

С. В. МИХЛЯЕВ, Ю. В. ЧУГУЙ
(Новосибирск)

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСЩЕПЛЯЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Допусковый контроль размеров изделий сложной формы оптически-ми средствами обычно сводится к сравнению контролируемого объекта с некоторым эталоном — полем допусков. Для этих целей в основном используют проекционные системы, в которых изображения полей допусков задаются на транспарантах различного вида [1, 2]. От этих систем выгодно отличаются корреляционные, основанные на пространственной фильтрации изображений в когерентном свете [3, 4]. Информация об эталонном объекте кодируется в них на голографическом фильтре в спектральном виде, что заметно облегчает автоматизацию процесса измерений и открывает возможность создания высокопроизводительных систем контроля. Однако широкое распространение таких систем в немалой степени сдерживается трудностями синтеза фильтров с заданной передаточной функцией. В [4], например, для получения фильтра требуется предварительное изготовление сложного трехградационного транспаранта, в то время как более простой способ [3], использующий эталонное изделие, практически исключает возможность допускового контроля.

В настоящей работе излагается корреляционный метод допускового контроля, в котором для получения голографического фильтра с импульсным откликом в виде поля допусков применяется эталонный объект (изделие или двухградационный транспарант) и предложенный ранее расщепляющий фильтр [5]. При контроле различных изделий в этом случае может быть использован один и тот же расщепляющий фильтр и, таким образом, отпадает необходимость в изготовлении для каждого изделия сложных транспарантов.

Рассматриваемый метод включает два этапа: синтез голографического фильтра и собственно контроль изделий.

Синтез фильтра осуществляется голографированием светового распределения в виде поля допусков $h(x, y)$, формируемого в обычной когерентно-оптической системе фильтрации [5] при наличии эталонного объекта $f_{\text{эт}}(x, y)$ и расщепляющего фильтра с импульсным откликом $h_p(x, y)$:

$$h(x, y) = f_{\text{эт}}(x, y) \otimes h_p(x, y). \quad (1)$$

Поле допусков представляет собой световое распределение (рис. 1) в виде двух контуров 1, 2 с амплитудами света разного знака, отстоящих от границы 3 эталонного объекта на расстоянии $\pm \varepsilon$. В качестве расщепляющего фильтра для получения (1) может быть взят, например, фильтр с передаточной функцией

$$H_p(\omega) = (1/\Delta) \sin \Delta \omega \sin \varepsilon \omega,$$

где $\omega = (\omega_x^2 + \omega_y^2)^{1/2}$, а параметр Δ определяет ширину контура. Заметим, что при $\Delta = \varepsilon$ передаточная функция фильтра становится униполярной и поле допусков приобретает вид двух световых полос шириной 2ε , примыкающих с разных сторон к границе эталонного объекта.

При голографической регистрации светового распределения (1) синтезируется фильтр с передаточной функцией

$$H(\omega_x, \omega_y) = \mathcal{F}\{h(x, y)\} = F_{\text{эт}}(\omega_x, \omega_y) H_p(\omega).$$

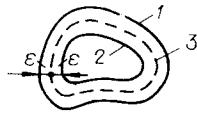


Рис. 1.

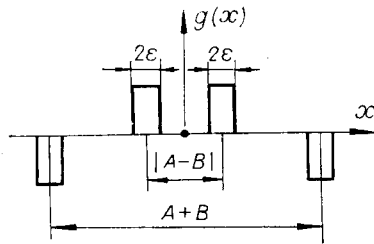


Рис. 3.

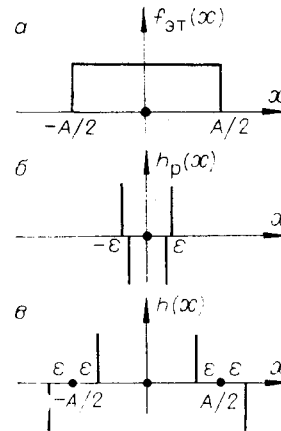


Рис. 2.

Здесь $F_{эт}(\omega_x, \omega_y)$ — спектр эталонного объекта, $\mathcal{F}\{\cdot\}$ — фурье-преобразование. Полученный таким образом фильтр используется затем при контроле размеров изделий в корреляционной системе Вандер Люгта.

Процесс контроля объекта $f(x, y)$ сводится к формированию по его спектру $F(\omega_x, \omega_y)$ функции корреляции

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{F(\omega_x, \omega_y)H(\omega_x, \omega_y)\} \quad (2)$$

и к обработке ее с целью получения необходимой информации о форме и размерах контролируемого объекта.

Существенно, что в корреляционном методе легко реализуется многоканальный контроль. Это достигается последовательной голографической регистрацией различных фрагментов $h_i(x, y)$ поля допусков (1) с разными углами наклона опорного пучка. Происходящее в этом случае пространственное разделение корреляционных функций

$$g_i(x, y) = f(x, y) \otimes h_i(x, y) \quad (3)$$

дает возможность контролировать объект по фрагментам и тем самым повышать точность контроля.

Способы считывания светового распределения зависят от функций (3), вид которых определяется формой фрагментов объекта и эталона. Тем не менее можно указать способ считывания, инвариантный к форме объекта, в соответствии с которым регистрация светового потока осуществляется в центре корреляционной функции, в результате чего формируется сигнал $I \sim |g(0, 0)|^2$.

Например, для полей допусков с шириной контура $\Delta = 0$ ($H_p(\omega) = \omega \sin \varepsilon \omega$) при одинаковом изменении всех контролируемых размеров

$$I = \begin{cases} \text{const} \neq 0, & \text{если размеры объекта находятся в допуске;} \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (4)$$

В случае использования расщепляющего фильтра с $\Delta = \varepsilon$ ($H_p(\omega) = (1/\varepsilon)\sin^2 \varepsilon \omega$) получаемый при тех же условиях сигнал в отличие от (4) зависит от рассогласования контролируемых и эталонных размеров σ :

$$I = \begin{cases} \text{const} \left(\varepsilon - \frac{\sigma}{4}\right)^2 & \text{для } 0 \leq \sigma < 4\varepsilon, \\ 0 & \text{для } \sigma \geq 4\varepsilon. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, по уровню сигнала (5) может быть определена величина отклонения контролируемых размеров от эталонных.

Отметим, что полученные характеристики (4), (5) достигаются с помощью фотоприемников с точечными диафрагмами, что связано со значительными потерями света. Применение фотоприемников с большой апертурой приводит, однако, к снижению точности контроля. Кроме того, в этом случае необходимо, как правило, знание корреляционной функции (2). Поэтому при выборе того или иного способа считывания светового потока следует учитывать специфику конкретной задачи контроля.

Рассмотрим использование корреляционного метода для контроля простых, но часто встречающихся фрагментов изображений изделий в виде щели (или экрана) шириной B . Для фрагментов другого типа контроль осуществляется аналогичным образом. В последующем изложении будем опускать индексы и говорить не о фрагментах, а о полных изображениях, полагая, что эти изображения имеют указанный выше вид.

Итак, определим корреляционную функцию при допусковом контроле щелевой диафрагмы и обсудим способы считывания светового распределения. Расчет проведем без учета дифракционных ограничений.

Разобьем множество контролируемых объектов на два класса. К классу L_1 отнесем те объекты, размеры которых лежат в допуске, задаваемом фильтром, а к классу L_2 — объекты, размеры которых выходят из допуска.

Пусть эталонным объектом является щелевая диафрагма шириной A :

$$f_{\text{эт}}(x, y) = f_{\text{эт}}(x) = \text{rect}(x/A). \quad (6)$$

С помощью расщепляющего фильтра согласно (1) и (6) можно получить голографический фильтр с импульсным откликом в виде поля допусков (при $\Delta = 0$):

$$h(x, y) = h(x) = \delta(x - A/2 + \epsilon) + \delta(x + A/2 - \epsilon) - \delta(x - A/2 - \epsilon) - \delta(x + A/2 + \epsilon). \quad (7)$$

Эталонное изображение $f_{\text{эт}}(x)$, импульсные отклики расщепляющего $h_p(x)$ и голографического $h(x)$ фильтров показаны на рис. 2, а — соответственно. Используем фильтр (7) для корреляционного контроля объекта в виде щелевой диафрагмы шириной B :

$$f(x) = \text{rect}(x/B). \quad (8)$$

Согласно (2) определим корреляционную функцию для этого случая:

$$g(x) = \sum_{i,j=0}^1 (-1)^{i+1} \text{rect} \left\{ \frac{x - (-1)^j \left(\frac{A + (-1)^i B}{2} \right)}{2\epsilon} \right\}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что $g(x)$ представляет собой световое распределение (рис. 3) в виде четырех прямоугольных импульсов, центральные из которых имеют положительную амплитуду, а боковые — отрицательную. При изменении размера B расстояния между импульсами меняются так, что при $|B - A| < 2\epsilon$ центральные импульсы накладываются и происходит сложение их амплитуд. Для полей допусков с $\Delta \neq 0$ корреляционная функция имеет аналогичный вид, но импульсы становятся трапециевидными (треугольными при $\Delta = \epsilon$).

При контроле размера объекта возможны следующие способы считывания полученного светового распределения (9):

1. Счет количества импульсов (N) либо обнаружение нуля между центральными импульсами фотоприемником с точечной диафрагмой. При этом $f(x) \in L_1$, если $N = 3$, и $f(x) \in L_2$, если $N = 4$. Определение истинного размера объекта достигается измерением расстояний между импульсами.

$$I = \begin{cases} 1 - |A - B|/4\varepsilon & \text{для } f(x) \in L_1, \\ 1/2 & \text{для } f(x) \in L_2 \end{cases} \quad (10)$$

и может быть использован для допускового контроля и определения величины отклонения контролируемого размера (8) от эталонного (6).

Чувствительность S в рассматриваемом способе интегрирования зависит от ε :

$$S = \left| \frac{\partial I}{\partial B} \right| / I_{\max} = 1/4\varepsilon.$$

3. Интегрирование всего светового потока в корреляционной плоскости. Выходной сигнал аналогичен (10) с тем лишь отличием, что уровень постоянной составляющей несколько больше, а чувствительность меньше:

$$I = \begin{cases} 1 - |A - B|/6\varepsilon & \text{для } f(x) \in L_1, \\ 2/3 & \text{для } f(x) \in L_2, \end{cases}$$

$$S = 1/6\varepsilon.$$

Аналогичным образом могут быть определены выходные сигналы для полей допусков с $\Delta \neq 0$.

С целью экспериментального исследования предложенного метода проводился контроль тестовых объектов — щелевых диафрагм различной ширины. При этом для получения фильтра с импульсным откликом в виде поля допусков использовался расщепляющий фильтр $H_p(\omega) = \omega J_1(\varepsilon\omega)$, выполненный по амплитудно-фазовой методике [5] ($J_1(\cdot)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка). Погрешность изготовления фазового рельефа не превосходила 2%, а амплитудной маски — 10—15%. Диаметр фильтра составлял 14 мм при $\varepsilon \sim 0,11$ мм. Эталонным объектом служила щелевая диафрагма размером 1×20 мм. Синтез фильтра осуществлялся путем голографической регистрации фрагмента изображения поля допусков (2—4 мм), сформированного расщепляющим фильтром. Полученный таким образом фильтр применялся при корреляционном контроле.

На рис. 4 приведены фотографии светового распределения в выходной плоскости корреляционной системы, а на рис. 5 — результаты его сканирования (фотоприемником с диафрагмой 10 мкм) в трех случаях: контролируемый размер не в допуске (а), в допуске (б) и совпадает с эталонным (в).

Результаты интегрирования двух центральных корреляционных импульсов при различных контролируемых размерах показаны на графике рис. 6. Экспериментальные данные хорошо согласуются с выражением (10). На рис. 7 приведены соответствующие осциллограммы для двух случаев: размер диафрагмы не в допуске (а) и совпадает с эталонным (б). Видно, что амплитуда центрального максимума, как и следовало ожидать, меняется при этом в 2 раза.

Аналогичные результаты получены в экспериментах по контролю объектов более сложного вида — конуса и наружной резьбы. При этом использовались расщепляющие фильтры $H_p(\omega) = \omega \sin \varepsilon\omega$ и $H_p(\omega) = \sin^2 \varepsilon\omega$.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что рассмотренный корреляционный метод может быть успешно применен для допускового контроля размеров изделий сложной формы. При этом синтез голографического фильтра осуществляется простыми средствами: с помощью эталонного объекта и расщепляющего фильтра. Существенно, что этот метод при точечном считывании светового потока дает возможность проводить допусковый контроль изделий в случае не-

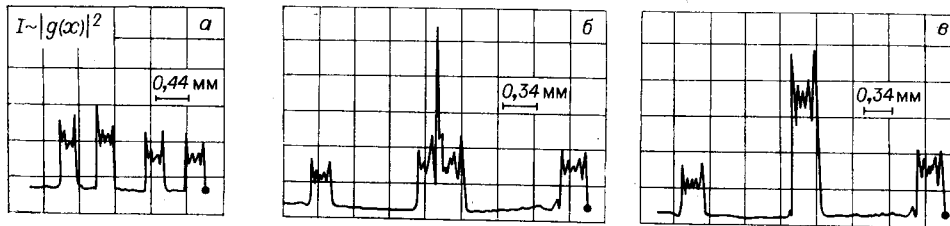
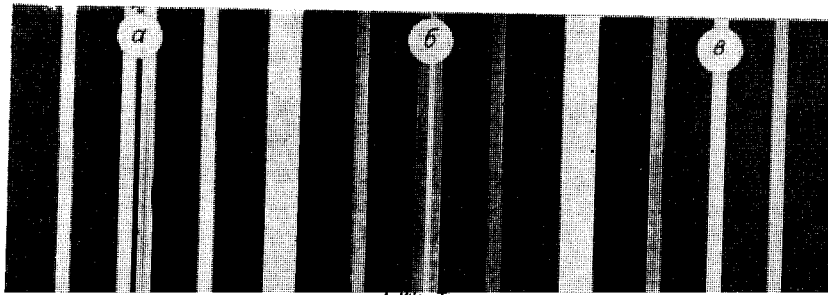


Рис. 5.

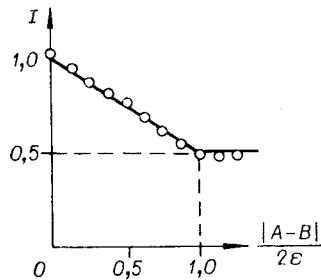


Рис. 6.

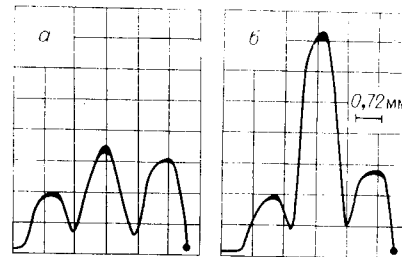


Рис. 7.

известной корреляционной функции. При соответствующей обработке выходных сигналов метод допускает измерение истинных размеров контролируемого объекта.

Авторы выражают благодарность И. С. Солдатенкову за изготовление фазовых компонентов расщепляющих фильтров и О. И. Потатуркину за полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Г. Измерительные приборы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1964.
2. Болдырева И. С. и др. Контроль размеров деталей сложной формы.— Автометрия, 1976, № 3.
3. Indebetouw G., Tschudi T., Steffen J. Optical Processing Techniques in the Quality Control of Micromechanics.— Appl. Opt., 1978, vol. 17, p. 991.
4. Козлов О. А., Нежевенко Е. С., Потатуркин О. И. Распознавание изображений в когерентно-оптических системах с применением контурных эталонов.— Автометрия, 1976, № 6.
5. Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Оперативное формирование полей допусков при контроле формы изделий.— Автометрия, 1979, № 1.

Поступила в редакцию 12 октября 1979 г.