. Дискретный по координате x и квантованный по амплитуде сигнал (подобный сигналу с многоэлементного фотоприемника) получался расчетом значений $s(x)$ исходного распределения на сетке целочисленных значений координаты x (шаг дискретизации $h = 1$) с последующим квантованием вычисленных значений функции по 150 уровням. Заметим, что в данной модели процессы формирования реального сигнала учитывались не в полной мере. В этом не было необходимости, поскольку ставилась цель получить сигналы, близкие к реальным, содержащим различные шумы и искажения, а не моделировать процессы формирования этих сигналов.

С целью учета влияния шума на результаты вычисления координаты пятна на полученный дискретный квантованный сигнал накладывался аддитивный дискретный шум амплитудой от 0 до 3 квантов. Распределение шума по амплитуде было равномерным, а по сетке — случайным. Таким образом, модельный сигнал содержал как искусственно внесенный аддитивный шум (некоторый аналог электронного шума), так и шум, обусловленный дискретизацией и квантованием.

В качестве варьируемых параметров выбирались полуширина исходного распределения L и амплитуда шума, для каждой пары значений которых рассчитывалось значение погрешности Δ . Так как в реальной ситуации центр распределения сигнала может занимать произвольное положение относительно ячейки многоэлементного фотоприемника, то при расчете величины погрешности исходное распределение сдвигалось относительно сетки. С этой целью значение координаты x_0 центра исходного распределения изменялось в пределах шага сетки через $1/30$ шага. Для каждого значения x_0 по серии из $N = 100$ реализаций сигнала со случайным шумом рассчитывалось средне-квадратическое значение абсолютной погрешности полученных координат:

$$\Delta(x_0) = \left(\sum_{n=1}^N (x_n - x_0)^2 \right)^{1/2} / N.$$

Значение погрешности находилось как максимальное значение погрешности $\Delta = \max(\Delta(x_0))$ при изменении x_0 в пределах шага сетки.

На рис. 2—4 приведены значения погрешности Δ (в отн. ед.), полученные при различных значениях полуширины и амплитуды шума. Нетрудно видеть,

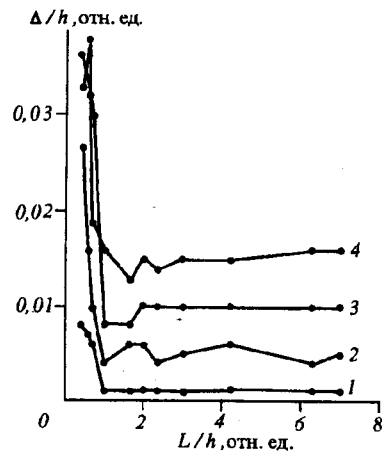


Рис. 2. Относительная погрешность измерения при аппроксимации гаусс-функцией. Амплитуда шума (%):

1 - 0; 2 - 0,8; 3 - 1,6; 4 - 2,0

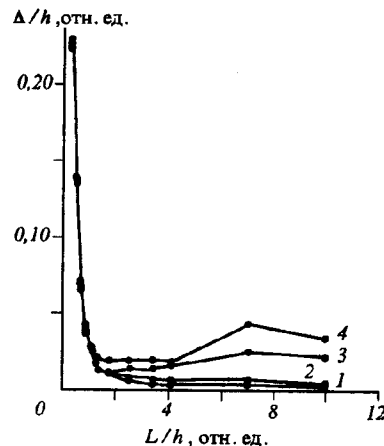


Рис. 3. Относительная погрешность измерения при медианном методе. Амплитуда шума (%):

1 - 0; 2 - 0,8; 3 - 1,6; 4 - 2,0

что увеличение уровня шума приводит к увеличению погрешности определения координаты центра распределения независимо от метода обработки сигнала. Для распределений со значением полуширины менее шага сетки ($L < h$) основную роль играют погрешности дискретизации по координате и квантования по уровню.

Заметим, что использование априорной информации о форме сигнала и применение на этой основе метода аппроксимации сигнала гаусс-функцией (см. рис. 2) позволяет заметно (на порядок) уменьшить погрешность определения координаты по сравнению с более «грубым», не учитывающим форму сигнала методом центра тяжести (см. рис. 4). Так, при полуширине распределения в 7 шагов сетки и уровне шума 2 % от максимального значения сигнала погрешности определения координаты пятна составили соответственно 0,017 и 0,26 шага сетки.

Экспериментальное сравнение методов обработки. Цель экспериментов заключалась в сравнении погрешностей определения координаты x центра пятна медианном методом и методом центра тяжести на реальных сигналах, полученных при контроле тестовых поверхностей, а также в исследовании влияния пороговой обработки сигналов на вычисляемые координаты. Метод на основе аппроксимации сигнала гаусс-функцией не рассматривался ввиду большого объема необходимых вычислений, а значит, большого времени обработки.

В качестве экспериментальной измерительной системы использовалась триангуляционная оптическая головка (см. 1 на рис. 5) с диапазоном измерения 20 мм, углом триангуляции $u = 30^\circ$ и диаметром зондирующего пучка в зоне измерения 0,2 мм. Образец 2, расстояние z до которого подлежало измерению, закреплялся на подвижном столике 3 таким образом, чтобы перемещение столика в направлении y

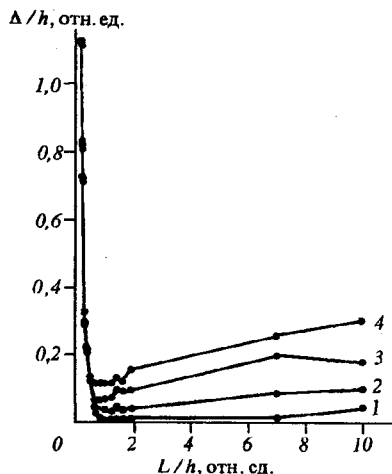


Рис. 4. Относительная погрешность измерения при методе центра тяжести. Амплитуда шума (%):

1 - 0; 2 - 0,8; 3 - 1,6; 4 - 2,0

приводило к сдвигу образца параллельно плоскости измеряемой поверхности. В этом случае при перемещении столика расстояние z до измеряемой поверхности не изменялось.

Образец перемещался в направлении u в диапазоне ± 5 мм с шагом 0,1 мм, и в каждом положении у фиксировался сигнал оптической головки. Сигнал формировался многоэлементным фотоприемником — фотодиодной линейкой типа ФУК-1Л (количество элементов 1024, шаг $h = 25$ мкм) и преобразовывался в цифровую форму 8-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Максимальное значение сигнала составляло 150 дискрет АЦП, ширина распределения сигнала — порядка 15 элементов фотодиодной линейки. Полученные сигналы затем подвергались пороговой обработке, заключающейся в вычитании из значения сигнала значения порога p , если сигнал выше порога, и обнулении сигнала в противоположном случае. Далее по обработанному сигналу при заданном положении образца по координате u определялась координата центра изображения пятна x_y . По значениям координат x_y вычислялись среднее (по u) значение координаты \bar{x} и среднеквадратическое отклонение от этого значения σ_x . Заметим, что поскольку расстояние z до измеряемой поверхности не изменялось, то все наблюдаемые отклонения вычисляемых координат x_y были обусловлены только различными шумами и искажениями изображения пятна, имеющими место при измерении реальных поверхностей. Поэтому значение среднеквадратического отклонения σ_x характеризует устойчивость метода по отношению к реальным шумам и искажениям.

В качестве образцов в экспериментах использовались изготовленный и аттестованный плоский эталон шероховатости ($Ra = 1,0$) и плоский образец шлифованной поверхности (9-й класс чистоты) из набора стандартных образцов. Последний объект устанавливался так, чтобы в одном случае следы шлифования были параллельны плоскости угла триангуляции, а в другом — перпендикулярны ей.

Результаты экспериментов представлены на рис. 6—8. Видно, что при обработке реальных сигналов методом центра тяжести и медианным методом получены близкие (отличие не более 20 %) значения среднеквадратических отклонений σ_x (рис. 6, а — 8, а). Имеется слабая зависимость этих величин от использованной при предобработке величины порога p (также на уровне 20 %). Однако наблюдается существенная зависимость значений σ_x от микроструктуры и ориентации контролируемой поверхности. Так, при обработке

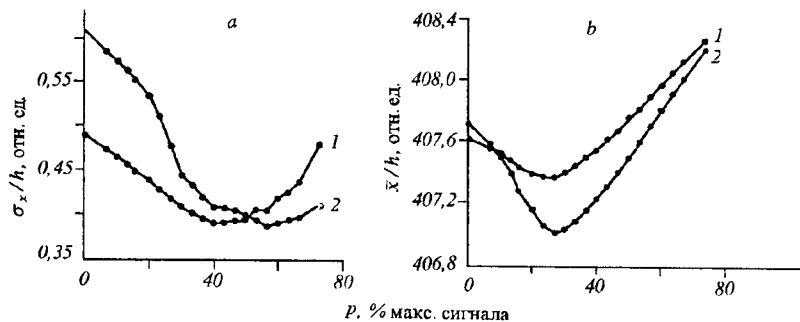
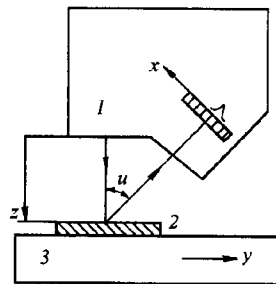


Рис. 6. Дисперсия и среднее значение координаты для шлифованной поверхности (следы шлифования параллельны плоскости триангуляции):

1 — медианный метод, 2 — метод центра тяжести

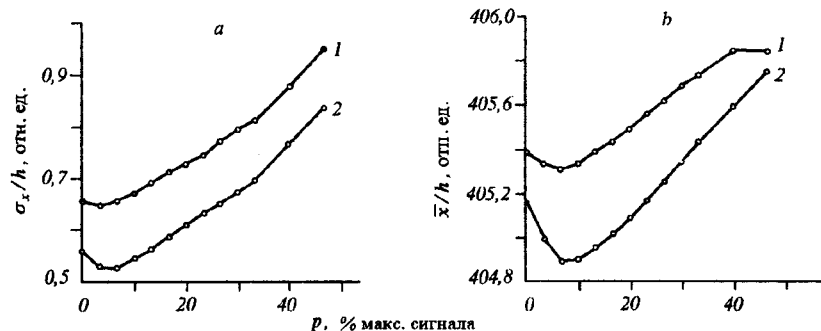


Рис. 7. Дисперсия и среднее значение координаты для шлифованной поверхности (следы шлифования перпендикулярны плоскости триангуляции):
1 — медианный метод, 2 — метод центра тяжести

сигналов, полученных при контроле поверхности эталона шероховатости (имеющей изотропную мелкозернистую структуру), значения σ_x имеют порядок 0,1 шага фотодиодной линейки, а для сигналов, полученных на образце шлифованной поверхности с заметными следами шлифования, значение σ_x составляет от 0,4 до 0,6 шага в зависимости от взаимной ориентации измерительной системы и образца. Такое различие объясняется тем, что в триангуляционных системах контролируемая поверхность является частью оптической схемы, формирующей сигнал. Поэтому микроструктура и ориентация (для анизотропной) поверхности во многом определяют величину искажений исходного сигнала.

На рис. 6, *b* — 8, *b* нетрудно видеть значительную зависимость среднего значения \bar{x} координаты центра распределения сигнала от величины порога p . Так, для образца шлифованной поверхности (см. рис. 6, *b*) изменение значения порога p в диапазоне от 30 до 80 % максимального значения сигнала приводит к изменению \bar{x} более чем на шаг фотодиодной линейки. Эта зависимость обусловлена наличием в сигнале постоянной составляющей и несимметричностью его формы. При работе реальной системы уровень освещенности и величина постоянной составляющей могут изменяться, что может явиться источником дополнительной погрешности. Для уменьшения величины такой погрешности целесообразно значение порога p рассчитывать исходя из текущего уровня постоянной составляющей сигнала, т. е. вводить динамический уровень пороговой обработки. Заметим также, что при медианном методе обработки зависимость среднего значения координат \bar{x} от величины порога p меньше, чем при

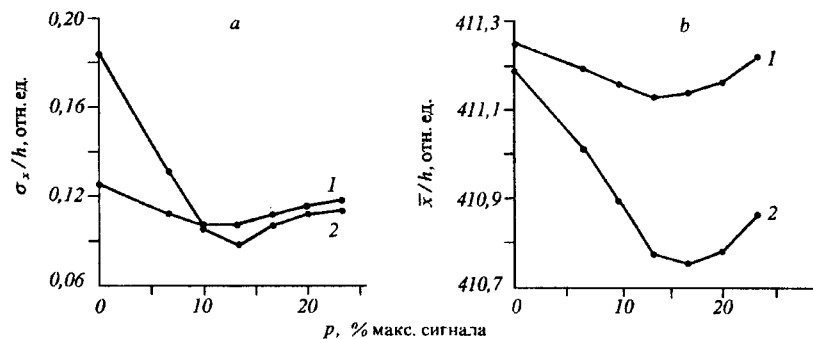


Рис. 8. Дисперсия и среднее значение координаты для эталона шероховатости:
1 — медианный метод, 2 — метод центра тяжести

обработке методом центра тяжести. Наиболее ярко это видно на рис. 8, *b*, где изменение значения порога p в диапазоне от 0 до 20 % максимального значения сигнала приводит к изменению значений \bar{x} на 0,1 и 0,45 шага для медианного метода и метода центра тяжести соответственно.

Закключение. Среди исследованных методов обработки сигналов триангуляционных измерительных систем наименьшая методическая погрешность (порядка 0,01 шага сетки при выбранных параметрах) наблюдается при использовании аппроксимации сигнала гаусс-функцией. При обработке реальных сигналов методом центра тяжести и медианным методом получены близкие значения погрешности (СКО от 0,1 до 0,6 шага фотодиодной линейки в зависимости от типа и ориентации контролируемой поверхности). Однако на практике более предпочтителен медианный метод как более устойчивый относительно изменения уровня пороговой обработки. Применение метода аппроксимации сигнала гаусс-функцией (либо ему подобного, использующего априорную информацию о форме сигнала) предпочтительно с точки зрения минимизации погрешности при наличии достаточного времени на вычисления. Такая обработка наиболее целесообразна в случае незначительного уровня шума в исходном сигнале и стабильности его формы. При высоком уровне шума вклад в суммарную погрешность ее методической составляющей оказывается незначительным для всех рассмотренных методов. Поэтому при создании триангуляционных измерительных систем для данного класса контролируемых объектов усилия разработчиков, прежде всего, должны быть направлены на выбор схемотехнических решений и параметров системы, обеспечивающих получение сигнала с высоким отношением сигнал/шум и стабильной формой распределения. Адекватный выбор методов обработки сигнала может быть сделан только при учете как требований по точности и быстродействию, так и параметров полученных сигналов.

В заключение автор выражает благодарность Ю. В. Чугую за руководство работой, В. В. Вертопрахову, Б. Е. Кривенкову и Б. А. Корневу за полезные обсуждения, А. И. Пастушенко и С. П. Юношеву за помощь в автоматизации экспериментального стенда и поддержание его работоспособности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krattenmacher G. Berührungslose optische Abstandmessung // *Electronic*. 1987. 36, N 5. S. 69, 74.
2. Краснов В. Н., Сахно С. П., Тымчик Г. С. Алгоритм поиска экстремальных значений видеосигнала ПЗС-приемников // *Приборостроение*. 1986. № 4.

Поступила в редакцию 16 октября 1995 г.