

ТРЕХМЕРНАЯ ОПТИКА

УДК 531.715.2

Е. В. Волков, С. В. Плотников

(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШИРИНЫ ЗОНДИРУЮЩЕГО ПУЧКА  
НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

Экспериментально исследована зависимость погрешности измерения триангуляционной системы от ширины зондирующего пучка. Установлено, что вид этой зависимости определяется материалом и шероховатостью поверхности и для большинства исследованных поверхностей существует оптимальное значение ширины пучка, обеспечивающее уменьшение погрешности измерений более чем в 2 раза. Значения оптимальной ширины пучка для различных поверхностей были близки и находились в интервале от 60 до 90 мкм в условиях проведения эксперимента. Высказано предположение, что этот размер связан с разрешением проецирующей оптической системы, для которого экспериментально получено значение 100 мкм.

**Введение.** В настоящее время бесконтактные оптико-электронные методы измерения геометрических параметров изделий широко применяются для решения задач промышленного размерного контроля. Одним из таких методов является метод лазерной триангуляции, принцип действия которого состоит в формировании на контролируемой поверхности светового пятна, построении изображения этого пятна на многоэлементном фотоприемнике, определении положения  $X$  изображения и расчете (по известной зависимости) координаты  $Z$  поверхности.

Достоинство триангуляционного метода — относительная простота реализации при высокой производительности и точности измерений расстояния непосредственно до поверхности объекта. Поскольку контролируемая поверхность входит в оптическую измерительную схему как рассеиватель зондирующего излучения, погрешность измерений зависит от рассеивающих свойств поверхности. Так, в случае контроля поверхности, шероховатость которой однородна и мала по сравнению с разрешением проецирующей оптической системы, существует фундаментальный предел погрешности измерений, обусловленный спеклами [1]. Погрешность измерения  $\sigma$  координаты поверхности определяется при этом когерентностью зондирующего излучения и разрешением проецирующей оптической системы и не зависит от ширины зондирующего пучка.

Важным с точки зрения прикладных применений является случай контроля объектов с технической поверхностью, т. е. со следами механической обработки (точение, фрезерование). В этом случае наблюдается существенное локальное отражение и рассеяние зондирующего излучения на микроструктуре поверхности, приводящее к искажениям профиля интенсивности изображения пятна на фотоприемнике и появлению дополнительной погрешности измерений. Из физических соображений можно предположить, что величина этой погрешности зависит от соотношения параметров микроструктуры поверхности и параметров измерительной системы, а именно разрешения проецирующей оптической системы и ширины зондирующего пучка. Значения параметров микроструктуры контролируемой поверхности (например, шеро-

ховатости) в конкретной измерительной задаче часто варьируются на практике в широких пределах. Поэтому при разработке измерительной системы целесообразно выбирать параметры, обеспечивающие минимум погрешности измерений на широком классе поверхностей. При этом ширина зондирующего пучка может варьироваться в известных пределах в зависимости от диапазона измерений, а разрешение проецирующей оптической системы выбирается максимально возможным.

Цель данной работы — исследование зависимости погрешности измерений координат триангуляционным методом от ширины зондирующего пучка на ряде тестовых поверхностей из различного материала и различной шероховатости.

**Методика проведения экспериментов и экспериментальная установка.** Экспериментальные исследования проводились на установке, представленной на рис. 1, в основу которой положена стандартная триангуляционная схема. Излучение лазерного диода 1 ( $\lambda = 0,78$  мкм,  $P = 5$  мВт) фокусировалось объективом 2 на контролируемой поверхности образца 3, координата  $Z$  которой подлежала измерению. Изменяя расстояние между лазером, объективом и поверхностью, можно было варьировать ширину формируемого зондирующего пучка. Измерение ширины зондирующего пучка производилось (после удаления образца) с помощью регистрирующей системы 6, состоящей из микрообъектива и ПЗС-матрицы. Ширина пучка  $L$  определялась по видеосигналу ПЗС-матрицы, который оцифровывался и аппроксимировался гаусс-функцией. Разрешение регистрирующей системы составляло 1 мкм. Проецирующей системой 4 (коэффициент проециции  $\beta = 1,05$ ,  $F = 80$  мм,  $D = 25$  мм) формировалось изображение светового пятна на фотодиодной линейке 5 (шаг 25 мкм, размер элемента  $19 \times 150$  мкм). Угол триангуляции составлял  $40^\circ$ . Для передвижения образцов использовалась механическая подвижка 7 с дискретностью перемещения 12 мкм.

Образец с плоской шероховатой рабочей поверхностью закреплялся на подвижке так, чтобы направление перемещения подвижки  $S$  было параллельно рабочей поверхности образца, а зондирующее излучение падало по нормали к поверхности. Образец перемещался на 6 мм с шагом 12 мкм, при этом расстояние до его рабочей поверхности оставалось постоянным ( $Z = \text{const}$ ). Для каждого положения  $S_i$  фиксировался сигнал фотодиодной линейки, методом медианы [2] определялась координата  $X_i$  изображения пятна и рассчитывалась координата  $Z_i$  поверхности. Смена участков поверхности, рассеивающих зондирующее излучение, приводила к изменениям распределения интенсивности в изображении пятна, что, в свою очередь, являлось причиной разброса координат  $X_i$  и  $Z_i$ . Стандартное отклонение координаты  $\sigma = \sqrt{\langle (Z_i - \langle Z \rangle)^2 \rangle}$  характеризует погрешность измерения для данной измерительной системы и данного образца поверхности.

Описанным выше способом определялись значения  $\sigma$  для всех образцов, после чего ширина пучка изменялась и измерения повторялись при новом ее значении.

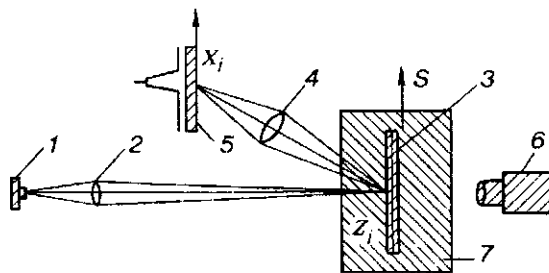


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

**Используемые образцы.** Используемые в экспериментах образцы различались материалом, шероховатостью и структурой поверхности (изотропная и неизотропная). Образцы изотропной поверхности готовились путем шлифования, а в качестве образцов с неизотропной структурой использовались металлические эталоны фрезерованной поверхности различной чистоты обработки, имеющие хорошо различимую периодическую структуру поверхности. Причем в экспериментах эти образцы устанавливались так, что в одном случае следы обработки были перпендикулярны плоскости триангуляции, а в другом — параллельны ей. Шероховатость использованных образцов выбиралась близкой к типичной шероховатости поверхности точных изделий машиностроения и находилась в диапазоне  $R_z$  от 0,09 до 9,0 мкм. Образцы изотропной поверхности изготавливались из стекла, керамики и стали. Их плоские рабочие поверхности шлифовались порошками различной зернистости. С целью изменения рассеивающих свойств на часть подготовленной шлифованной поверхности образцов затем наносился вакуумным напылением слой алюминия толщиной 0,15 мкм. Такая толщина слоя при шероховатости более 0,5 мкм практически не изменяет микропрофиль поверхности, но достаточна для изменения рассеивающих свойств, поскольку практически исключает объемное рассеяние.

**Экспериментальные результаты.** Получение и обработка экспериментальных данных проводились в два этапа. На первом этапе в соответствии с изложенной выше методикой были проведены измерения и получены графики зависимости измеренной координаты  $Z_i$  от смещения образца  $S_i$  для всех образцов, ширина  $L$  зондирующего пучка при этом изменялась в диапазоне от 6 до 500 мкм. Пример таких графиков, полученных при сканировании металлического образца с плоской шлифованной поверхностью ( $R_z = 0,1$  мкм) при значениях  $L = 21, 185$  и  $301$  мкм, приведен на рис. 2. Ось ординат соответствует отклонению координаты  $Z$  участка контролируемой поверхности от среднего (по всей зоне контроля) значения  $Z_{cp}$ , ось абсцисс  $S$  показывает сдвиг участка контролируемой поверхности от некоторого начального положения. Затем путем обработки полученных графиков рассчитывалось стандартное отклонение  $\sigma$  (по всем значениям координат  $Z_i$ ) и среднее отклонение координат  $\Delta = \langle |Z_{i+1} - Z_i| \rangle$  соседних участков поверхности.

Сравнивая рис. 2, *a* и *b*, можно видеть, что при сканировании плоской поверхности зондирующим пучком с шириной пучка 185 мкм (см. рис. 2, *b*) график зависимости координаты  $Z$  от смещения имеет более плавный вид

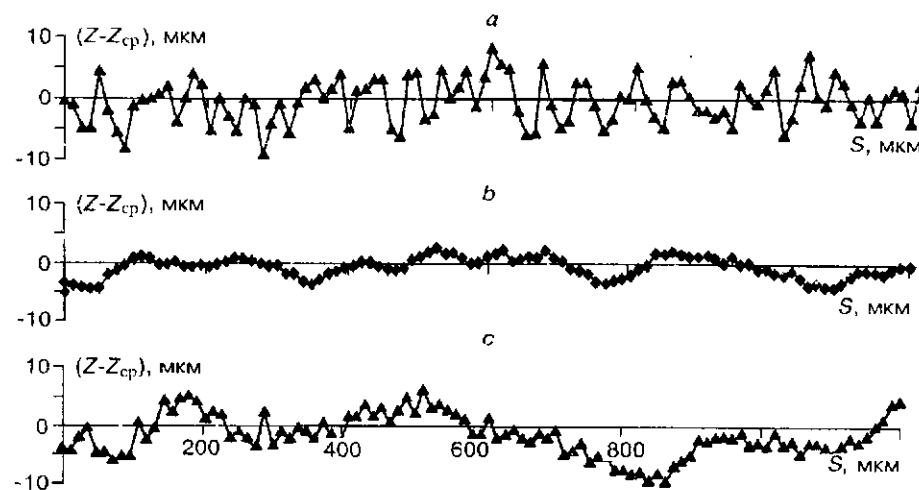


Рис. 2. Зависимости отклонений координаты  $Z$  от смещения образца  $S$  при различной ширине зондирующего пучка:  
*a* — ширина пучка 21 мкм, *b* — ширина пучка 185 мкм, *c* — ширина пучка 301 мкм. Металлический образец  $R_z = 0,1$  мкм

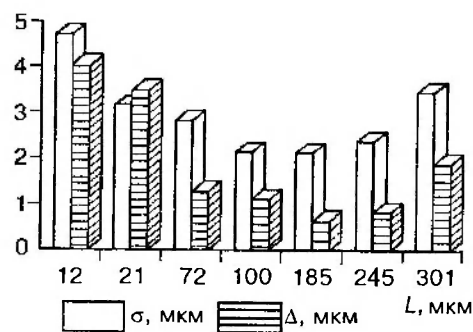


Рис. 3. Стандартное отклонение  $\sigma$  и среднее отклонение  $\Delta$  в зависимости от ширины пучка  $L$

( $\Delta = 0,8$  мкм), чем график на рис. 2, а, при ширине пучка 21 мкм ( $\Delta = 3,6$  мкм).

Увеличение ширины пучка до 301 мкм привело к неожиданному для авторов результату: на соответствующем графике (рис. 2, с), полученном при сканировании той же плоской поверхности, среднее отклонение координат  $\Delta$  соседних участков вновь увеличилось.

Значения среднего  $\Delta$  и стандартного  $\sigma$  отклонений (для данного металлического образца  $k = 0,1$  мкм) приведены на рис. 3, где по оси абсцисс отложена соответствующая ширина пучка.

Заметим, что значение  $\sigma$  более зависит от минимального и максимального значений координат  $Z_i$ , полученных при сканировании, в то время как значение  $\Delta$  определяется гладкостью графика зависимости измеренных координат от смещения. Поэтому при близких значениях  $\sigma$  для ширины пучка 21 и 301 мкм (3 и 3,5 мкм) в последнем случае  $\Delta$  приблизительно в 2 раза меньше (3,6 и 1,9 мкм соответственно). Следует отметить, что  $\Delta$  имеет минимальное значение при ширине пучка 185 мкм, а минимум  $\sigma$  достигается при пучке 100 мкм.

На втором этапе построены графики зависимости погрешности измерения расстояния  $\sigma$  от ширины зондирующего пучка  $L$  для различных поверхностей (рис. 4, а—д). Из этих графиков можно видеть, что по типу полученной зависимости погрешности измерений  $\sigma$  от ширины зондирующего пучка используемые поверхности можно разделить на две группы.

К первой группе, характеризующейся наличием минимума зависимости погрешности измерений от ширины зондирующего пучка, относится большинство тестовых поверхностей. Например, отчетливо виден этот минимум на графиках для металлических объектов (независимо от ориентации следов обработки) (см. рис. 4, а), для керамических объектов, покрытых алюминиевой пленкой (см. рис. 4, а'), и для стеклянных объектов при шероховатости 8,5 мкм (см. рис. 4, с).

Значения ширины пучка, обеспечивающие минимум погрешности для различных объектов, оказались близкими и в условиях наших экспериментов находятся в интервале 60 ÷ 90 мкм. При этом погрешность измерений в минимуме уменьшается более чем в 2 раза.

Вторую группу составляют поверхности, в случае которых при увеличении ширины пучка погрешность сначала быстро уменьшается, а затем остается практически постоянной. Примерами являются керамическая поверхность без напыления (см. рис. 4, д) и стеклянная поверхность с малой шероховатостью (см. рис. 4, б).

Заметим, что в случае керамического образца (см. рис. 4, д) вид зависимости погрешности от ширины пучка определяется наличием или отсутствием металлического напыления, а не шероховатостью поверхности. Действительно, шероховатости этих участков равны ( $R_z = 0,53$  мкм) и не превосходят шероховатости стеклянного образца ( $R_z = 0,7$  мкм, см. рис. 4, б), в случае

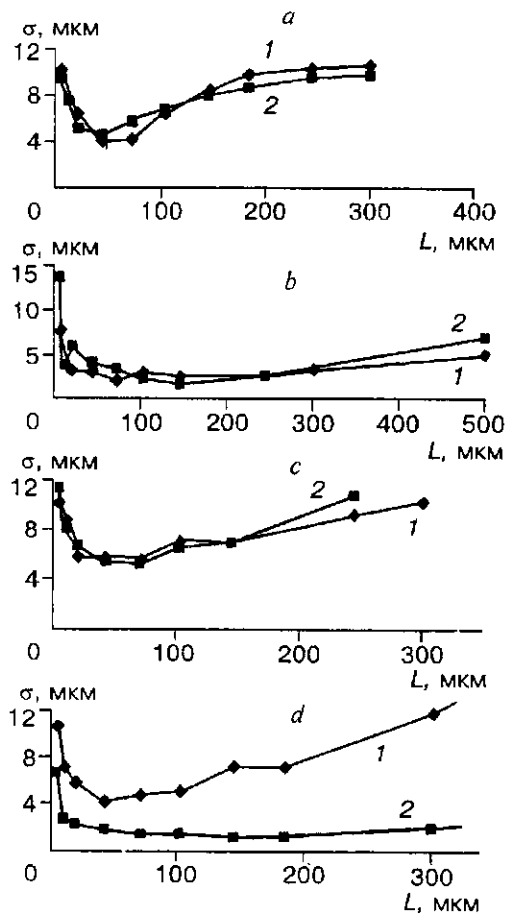


Рис. 4. Зависимость стандартного отклонения  $\sigma$  от ширины пучка  $L$  для образцов из различного материала и различной шероховатости поверхности:  
*a* — фрезерованный металлический образец  $R_z = 4,2$  мкм (1 — следы обработки перпендикулярны плоскости триангуляции, 2 — параллельны ей); *b* — стеклянный образец  $R_z = 0,83$  мкм (1 — алюминиевое напыление, 2 — без напыления); *c* — стеклянный образец  $R_z = 8,5$  мкм (1 — алюминиевое напыление, 2 — без напыления); *d* — керамический образец  $R_z = 0,53$  мкм (1 — алюминиевое напыление, 2 — без напыления)

которого независимо от наличия напыления погрешность измерений с увеличением ширины пучка не возрастает.

Авторы предполагают, что в случае поверхностей первой группы положение минимума зависимости связано с минимальным размером  $H$ , разрешаемым проецирующей оптической системой (в совокупности с многоэлементным фотоприемником) в плоскости поверхности образца. Исходя из этого, целесообразно определить данную величину экспериментально, что и было сделано после некоторой модернизации использованной ранее установки (рис. 5). Вместо контролируемого объекта, использовался матовый рассеиватель 1 с установленными вплотную перед ним непрозрачными шторками 2, освещаемый лампой накаливания 3. Таким образом формировалась равномерно светящаяся щель. Ширина щели  $P$  регулировалась перемещением шторок, а ее текущее значение определялось при помощи микроскопа 4. Исследуемой проецирующей оптической системой 5 формировалось изображение светящейся щели на многоэлементном фотоприемнике 6. Сигнал фотоприемника обрабатывался, и определялся размер  $P_{im}$  изображения щели. На рис. 6 представлен график получившейся зависимости размера изображения  $P_{im}$  от размера щели  $P$ . Горизонтальный участок этого графика на уровне  $P_{im} = 170$  мкм (в пло-

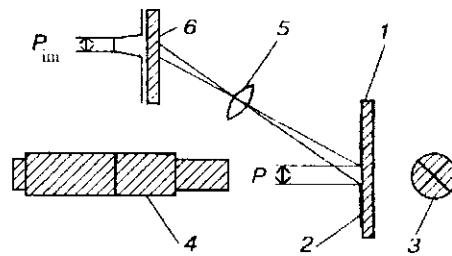


Рис. 5. Установка для определения размера импульсного отклика проецирующей системы

скости изображения) соответствует  $H = 100$  мкм с учетом геометрических соотношений использованной схемы. Как видно, полученное значение близко к значению ширины пучка ( $60 \div 90$  мкм), обеспечивающей минимальную погрешность измерений. Однако вопрос о взаимосвязи этих параметров нуждается в дополнительной проверке.

**Обсуждение результатов экспериментов.** Для описания полученных экспериментальных результатов рассмотрим процесс формирования изображения светового пятна на фотоприемнике. Предположим, что характерный размер микроструктуры  $R$  (в плоскости поверхности образца) меньше минимального разрешаемого проецирующей оптической системой размера  $H$  (также в плоскости поверхности образца):  $R \ll H$ .

В случае когда ширина зондирующего пучка  $L$  меньше минимального разрешаемого размера:  $L \ll H$ , размер изображения определяется в основном шириной импульсного отклика проецирующей системы. Неоднородное рассеяние зондирующего излучения на микроструктуре поверхности приведет к искажениям распределения интенсивности в пределах импульсного отклика, случайным образом зависящим от участка рассеивающей поверхности. Поскольку в случае узкого зондирующего пучка (когда  $L \approx R$ ) усреднение рассеивания по ширине пучка незначительно, искажения распределения интенсивности изображения отклика велики и велика погрешность измерения.

Понятно, что при увеличении ширины пучка  $L$  количество рассеивающих центров в пределах пучка будет увеличиваться, а искажения изображения будут уменьшаться за счет усреднения. Таким образом, с ростом ширины пучка  $L$  погрешность должна уменьшаться.

Однако экспериментальные результаты показывают, что для большинства использованных поверхностей погрешность измерения сначала уменьшается с увеличением ширины пучка до некоторого значения, а затем растет.

Возможно, что рост погрешности может быть обусловлен наличием на поверхности структуры (например, следов механической обработки), разрешаемой проекционной оптической системой. Наличие такой структуры может

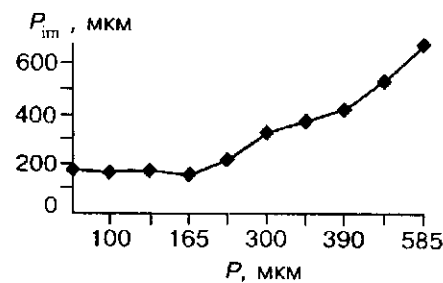


Рис. 6. Зависимость размера изображения  $P_{им}$  от размера щели  $P$

приводить к значительным искажениям изображения вследствие локального изменения светимости. В случае широкого зондирующего пучка (когда  $L > H$ ) эти изменения рассеивающих свойств становятся разрешимыми и дают искажения распределения интенсивности в изображении пятна. Так, в случае контроля тестовой поверхности с границей «черное — белое» при переходе зондирующим пучком такой границы часть изображения пятна практически отсутствует вследствие большого различия светимостей. Возникающее при этом отклонение измеренной координаты  $Z$  от ее действительного значения пропорционально ширине зондирующего пучка.

**Заключение.** В результате проведенного исследования показано наличие зависимости погрешности измерений триангуляционной системы от ширины зондирующего пучка. Вид этой зависимости определяется материалом и шероховатостью поверхности.

Установлено, что для большинства использованных поверхностей существует оптимальное значение ширины пучка, обеспечивающее минимальную погрешность измерений. При этом погрешность измерений в минимуме снижается более чем в 2 раза. Значения оптимальной ширины пучка для различных поверхностей близки и находятся в интервале от 60 до 90 мкм в условиях проведения эксперимента.

Высказано предположение (нуждающееся в дополнительной проверке), что этот размер связан с разрешением проектирующей оптической системы, для которого экспериментально получено значение 100 мкм.

Рассмотрен процесс формирования изображения зондирующего пятна, позволяющий объяснить уменьшение погрешности измерений при увеличении ширины пучка до размера, равного разрешению проектирующей системы. Отмечено, что возможной причиной роста погрешности при дальнейшем увеличении ширины пучка может являться наличие на контролируемой поверхности структуры, разрешаемой проектирующей оптической системой и приводящей к значительному локальному рассеянию.

Учет зависимости погрешности измерений триангуляционной системы от ширины пучка позволит повысить точность контроля объектов с промышленными поверхностями путем выбора оптимальных параметров системы. Это, в свою очередь, будет способствовать более широкому использованию триангуляционного метода измерений в задачах высокоточного промышленного размерного контроля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dorsch R., Hausler G., Herrmann J. Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement // Appl. Opt. 1994. 33. P. 1306.
2. Плотников С. В. Сравнение методов обработки сигналов в триангуляционных измерительных системах // Автометрия. 1995. № 6. С. 58.

*Поступила в редакцию 4 февраля 1997 г.*