

- бражений в оптико-цифровой системе промышленного контроля.— *Автометрия*, 1983, № 4.
8. Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Оперативное формирование полей допусков при контроле формы изделий.— *Автометрия*, 1979, № 1.
  9. Mikhlyayev S. V., Chugui Yu. V., Soldatenkov I. S., Gurtova T. V. Producing of tolerance gaps by spatial filtering.— *Optica Applicata*, 1981, vol. XX, N 1, p. 169—182.
  10. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику.— М.: Мир, 1970.
  11. Богомолов Е. Н., Дикун А. Е., Юношев В. П. Аппаратные и программные средства оптико-цифровой системы контроля.— *Автометрия*, 1983, № 4.
  12. Солобоев В. Е., Солоненко В. И. Контроллер КАМАК к ЭВМ «Электроника-60» с внутренней обработкой запросов.— *Автометрия*, 1980, № 4.
  13. Соловьев Н. Г. Дифракционный коррелятор для допускового контроля размеров с инверсной выходной характеристикой.— *Автометрия*, 1981, № 1.

*Поступила в редакцию 29 марта 1983 г.*

УДК 531.715.2 : 535.317.2 : 631.325.5

**В. В. ВЕРТОПРАХОВ, С. В. МИХЛЯЕВ, Ю. В. ЧУГУЙ**

*(Новосибирск)*

### **ОПТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО КОНТРОЛЯ**

В работе [1] приведено описание общей структуры и принципа работы оптико-цифровой системы бесконтактного многомерного контроля (ОЦСК) геометрических параметров промышленных изделий. В состав ОЦСК входят блоки оптической и электронной обработок информации, телевизионная камера и микро-ЭВМ. В настоящем сообщении рассматривается блок оптической обработки информации (БООИ), выполняющий в ОЦСК функции аналогового устройства предварительной обработки изображений контролируемых изделий.

В известных телевизионных измерительных системах на вход телекамеры (многоэлементного фотоприемника) подается, как правило, теневое изображение объекта, сформированное в проходящем или отраженном свете [2, 3].

Такие системы используются в основном для многомерного контроля мелких изделий, например в часовой промышленности. Увеличение габаритов изделий приводит к существенному снижению точности контроля или увеличению времени анализа и усложнению конструкции механической части системы, поскольку в этом случае приходится либо уменьшать изображение, с тем чтобы разместить его в приемном поле телекамеры, либо производить его последовательную обработку по фрагментам. Повышение точности контроля в таких системах достигается при дифференциальном методе измерения с помощью нескольких телевизионных камер или проекционных оптических систем, формирующих двойное изображение изделия [2].

Многокамерные системы применяются в основном для контроля крупногабаритных объектов, характерные размеры которых составляют десятки сантиметров. Системы с двойным изображением используются, в свою очередь, при контроле наиболее массовой продукции с меньшими размерами. Серьезный недостаток систем с двойным изображением, препятствующий их широкому распространению, связан с одномерным характером осуществляемого в них преобразования. Это обстоятельство во многих случаях не исключает необходимости последовательного анализа изображения по фрагментам и тем самым существенно ограничивает

класс контролируемых объектов. Указанный недостаток устраняется в ОЦСК с помощью БООИ, позволяющего реализовать дифференциальный метод измерений и дающего возможность одновременно совмещать изображения требуемых фрагментов изделия в приемном поле телекамеры. Следствием этого является расширение диапазона контролируемых размеров практически без потери точности и быстродействия ОЦСК.

Рассмотрим характер преобразований, выполняемых в БООИ над изображением контролируемого объекта. Пусть  $f(x, y)$  — бинарная функция, описывающая пропускание объекта, помещаемого на входе БООИ. Для одновременного размещения в приемном поле телекамеры всех подлежащих контролю фрагментов изображения объекта достаточно, чтобы БООИ осуществлял мультиплицирование исходного изображения с заданными пространственными сдвигами. Изображение на выходе БООИ при таком преобразовании описывается выражением

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L f(x - x_i, y - y_j), \quad (1)$$

где  $x_i, y_j$  — величины сдвигов.

В общем случае соотношение (1) является многоградиционной функцией. Это обстоятельство существенно затрудняет обработку выходного изображения и приводит к снижению точности измерений, особенно при использовании когерентного источника света (в силу интерференции различных составляющих (1)). Устранение этого недостатка достигается в БООИ путем дополнительной высокочастотной фильтрации изображения, в результате которой изображение (1) преобразуется к виду

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L P_{xy} \{f(x - x_i, y - y_j)\}. \quad (2)$$

Здесь  $P_{xy}\{\cdot\}$  — оператор оконтуривания изображения, например лапласиан. Анализ выражения (2) показывает, что такое преобразование исходного изображения может быть получено в линейной пространственно-инвариантной оптической системе с импульсным откликом

$$h(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L P_{xy} \{\delta(x - x_i, y - y_j)\}, \quad (3)$$

где  $\delta(\cdot)$  — функция Дирака.

Рассмотрим в качестве примера простейший случай, когда мультиплицирование изображения осуществляется в одном направлении вдоль координаты  $x$ . При этом положим  $N=2$ , а величины сдвигов выберем равными по абсолютной величине:  $x_1 = -x_2 = D_0/2$ . В этом случае из (3) получим

$$h(x, y) = P_{xy} \{\delta(x - D_0/2, y) + \delta(x + D_0/2, y)\}. \quad (4)$$

Для синтеза системы с откликом (4) достаточно воспользоваться оптической системой фильтрации с передаточной функцией фильтра

$$H(\omega_x, \omega_y) = H_0(\omega_x, \omega_y) \cos(D_0\omega_x/2), \quad (5)$$

где  $H_0(\omega_x, \omega_y)$  — оконтуривающий, а  $\cos(D_0\omega_x/2)$  — расщепляющий компоненты фильтра ( $\omega_x, \omega_y$  — пространственные частоты).

Если на входе такой системы установлен контролируемый объект (рис. 1, а), то на выходе ее формируются два оконтуренных (рис. 1, б) и смещенных относительно друг друга изображения объекта (рис. 1, в). Величина смещения при этом однозначно определяется параметром  $D_0$  расщепляющего компонента фильтра. В результате такого преобразования в приемном поле телекамеры (показано штриховой линией) формируется дифференциальное изображение (или поле отличий), состоящее в данном случае из двух контуров  $2'$  и  $1''$ .

Расстояние  $D_\Delta(y)$  между этими контурами определяется размером объекта  $D(y)$  и величиной расщепления  $D_0$ :  $D_\Delta = |D(y) - D_0|$ . Ширина

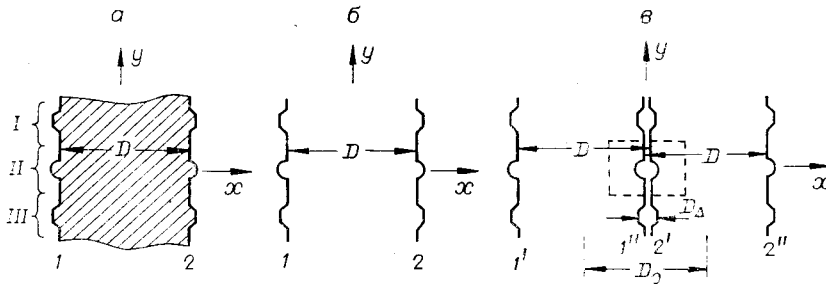


Рис. 1.

контура зависит от параметров источника света и оконтуривающего компонента фильтра [4—8]. Истинный размер объекта  $D(y)$  находится по результатам измерения величины  $D_{\Delta}$  в изображении поля отличий при известных значениях параметров расщепления  $D_0$  и увеличении  $M$  оптической системы:  $D = D_0 \pm D_{\Delta}/M$ . Применение фильтра (5) оправдано в том случае, когда максимальный размер формируемого с его помощью дифференциального изображения не превышает размера приемного поля телекамеры. В противном случае для согласования этих размеров требуется дополнительное мультиплицирование изображения по координате  $x$ , что может быть осуществлено, например, с помощью более сложного фильтра в виде суперпозиции компонентов (5) с различными параметрами расщепления. В частности,  $N$ -кратное мультиплицирование изображений объектов, имеющих осесимметричную теневую проекцию ( $y$  — ось симметрии), позволяет сформировать дифференциальное изображение, удовлетворяющее условию:

$$D_{\Delta}(y) \leq (D_{\max} - D_{\min})/N,$$

где  $[D_{\min}, D_{\max}]$  — диапазон контролируемых размеров  $D(y)$ . В этом случае расстояния  $D_i$  ( $i = 1, \dots, N-1$ ) между центрами мультиплицированных изображений определяются соотношением  $D_i = D_{\min} + i(D_{\max} - D_{\min})/N$ . При  $D_{\min} \rightarrow 0$  возможно мультиплицирование с постоянным шагом  $D_0 = D_{\max}/N$ . На рис. 2 показаны изображение контура такого объекта (а) и результат его мультиплицирования при  $N = 5$  (б). Видно, что размер дифференциального изображения (заштрихованная область) не превышает значения  $\max D_{\Delta} = D_{\max}/5$ .

Синтез оптической системы с более сложным откликом (3) осуществляется путем замены расщепляющего компонента фильтра (5), например, на совокупность дифракционных решеток различного периода и ориентации, обеспечивающих требуемые смещения  $x_i, y_j$ . Дифференциальное изображение в этом случае может быть представлено в виде серии изображений, аналогичных показанному на рис. 1, в, но сдвинутых по координатам  $x$  и  $y$  таким образом, что в приемное поле телекамеры попадают одновременно изображения всех нужных его фрагментов I, II и III (рис. 3, б). Импульсный отклик системы, соответствующий описанному выше случаю и задающий координаты центров мультиплицированных изображений, схематически изображен на рис. 3, а.

Рассмотренное преобразование изображений в ОЦСК осуществляет БООИ, оптическая схема которого приведена на рис. 4. БООИ представ-

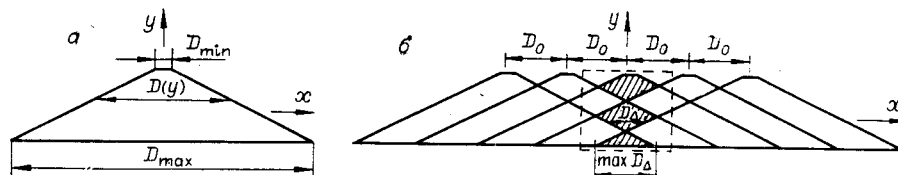


Рис. 2.

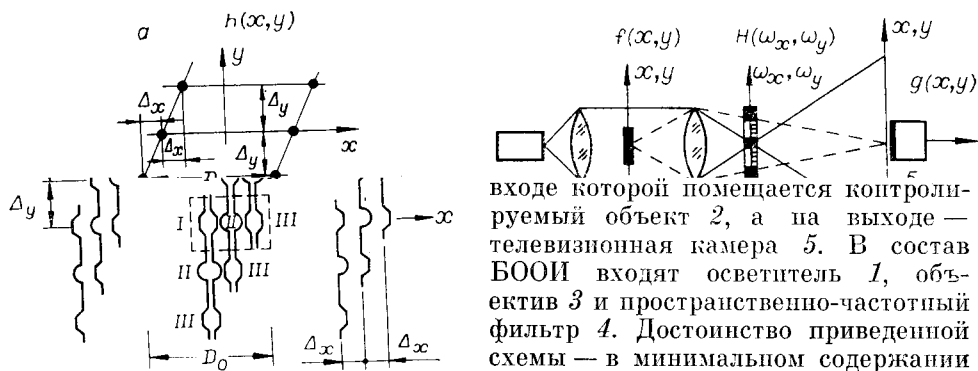


Рис. 3.

ласовании геометрических параметров дифференциального изображения с размерами приемного поля телекамеры.

Основным элементом БОИИ является оптический фильтр, поскольку именно он определяет закон преобразования исходного изображения. Фильтр состоит из двух компонентов — оконтуривающего и расщепляющего. Оконтуривающий компонент может быть выполнен как в полуплосковом, так и в бинарном виде с учетом параметров используемого источника света [7, 8].

В качестве расщепляющего фильтра допускается использование скрещенных дифракционных решеток. С целью снижения световых потерь в оптической системе и уменьшения влияния вторичных дифракционных порядков наиболее предпочтительно применение фазовых решеток, количество дифракционных порядков которых согласовано с требуемыми параметрами мультиплицирования ( $x_i, y_j, N, L$ ) исходного изображения [9].

Заметим, что расщепляющий фильтр может быть изготовлен также путем голографической регистрации дифракционной картины от системы точечных отверстий в непрозрачном экране. При линейном режиме регистрации без опорного светового пучка каждая пара отверстий будет задавать направление, вдоль которого расположатся центры трех мультиплицированных изображений. В этом случае расстояния между центрами крайних изображений (при проецировании без увеличения) в 2 раза превышают расстояния между парами отверстий, соответствующих данному направлению, а центральное изображение является общим для любой пары отверстий.

Рис. 5, 6 служат иллюстрациями преобразований, осуществляемых в БОИИ над изображением контролируемого изделия. На рис. 5, а показано изображение контура резьбового изделия, полученное без расщепляющего фильтра, а рис. 5, б соответствует случаю, когда в качестве расщепляющего фильтра применялась одномерная фазовая дифракционная решетка (50 лин/мм) с прямоугольным профилем штрихов, обеспечивающая относительный сдвиг фазы световой волны в соседних зонах на  $\pi$ .

На рис. 6 приведено дифференциальное изображение, полученное с использованием голографического фильтра (рис. 7), изготовленного изложенным выше способом с помощью транспаранта с тремя отверстиями, не лежащими на одной прямой. Расстояния  $d_{ij}$  между отверстиями удовлетворяли следующему условию:  $d_{12} \ll d_{13} \approx d_{23} \approx D/2$ , где  $D$  — диаметр изделия. Из рисунка видно, что поле отличий состоит из двух иден-

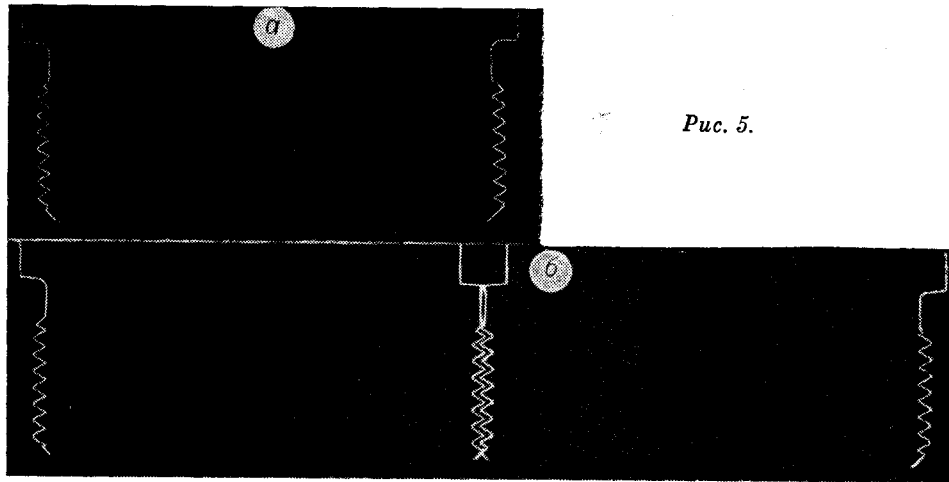


Рис. 5.

тичных изображений (аналогичных центральной части рис. 5, б), сдвинутых по двум координатам. Заметим, что во всех рассмотренных примерах в качестве оконтуривающего использовался одномерный полосовой пространственно-частотный фильтр с амплитудным пропусканием

$$H_0(u) = \text{sgn}(u) \{ \text{rect}(u/d_1) - \text{rect}(u/d_2) \}, \quad (6)$$

обеспечивающий формирование одинарного контура изображения ( $u$  — пространственная координата в частотной плоскости системы). Для реализации знаковой функции передаточной характеристики (6) применялась полуволновая фазовая пластинка. Параметры фильтра  $d_1$  и  $d_2$  составляли соответственно 5 и 1 мм. Выбор таких значений обеспечивал (при фокусном расстоянии объектива 200 мм) снижение влияния эффектов отражения света от поверхности изделия на качество формируемого контура изображения, а также необходимую глубину резкости.

Применение разработанного БОИИ в составе ОЦСК позволило проводить многомерный контроль корпусных изделий сложной конфигурации, максимальные размеры которых ( $\sim 40$  мм) ограничивались сверху лишь размерами апертуры оптической системы. Абсолютная погрешность измерений при  $3\times$  увеличении изображения составила  $2 \div 10$  мкм. Дальнейшее снижение погрешности может быть достигнуто при исполь-

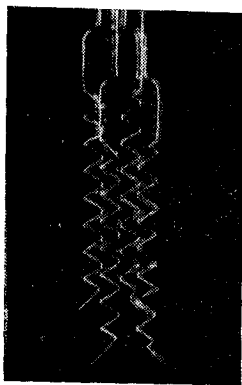


Рис. 6.

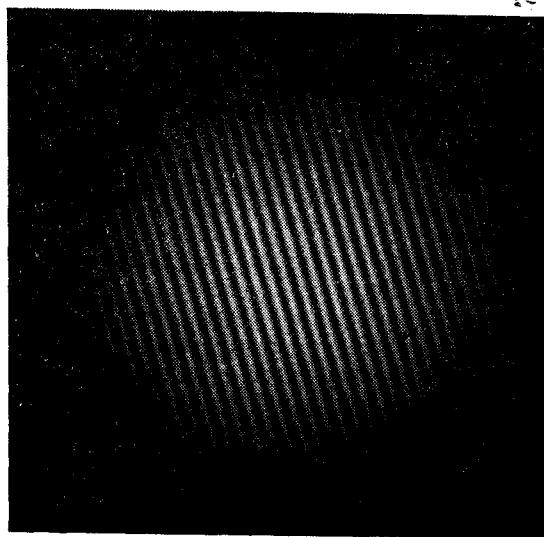


Рис. 7.

зовании больших увеличений, а также при введении цифровой коррекции геометрических искажений оптико-телевизионного тракта.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили эффективность применения методов пространственно-частотной фильтрации при разработке оптико-цифровых систем промышленного контроля на базе телевизионных средств. С помощью этих методов удается осуществить мультиплицирование изображения по сложному закону совместно с его высокочастотной фильтрацией и тем самым сформировать в приемном поле телекамеры дифференциальное изображение, содержащее всю необходимую информацию о геометрических параметрах различных фрагментов контролируемого изделия. Сочетание такого аналогового оптического преобразования с его цифровой обработкой позволяет существенно расширить класс контролируемых изделий и увеличить диапазон измерений практически без потери точности и быстродействия измерительной системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вертопрахов В. В., Михляев С. В., Чугуй Ю. В., Юношев В. П. Оптико-цифровая система промышленного контроля.— Автометрия, 1983, № 4.
2. Полоник В. С. Телевизионные автоматические устройства.— М.: Связь, 1974.
3. Горелик С. Л., Кац Б. М., Киврин В. И. Телевизионные измерительные системы.— М.: Связь, 1980.
4. Birch K. G. A spatial frequency filter to remove zero frequency.— Opt. Acta, 1968, vol. 15, N 2.
5. Dew G. D. The application of spatial filtering techniques to profile inspection, and an associated interference phenomenon.— Opt. Acta, 1970, vol. 17, N 4.
6. Gupta S. V., Sen D. Dark-field (diffrimoscopic) images of periodic objects.— Opt. Acta, 1972, vol. 19, N 2.
7. Зверев В. А., Хилько А. П., Шишарин А. В. К вопросу об использовании источников некогерентного белого света в схемах пространственной фильтрации изображений.— Автометрия, 1978, № 2.
8. Кривенков Б. Е., Чугуй Ю. В. Качественное оконтуривание двумерных теневых изображений.— Автометрия, 1979, № 1.
9. Бобров С. Т., Котлецов Б. Н., Минаков В. И., Туркевич Ю. Г. Дифракционные решетки с порядками одинаковой интенсивности.— В кн.: Голографические измерительные системы/Под ред. А. Г. Козачка.— Новосибирск, 1978, вып. 2, с. 123—129.

*Поступила в редакцию 24 марта 1983 г.*

УДК 681.325 : 621.378.9

С. К. ЛИ, Э. А. МНАЦАКАНЯН, В. Н. МОРОЗОВ

(Москва)

### ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ МАТРИЦЫ

**Введение.** Несмотря на то, что создание БИС (больших интегральных схем) явилось крупнейшим достижением цифровой вычислительной техники, оно, однако, не смогло решить проблемы выпуска малыми сериями разнообразных логических схем, так как это связано с большими затратами на проектирование и производство БИС. Для реализации указанных логических схем в последнее время разработаны и находят все более широкое применение в различных устройствах вычислительной техники и цифровой автоматики программируемые логические матрицы (ПЛМ). Они представляют собой высокорегулярные электронные логические схемы, позволяющие вычислять набор определенных дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ) [1].