

Д. Н. Бондарь, А. В. Буданцев, Э. Л. Емельянов,
Ю. В. Обидин, К. В. Петухов

(Новосибирск)

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ ОТВЕРСТИЙ В СИТАХ

Излагаются результаты исследований, направленных на создание оптико-электронной системы контроля размеров отверстий в ситах, используемых для сортировки алмазов. Описана методика определения размеров отверстий по их изображениям. Обсуждаются результаты исследования алгоритма определения размеров отверстий, обеспечивающего погрешность не более 3 мкм. Даны характеристики автоматической системы контроля аналитических сит.

Введение. В алмазной промышленности актуальной является задача обеспечения высокого качества разделения алмазов на лоты, поставляемые на рынок. При формировании лота сортировка алмазов по размерам производится с помощью аналитических сит 15 типов, различающихся размерами отверстий и их количеством на рассеивающей пластине. Так, например, в сите № 1 имеется 4654 отверстия диаметром 1,09 мм, а в сите № 15 – 498 отверстий диаметром 5,41 мм. В процессе эксплуатации сита отклонение диаметра отверстия от номинального значения не должно превышать 25 мкм. В связи с этим необходимо обеспечить погрешность при определении размеров отверстий не более 3 мкм, что составляет менее 0,1 % от измеряемого диаметра. Время полной проверки одного сита не должно превышать 2 ч.

Вследствие высокой стоимости алмазов даже незначительный износ сит в процессе эксплуатации приводит к нарушению характеристик партии и к серьезным убыткам. Процедура периодического контроля сит, проводимая вручную, очень длительна и трудоемка, а ее результаты являются в значительной степени субъективными, поэтому создание оптико-электронной системы определения параметров отверстий в ситах является актуальной задачей. Такая система позволит автоматизировать и ускорить процедуру контроля сит при одновременном повышении объективности ее результатов.

1. Оптико-электронная система определения параметров отверстий в ситах. Структура системы представлена на рис. 1. Система состоит из двухкоординатного столика 1 (SCAN-200) с шаговым приводом, микроконтроллерного блока 6, управляющего перемещением сита 2 и обеспечивающего последовательную установку измеряемых отверстий в зону контроля, и компьютера 5 с программным обеспечением. В центре неподвижного осно-

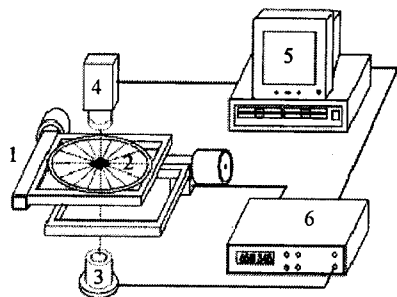


Рис. 1. Структура системы контроля

вания установлен осветитель 3, который формирует параллельный пучок, освещающий одно из отверстий в сите 2. Изображение тени отверстия переносится на ПЗС-матрицу видеокамеры 4 телецентрическим объективом. С целью снижения стоимости в системе применена измерительная видеокамера Hitachi KP-M1E, имеющая относительно небольшое число фоточувствительных элементов (740×580). Необходимая точность системы обеспечивается использованием методов сверхразрешения [1]. Это позволяет отказаться от использования более дорогих измерительных камер с большим числом фоточувствительных элементов. Вследствие большого диапазона размеров измеряемых отверстий (от 1 до 5,5 мм) в системе имеется два сменных объектива (Sill Optics), обеспечивающих размер поля зрения 8×6 и 4×3 мм.

2. Измерительные алгоритмы. Для определения формы отверстий измерение диаметра производится по разным направлениям. Предложена и исследована двухэтапная методика определения размеров круглых отверстий по их изображениям [2].

На первом этапе используется априорная информация о положении отверстий на ситовом полотне (карта) и определяются грубые оценки координат центра и диаметра отверстия. Для этого измеряемое отверстие перемещается в поле зрения камеры, по статистическим характеристикам изображения вычисляется порог яркости и определяются центр массы и площадь фигуры, состоящей из точек, превышающих порог. Считается, что центр отверстия совпадает с центром массы фигуры, а радиус отверстия однозначно определяется площадью фигуры.

На втором этапе полученные оценки уточняются, т. е. вычисляются точные координаты отдельных точек границы круга, и таким образом определяется форма отверстия. При выборе оптимальной методики измерений программно реализованы и исследованы различные способы выделения границ круга: определение центра массы выделенного участка границы, определение максимума отклика интерполирующего фильтра и аппроксимация профиля яркости интегралом ошибок.

2.1. Алгоритм, использующий определение центра массы фрагмента.

Этот алгоритм работает с фрагментами изображения. Контуры одного из обрабатываемых фрагментов показаны на снимке эталонного отверстия (рис. 2). Для снижения ошибок, вызываемых анизотропией фрагмента, фрагмент делается центральнo-симметричным путем обнуления яркости точек, не принадлежащих вписанному кругу.

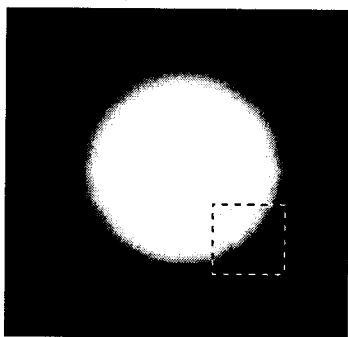





Рис. 2. Снимок отверстия фотошаблона

**Среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибки измерения радиуса отверстия
для разных способов выделения границ (1пиксел = 11 мкм)**

№ п/п	Функция	Вид функции	СКО, пиксел	Комментарий
1	Прямоугольный фильтр	$\begin{matrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{matrix}$	0,15	Центрально-симметричные фильтры размером 3 × 3 или 5 × 5 дают одинаковые результаты
2	Гексагональный фильтр	$\begin{matrix} -1 & -1 \\ -1 & 6 & -1 \\ -1 & -1 \end{matrix}$	0,14	Перед фильтрацией выполнялось геометрическое преобразование фрагмента
3	$Q_i = Q_{\max},$ если $ Q_i - Q_p < Q_{\max}$ $Q_i = 0,$ если $ Q_i - Q_p \geq Q_{\max}$		0,18	-
4	$Q_i = Q_{\max} - Q_i - Q_p $		0,11	Отрицательный результат преобразования обнулялся
5	$Q_i = Q_{\max} - (Q_i - Q_p)^2$		0,14	То же

Примечание. Q_i – яркость пиксела, Q_p – пороговое значение яркости, Q_{\max} – управляемый параметр яркости. Величина ошибки дается в пикселах ПЗС-матрицы, на которой представлено изображение.

Алгоритм определения точного диаметра отверстия в заданном направлении состоит из следующих операций:

- преобразование фрагментов, в результате которого выделяются границы объекта (см. таблицу);
- определение координат центра массы каждого из преобразованных фрагментов;
- коррекция координат и определение диаметра отверстия в выбранном направлении.

Исследовалось несколько вариантов выделения границ измеряемого круга: цифровая фильтрация двумерным дифференцирующим фильтром на прямоугольной решетке, фильтрация на гексагональной решетке, а также поэлементные яркостные преобразования. Варианты сравнивались на программных моделях и по результатам измерения эталонных отверстий фотошаблона (рис. 3), выполненного с погрешностью не более 1 мкм. Ошибкой считалось среднеквадратическое отклонение измеренного радиуса при изменении его

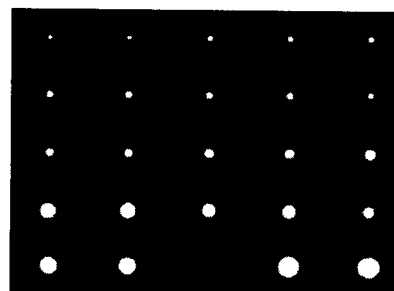


Рис. 3. Снимок фотошаблона с эталонными отверстиями

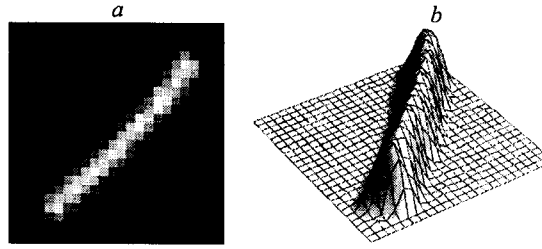


Рис. 4. Вид фрагмента границы: плоское изображение (а), 3D-представление (b)

угла с осью абсцисс от 0 до 360°. В таблице дано описание преобразований и полученные результаты.

Анализ формы отверстия, восстановленной по результатам измерений, показал, что применение фильтров усиливает влияние решетки на форму измеренного отверстия. Например, на гексагональной решетке отверстие становится многоугольником.

Размер фрагмента и управляемый параметр Q_{\max} яркостного преобразования выбирались таким образом, чтобы фрагмент границы отверстия представлялся не менее чем 40–50 пикселями с ненулевыми значениями. Яркостные преобразования в соответствии с выражениями в строках 3 и 5 (см. таблицу) при меньшей сложности вычислений дают результаты, близкие по точности к результатам фильтрации (см. таблицу, строки 1, 2). Наилучшие результаты получены при использовании треугольного яркостного преобразования (см. таблицу, строка 4).

Расстояние между центрами масс двух противоположных фрагментов в дальнейшем будет считаться равным диаметру отверстия. Вид фрагмента с границей отверстия, полученной оптимальным яркостным преобразованием (см. таблицу, строка 4), представлен на рис. 4. Из рисунка видно, что выделенная граница представляет собой дугу. Очевидно, что центр массы дуги не совпадает с границей, а смещен в сторону центра отверстия. Смещение тем больше, чем больше отношение размера фрагмента к радиусу круга. Простое аналитическое выражение позволяет скомпенсировать указанную выше систематическую ошибку при определении истинного диаметра:

$$D = \sqrt{D_{\text{изм}}^2 + \frac{1}{4}r^2},$$

где D – истинный диаметр, $D_{\text{изм}}$ – измеренное значение диаметра, r – размер фрагмента.

Погрешность определения диаметра вышеописанным методом, проверенная на модельных изображениях, не превышала 0,11 от размера элемента изображения. Типичный вид зависимости погрешности радиуса ΔR от угла наклона радиуса к оси абсцисс показан на рис. 5. На рисунке видно, что основные ошибки этого метода имеют четкую пространственную форму, связанную с дискретностью решетки ПЗС-матрицы. Относительная ошибка метода уменьшается по мере увеличения размера фрагмента и ширины границы.

2.2. Определение положения границы по максимуму отклика интерполирующего фильтра. В этом случае производится определение положения све-

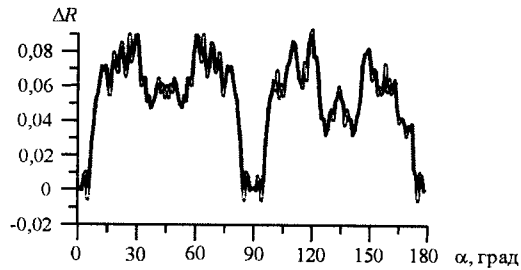


Рис. 5. График зависимости изменения радиуса от различных углов наклона к оси абсцисс при оценке координат центра масс

тотеневого перехода на профиле яркости, полученном вдоль радиуса, построенного из центра круга (найденного на первом этапе) под заданным углом к оси абсцисс. Точки получаемого профиля яркости в общем случае не совпадают с узлами пространственной решетки ПЗС-матрицы, поэтому при вычислении профиля применяется процедура интерполяции яркости элементов изображения. Во всех экспериментах, описанных в разд. 2.2 и 2.3, применялась билинейная интерполяция. При применении интерполяции более высокого порядка наблюдалось небольшое (в 1,5 раза) улучшение точности при значительном (в 8 раз) снижении быстродействия алгоритма.

Метод определения положения светотеневого перехода состоит в интерполяции модуля первой разности профиля яркости фильтром нижних частот [1]. Отклик фильтра является функцией непрерывного аргумента, имеющего смысл смещения ядра фильтра. Если выбрано симметричное ядро, положением перехода будет значение аргумента отклика, обращающее его в максимум. Поиск максимума отклика проводится любым из методов одномерной оптимизации, например методом золотого сечения. Ядро сглаживающего фильтра имело вид

$$f(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2s}\right),$$

где t – свободная переменная, s – параметр сглаживания ($s = 1,0$).

При измерении отверстия радиусом 39,8 пиксела с шириной границы светотеневого перехода 4 пиксела распределение результата измерения по углу близко к нормальному распределению с математическим ожиданием $\mu = 39,798$ и СКО $\sigma = 0,018$, при этом амплитуда шумовой составляющей результата измерения составила $\sim 0,05$ пиксела.

Достоинством этого алгоритма является простота, высокое быстродействие и хорошая точность. Его недостатком при работе с реальными данными является высокая чувствительность к шумам на изображении. При вычислении первой разности отношение сигнал/шум резко ухудшается, при этом отклик фильтра имеет локальные максимумы, ошибочно принимаемые алгоритмом поиска за истинное положение границы. Во избежание таких ошибок необходимо усиливать сглаживающее действие фильтра, из-за чего растет погрешность определения максимума. В целом этот метод по точности определения границы незначительно превосходит предыдущий: он не имеет методической погрешности и не требует дополнительной коррекции результата.

2.3. *Определение положения границы приближением светотеневого перехода.* Аналогично предыдущему случаю измерения проводились по профилю яркости, полученному из исходного растра с применением его билинейной интерполяции, с той разницей, что для получения оценки положения перехода свет–тень использовалось приближение моделью

$$B(x) = \frac{k}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x-s}{w} \right) \right) + b, \quad (1)$$

где B – яркость пиксела; x – координата в профиле яркости; k – амплитуда перехода; b – значение яркости в тени; s – координата перехода (расстояние от оси ординат до перехода по уровню 0,5); w – параметр, имеющий смысл ширины перехода;

$$\operatorname{erf}(t) = \int_0^t e^{-p^2} dp. \quad (2)$$

Выбор функции $\operatorname{erf}(t)$ в качестве модели обусловлен тем, что функция рассеяния точки применяемых объективов имеет вид подынтегральной функции в (2) из-за дифракции света на входном зрачке (p – координата в плоскости изображения вдоль радиуса отверстия).

Для измерения используется поиск параметров k , s , w и b модели (1) по профилям яркости, взятым под произвольными углами к оси абсцисс. Распределение результата измерения радиуса по углу также близко к нормальному с математическим ожиданием $\mu = 39,798$ и СКО $\sigma = 0,005$, при этом амплитуда шумовой составляющей результата измерения составила $\sim 0,015$ пиксела.

Достоинством алгоритма является наиболее высокая достижимая точность определения положения границы. Кроме того, он является помехоустойчивым, так как используемая целевая функция является интегральной оценкой, вычисляемой по всей совокупности точек профиля яркости. Вследствие высокой сложности вычислений, этот алгоритм применяется лишь в тех случаях, когда требуется максимальная точность измерений (вблизи границ допуска).

3. Программное обеспечение. Созданное в ходе исследований программное обеспечение (ПО) реализует приведенные выше измерительные алгоритмы, а также алгоритмы моделирования теневых изображений отверстий. В ходе разработки системы создано ПО, которое осуществляет управление аппаратной частью установки (координатным столиком и видеокамерой), производит обработку, сохранение и визуализацию изображений, выполняет необходимые измерения и сохраняет их результаты в базе данных. Рабочая программа имеет привычный для пользователей Windows оконный интерфейс, стандартным образом реагирует на кнопки мыши, имеет встроенную контекстную помощь и другие функции, обычные для приложений Windows. Вид диалоговых окон программы в одном из режимов показан на рис. 6.

Функции самотестирования, калибровки, определения типа сита и построения его карты могут выполняться автоматически. После процедуры составления карты программа осуществляет сканирование сита и регистрацию изображений отверстий. Сканирование начинается от края сита и далее идет по составленной карте с минимизацией переездов от отверстия к отверстию

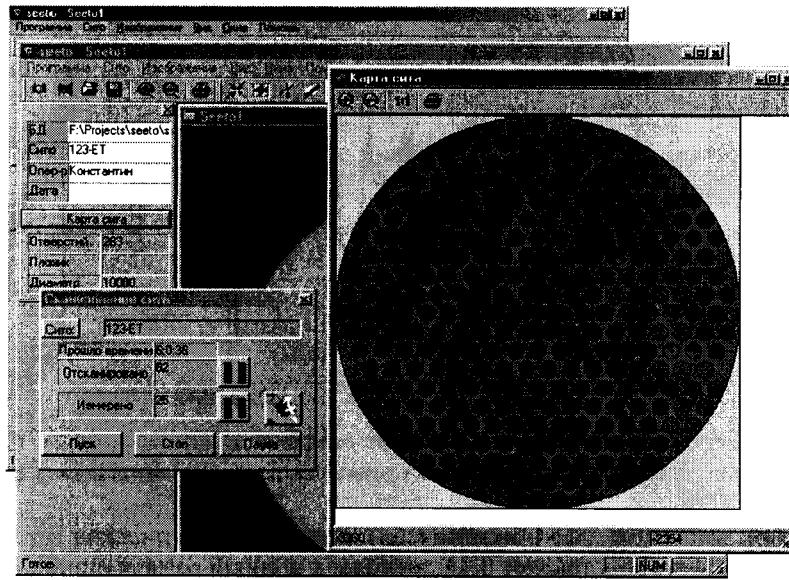


Рис. 6. Вид диалоговых окон рабочей программы

(«змейкой»). В соответствии с заложенным алгоритмом определяются размеры и координаты отверстия, а полученная информация помещается в базу данных. Далее анализируются результаты измерений, производится их обработка и сравнение с допусками. Основная информация об отверстиях оперативно отображается на карте сита.

В интерактивном режиме оператор может просмотреть и измерить любое отверстие сита. Кроме того, имеются средства для построения модельных изображений, сохранения и просмотра полутоновых изображений форматов TIFF, JPEG, PCX и BMP.

4. Результаты экспериментов. На рис. 7 показана система контроля сит, на которой проверялась правильность технических решений и точность созданных алгоритмов. При передаче в опытную эксплуатацию была выполнена ее калибровка и аттестация. Для аттестации системы на прецизионном фотопостроителе изготовлено несколько фотошаблонов (из хрома на стеклянной подложке) с нанесенными объектами, имитирующими отверстия разного диаметра. Погрешность размеров эталонных отверстий составляет менее 1 мкм. Непосредственно перед контролем сита производится калибровка измерительной системы, причем для каждого типа сит используется свой эталон системы.

На рис. 8 показан результат измерения радиусов эталонного отверстия в различных направлениях. Поскольку погрешность изготовления калибра мала в сравнении с ошибками системы, то полученный график (рис. 8, а) иллюстрирует ошибку измерения. Измеренный средний радиус равен 236,94 пик-

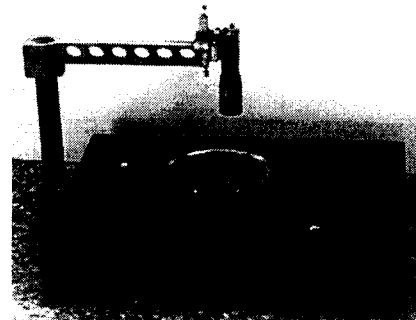


Рис. 7. Вид системы контроля сит

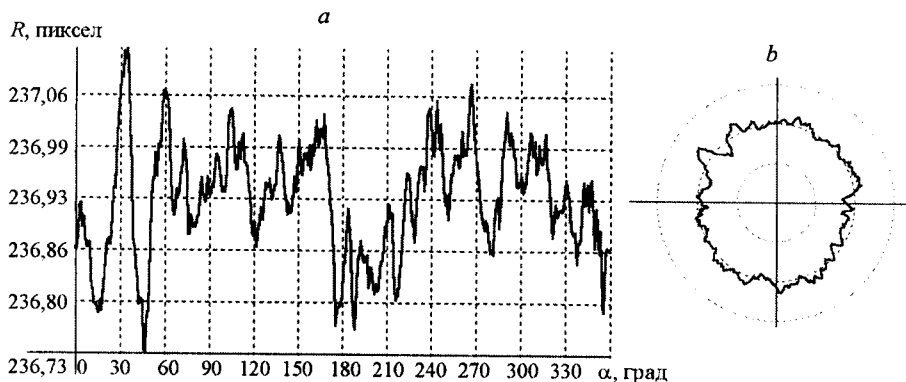


Рис. 8. Результат измерения радиусов эталонного отверстия: зависимость ошибки измерения радиуса R от его угла наклона α (а); развертка формы отверстия с полями допусков ± 5 мкм (б)

села (при масштабе 10,54 мкм/пиксел), среднеквадратическое отклонение радиуса (ошибка) составляет 0,14 пиксела, а полный размах ошибки не превышает 0,39 пиксела. Реальный диаметр отверстия равен 2498 мкм. Следовательно, среднеквадратическое значение ошибки системы при измерении фотошаблона составило 1,5 мкм. На рис. 8, б показана развертка того же отверстия, пунктирными линиями обозначен номинальный радиус и поля допуска (± 5 мкм).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что приведенные выше технические решения и алгоритмы могут эффективно использоваться в задачах контроля размеров.

На основании исследований создана система контроля размеров отверстий со следующими характеристиками:

- рабочее поле 200 × 200 мм;
- шаг перемещения 20 мкм;
- скорость перемещения 10 мм/с;
- размер поля камеры 740 × 580 пиксел;
- кратность увеличения 1:1, 1:2;
- погрешность измерения диаметра 3 мкм;
- время обработки одного изображения отверстия 0,2 с.

Заключение. Предложена и исследована методика измерения отверстий по их телевизионным изображениям. Погрешность методики на эталонных отверстиях не превышала 0,1 от размера пиксела.

Создано программное обеспечение, реализующее предложенную методику автоматического определения диаметров отверстий круглой формы.

Разработана автоматическая оптико-электронная система контроля геометрических параметров отверстий сит. Система позволяет сократить время проведения сертификации сит по сравнению с их ручным контролем более чем в 20 раз.

Метрологическая аттестация системы показала, что погрешность измерения образцовых объектов не превышает 3 мкм (по фотошаблону 1,5 мкм).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенные технические решения могут эффективно использоваться в задачах контроля размеров отверстий в ситах и при их аттестации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seitz P. Optical superresolution using solid-state cameras and digital processing // Opt. Eng. 1988. 27, N 7.
2. Обидин Ю. В., Патерикин В. И. Контроль сквозных отверстий малого размера в алмазной промышленности // Материалы II междунар. научно-практической конф. «Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики». Новочеркасск: ЮРГТУ (РПИ), 2001. С. 34.

*Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН,
E-mail: obidin@tdisie.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
28 мая 2003 г.*

Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!