

Н. Г. СОЛОВЬЕВ  
(Новосибирск)

## ДИФРАКЦИОННЫЙ КОРРЕЛЯТОР ДЛЯ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ С ИНВЕРСНОЙ ВЫХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

**Введение.** Для контроля размеров и формы изделий все большее применение находят дифракционные корреляторы [1, 2]. Их метрологические характеристики во многом определяются структурой импульсного отклика голографического фильтра. В известном корреляторе для допускового контроля диаметров цилиндрических изделий [2] импульсный отклик фильтра независимо от способа его изготовления [3—5] имеет симметричную по амплитуде и фазе структуру относительно оси  $y$  (рис. 1):

$$h(x, y) = \left\{ \text{rect} \left[ \frac{x + 0,5(A + \varepsilon - \delta)}{\delta} \right] - \text{rect} \left[ \frac{x + 0,5(A - \varepsilon + \delta)}{\delta} \right] - \right. \\ \left. - \text{rect} \left[ \frac{x - 0,5(A - \varepsilon + \delta)}{\delta} \right] + \text{rect} \left[ \frac{x - 0,5(A + \varepsilon - \delta)}{\delta} \right] \right\} \text{rect} \left( \frac{y}{l} \right), \quad (1)$$

где  $A$  — величина размера изделия, лежащего в середине допуска (номинальный размер);  $\varepsilon$  — величина контрольного поля;  $\delta$  — размер пропускающей границы контрольного поля, причем  $0 < \delta \leq \varepsilon/2$ ;  $l$  — длина отклика. Знаками «+» и «-» на рис. 1 отмечены области, отличающиеся фазой прошедшей через них плоской волны на  $\pi$ .

Характерная особенность выходной характеристики такого коррелятора  $P(\Delta)$  ( $P$  — выходной сигнал, пропорциональный световому потоку центральной части корреляционного поля;  $\Delta = A - B$ ,  $B$  — размер контролируемого изделия) состоит в том, что ее максимальное значение соответствует изделиям с номинальными размерами. При отклонении размера  $B$  от номинального значения величина сигнала падает и принимает значения  $0,5 P_{\max}$  при  $|A - B| \geq \varepsilon$ . Падение характеристики не до нуля ограничивает крутизну нормированной выходной характеристики.

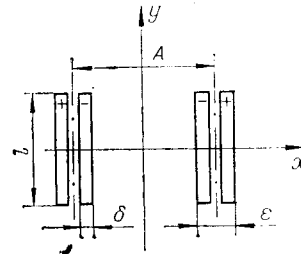


Рис. 1.

В настоящей работе исследуется возможность построения контрольно-измерительной системы с инверсной (возрастающей) характеристикой. Такая характеристика имеет более высокую крутизну и позволяет повысить надежность контроля.

Ниже показано, что эта характеристика имеет место при несимметричном импульсном отклике фильтра коррелятора. Обсуждаются способы получения таких фильтров, оцениваются требования к точности юстировки фильтров.

**Исследование выходной характеристики коррелятора с фильтром, имеющим несимметричный отклик.** Отклик такого фильтра

$$h(x, y) = \left\{ \text{rect} \left[ \frac{x + 0,5(A + \varepsilon - \delta)}{\delta} \right] - \text{rect} \left[ \frac{x + 0,5(A - \varepsilon + \delta)}{\delta} \right] + \right. \\ \left. + \text{rect} \left[ \frac{x - 0,5(A - \varepsilon + \delta)}{\delta} \right] - \text{rect} \left[ \frac{x - 0,5(A + \varepsilon - \delta)}{\delta} \right] \right\} \text{rect} \left( \frac{y}{l} \right). \quad (2)$$

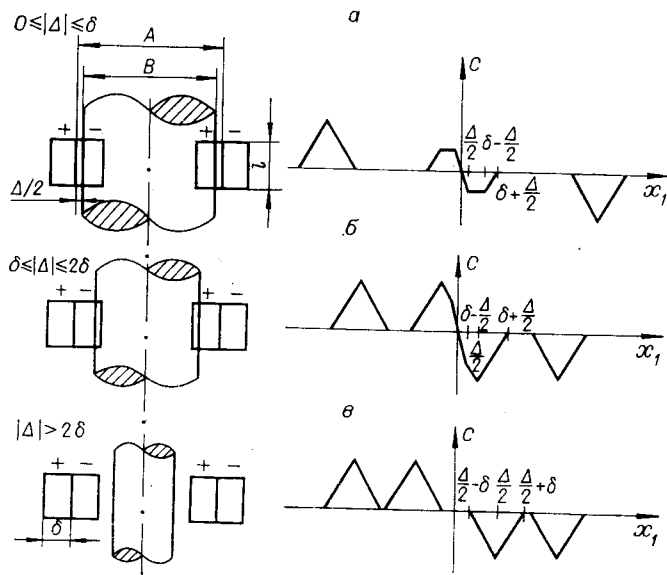


Рис. 2.

Входную функцию, представляющую теневое изображение бесконечного контролируемого цилиндрического изделия, можно записать в виде

$$f(x, y) = [1 - \text{rect}(x/B)]\text{rect}(y/D),$$

где  $D$  — диаметр светового пучка, освещающего изделие.

Распределение амплитуд в корреляционной плоскости при  $D \gg l$  и  $y < D/2$  в общем случае имеет вид четырех параллельных полос с трапециевидальным сечением:

$$g(x_1) = f(x, y) * h(x, y) = -l\psi\left[\frac{x_1 + 0,5(A+B)}{\varepsilon, \delta}\right] + l\psi\left[\frac{x_1 + 0,5(A-B)}{\varepsilon, \delta}\right] - \\ - l\psi\left[\frac{x_1 - 0,5(A-B)}{\varepsilon, \delta}\right] + l\psi\left[\frac{x_1 - 0,5(A+B)}{\varepsilon, \delta}\right]. \quad (3)$$

Здесь  $\psi$  — трапециевидальная функция, определяемая следующим образом:

$$\psi\left(\frac{x_1}{\varepsilon, \delta}\right) = \begin{cases} 1 & \text{при } |x_1| \leq \varepsilon/2 - \delta, \\ \frac{1}{\delta}(\varepsilon/2 - |x_1|) & \text{при } \varepsilon/2 \geq |x_1| \geq \varepsilon/2 - \delta, \\ 0 & \text{при } |x_1| \geq \varepsilon/2. \end{cases}$$

Из (3) видно, что при несимметричном импульсном отклике фильтра корреляционный сигнал состоит из разнополярных боковых и центральных импульсов трапециевидальной формы. Очевидно, что при  $A = B$  центральные импульсы полностью гасят друг друга, в результате чего в корреляционной плоскости остаются только боковые импульсы. В качестве примера на рис. 2, а — в приведена диаграмма изменения распределения амплитуд в поперечном сечении корреляционного сигнала при  $A - B \geq 0$  и  $\delta = \varepsilon/2$ . Расчеты показывают, что именно при этом значении  $\delta$  достигается максимальная крутизна характеристики.

Найдем выходную характеристику коррелятора при значении  $\delta = \varepsilon/2$ . С этой целью оценим в пределах двух центральных полос (3) световой

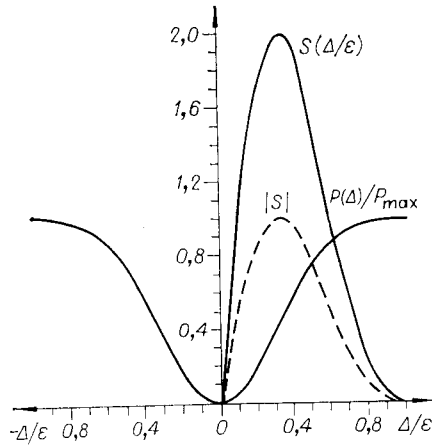


Рис. 3.

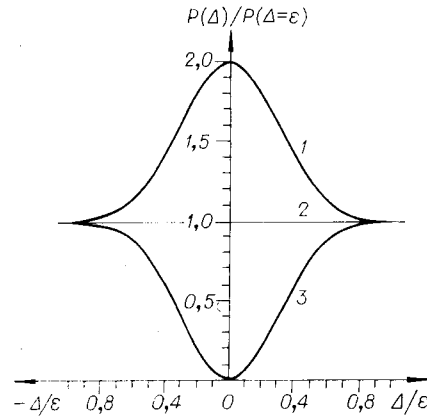


Рис. 4.

поток, падающий на фотоприемник с размером  $h$  по оси  $y_1$ :

$$P(\Delta) = hl^2 \int_{-0,5(|\Delta|+\varepsilon)}^{0,5(|\Delta|+\varepsilon)} \left\{ \psi \left[ \frac{x_1 + 0,5(A-B)}{\varepsilon, \delta} \right] - \psi \left[ \frac{x_1 - 0,5(A-B)}{\varepsilon, \delta} \right] \right\}^2 dx_1.$$

Путем несложных вычислений находим

$$P(\Delta) = \begin{cases} hl^2 (\varepsilon |\Delta|^2 - |\Delta|^3) & \text{при } 0 \leq |\Delta| \leq \varepsilon/2, \\ hl^2 (\varepsilon^2 |\Delta| - \varepsilon |\Delta|^2 + 1/3 |\Delta|^3 - 1/6 \varepsilon^3) & \text{при } \varepsilon/2 \leq |\Delta| \leq \varepsilon. \end{cases} \quad (4)$$

Нормируя функцию  $P(\Delta)$  на ее максимальное значение  $P_{\max} = (1/6)hl^2\varepsilon^3$ , достигаемое при  $|\Delta| = \varepsilon$ , для выходной характеристики окончательно получаем следующее выражение:

$$\frac{P(\Delta)}{P_{\max}} = \begin{cases} 6(|\Delta/\varepsilon|^2 - |\Delta/\varepsilon|^3) & \text{при } 0 \leq |\Delta/\varepsilon| \leq 1/2, \\ 2(|\Delta/\varepsilon| - 1)^3 + 1 & \text{при } 1/2 \leq |\Delta/\varepsilon| \leq 1. \end{cases} \quad (5)$$

График зависимости  $P(\Delta)/P_{\max} = f(\Delta/\varepsilon)$  приведен на рис. 3.

Найдем крутизну преобразования

$$S = \frac{d \frac{P(\Delta)}{P_{\max}}}{d(\Delta/\varepsilon)}$$

— важнейший параметр дифракционного коррелятора, определяющий его чувствительность к изменению размера контролируемого изделия. Несложный расчет показывает, что для характеристики (5)

$$S(\Delta/\varepsilon) = \begin{cases} 12|\Delta/\varepsilon| - 18|\Delta/\varepsilon|^2 & \text{при } 0 \leq |\Delta/\varepsilon| \leq 1/2, \\ 6(1 - |\Delta/\varepsilon|)^2 & \text{при } 1/2 \leq |\Delta/\varepsilon| \leq 1. \end{cases}$$

График крутизны  $S(\Delta/\varepsilon)$  при  $\Delta/\varepsilon > 0$  представлен на рис. 3. Для сравнения на этом же рисунке приведен график крутизны  $|S|$ , соответствующий коррелятору с фильтром, имеющим симметричный импульсный отклик. Заметим, что максимальное значение крутизны  $S(\Delta/\varepsilon) = 2$  (при  $|\Delta/\varepsilon| = 0,33$ ), что в два раза превышает крутизну, достигаемую при использовании фильтра с симметричным импульсным откликом. Отсюда следует, что при изготовлении голографического фильтра границу допуска на изделие целесообразно располагать в точке с максимальной крутизной, т. е. в этом случае должно выполняться условие  $|A - B_{\text{пр}}|/\varepsilon \approx 0,33$ , где  $B_{\text{пр}}$  — предельно-максимальный или минимальный размер контролируемого изделия.

**Способы получения голографического фильтра с несимметричным импульсным откликом.** Обсудим методы получения фильтров с несимметричным импульсным откликом. Очевидно, что в основном они остаются теми же, что и методы получения фильтров с симметричным откликом. Для этих целей, например, может быть применен метод, описанный в [5].

Здесь уместно рассмотреть метод использования фильтра с симметричным откликом с целью получения эффекта несимметричного отклика. Для этого сравним передаточные характеристики фильтров.

Для фильтра, имеющего импульсный отклик (1), передаточная функция

$$H(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-j(\omega_x x + \omega_y y)} dx dy =$$

$$= -4 \frac{\sin \omega_y l/2}{\omega_y} \frac{\sin \omega_x \delta/2}{\omega_x} \sin \omega_x \frac{\varepsilon - \delta}{2} \sin \omega_x \frac{A}{2}, \quad (6)$$

где  $\omega_x = 2\pi\xi/\lambda f$ ,  $\omega_y = 2\pi\eta/\lambda f$ ,  $f$  — фокусное расстояние объектива.

В случае импульсного отклика (2) передаточная функция

$$H(\omega_x, \omega_y) = 4 \frac{\sin \omega_y l/2}{\omega_y} \frac{\sin \omega_x \delta/2}{\omega_x} \sin \omega_x \frac{\varepsilon - \delta}{2} \cos \omega_x \frac{A}{2}. \quad (7)$$

Из сравнения (6) и (7) видно, что эти выражения отличаются лишь последним множителем. Очевидно, что если сместить фильтр (6) на величину  $\omega_x = \pi/A$ , то при условии  $A \gg \varepsilon$  его передаточная функция совпадает с функцией (7).

Это же можно показать, используя импульсный отклик смещенного фильтра. Действительно, учитывая, что смещенный спектр связан с  $h(x, y)$  соотношением

$$H(\xi + \xi_0, \eta) \leftrightarrow h(x, y) e^{j\omega_{0x}x},$$

где  $\omega_{0x} = 2\pi\xi_0/\lambda f$ , импульсный отклик этого фильтра при  $A \gg \varepsilon$  можно приближенно представить в виде

$$h'(x, y) \simeq \left\{ e^{-j\frac{\beta}{2}} \text{rect} \left[ \frac{x + 0,5(A + \varepsilon - \delta)}{\delta} \right] - e^{-j\frac{\beta}{2}} \text{rect} \left[ \frac{x + 0,5(A - \varepsilon + \delta)}{\delta} \right] - \right.$$

$$\left. - e^{j\frac{\beta}{2}} \text{rect} \left[ \frac{x - 0,5(A - \varepsilon + \delta)}{\delta} \right] + e^{j\frac{\beta}{2}} \text{rect} \left[ \frac{x - 0,5(A + \varepsilon - \delta)}{\delta} \right] \right\} \text{rect} \left( \frac{y}{l} \right). \quad (8)$$

Здесь  $\beta = \omega_{0x}A$ .

Видно, что при  $\beta/2 = \pi/2$  выражения (8) и (2), как и следовало ожидать, совпадают. Фазовому сдвигу  $\beta/2 = \pi/2$  соответствует смещение голографического фильтра на  $\xi_0 = \lambda f/2A$ . При  $\lambda = 0,63$  мкм,  $f = 300$  мм и  $A = 10$  мм необходимая величина смещения  $\xi_0 = 10$  мкм.

**Влияние точности юстировки фильтра на выходную характеристику коррелятора.** Для оценки влияния погрешностей юстировки голограммы на выходную характеристику коррелятора рассмотрим формирование распределения интенсивности света в центральной части корреляционного сигнала.

Фазовому сдвигу на угол  $\beta$  между членами 1, 2 и 3, 4 выражения (8), возникающему при смещении голографического фильтра, соответствует фазовый сдвиг на тот же угол между амплитудами света  $C_1$  и  $C_2$  в центральных полосах корреляционного сигнала.

В перекрывающихся частях центральных полос интенсивность света с учетом векторного сложения амплитуд можно определить по известной

формуле

$$C^2 = C_1^2 + C_2^2 + 2C_1C_2 \cos \beta. \quad (9)$$

Выходную характеристику найдем, взяв интеграл

$$P(\Delta) = hl^2 \int_{-0,5(|\Delta|+\varepsilon)}^{0,5(|\Delta|+\varepsilon)} \left\{ -e^{-j\omega_0 x \frac{A}{2}} \psi \left[ \frac{x_1 + 0,5(A-B)}{\varepsilon, \delta} \right] - e^{j\omega_0 x \frac{A}{2}} \psi \left[ \frac{x_1 - 0,5(A-B)}{\varepsilon, \delta} \right] \right\}^2 dx_1.$$

В результате интегрирования с учетом (9) при  $\delta = \varepsilon/2$  получим

$$P(\Delta) = \begin{cases} hl^2 \left[ \frac{1}{6} \varepsilon^3 + \cos \beta \left( \frac{1}{6} \varepsilon^3 + |\Delta|^3 - \varepsilon |\Delta|^2 \right) \right] & \text{при } 0 \leq |\Delta| \leq \varepsilon/2, \\ hl^2 \left[ \frac{1}{6} \varepsilon^3 + \cos \beta \left( \frac{1}{3} \varepsilon^3 - \varepsilon^2 |\Delta| + \varepsilon |\Delta|^2 - \frac{1}{3} |\Delta|^3 \right) \right] & \text{при } \varepsilon/2 \leq |\Delta| \leq \varepsilon. \end{cases} \quad (10)$$

Очевидно, что при  $\beta = 0$  выражение (10) описывает выходную характеристику коррелятора с фильтром, имеющим отклик (1), а при  $\beta = \pi$  совпадает с (4). Нормируя выходную характеристику (10) на  $P(\Delta = \varepsilon)$ , имеем

$$\frac{P(\Delta)}{P(\Delta = \varepsilon)} = \begin{cases} \frac{1 + \cos \beta (1 - 6|\Delta/\varepsilon|^2 + 6|\Delta/\varepsilon|^3)}{1 + \cos \beta (2 - 6|\Delta/\varepsilon| + 6|\Delta/\varepsilon|^2 - 2|\Delta/\varepsilon|^3)} & \text{при } 0 \leq |\Delta/\varepsilon| \leq 1/2, \\ \frac{1 + \cos \beta (1 - 6|\Delta/\varepsilon|^2 + 6|\Delta/\varepsilon|^3)}{1 + \cos \beta (2 - 6|\Delta/\varepsilon| + 6|\Delta/\varepsilon|^2 - 2|\Delta/\varepsilon|^3)} & \text{при } 1/2 \leq |\Delta/\varepsilon| \leq 1. \end{cases} \quad (11)$$

На рис. 4 представлены нормированные выходные характеристики, рассчитанные по формуле (11) для  $\beta = 0$  (1),  $\beta = \pi/2$  (2) и  $\beta = \pi$  (3). Из графиков следует важный для практики вывод, что при углах  $\beta$ , близких к  $\pi/2$ , коррелятор теряет чувствительность к изменению размера контролируемого изделия. Отсюда вытекает важное требование к коррелятору: установка голограммы в нем должна быть выполнена с высокой точностью и сохраняться в процессе его эксплуатации. Например, для условий, приведенных в предыдущем подразделе, при допустимом снижении крутизны  $S = (dP(\Delta)/P(\Delta = \varepsilon))/d|\Delta/\varepsilon|$  на 10% погрешность юстировки голограммы не должна превышать 3 мкм.

**Экспериментальная установка и результаты.** Экспериментальные испытания проводились в лазерном голографическом контрольном устройстве. Голографический фильтр записывался на специальной установке с транспаранта, структура которого показана на рис. 1, при  $\delta = \varepsilon/2$ . Параметры транспаранта были следующими:  $l = 6$  мм,  $A = 8$  мм,  $\delta = 25$  мкм,  $\varepsilon = 50$  мкм. Угол наклона опорного пучка выбирали  $\sim 20^\circ$ . Перемещение голограммы вдоль спектра осуществлялось с помощью микровинта. Величина перемещения определялась по углу поворота винта.

В качестве источника когерентного света использовался лазер ЛГ-79-1, в качестве фотоприемника — фотоэлектронный умножитель ФЭУ-55 с входной диафрагмой  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>.

Транспортировка изделий на измерительную позицию проводилась автоматически со скоростью 1 м/с. Транспортирующее устройство было загружено изделиями с равным интервалом, причем размеры изделий составляли арифметическую прогрессию с шагом 10 мкм.

На рис. 5 показаны осциллограммы сигналов при интегральном считывании центральной части корреляционного поля во время последовательного контроля одиннадцати изделий:  $a$  — при  $\beta = 0$ ,  $b$  — при  $\beta = \pi/2$ ,  $c$  — при  $\beta = \pi$ . В случае  $\beta = 0$  при  $\Delta/\varepsilon = 0,5$  расчетная крутизна преобра-

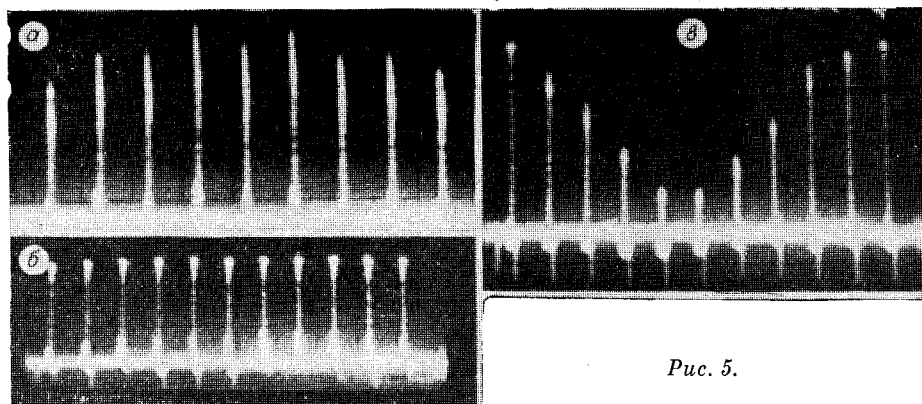


Рис. 5.

зования составила 0,75, а экспериментальная — 0,5. В случае  $\beta = \pi$  эти величины соответственно равны 1, 5 и 1. Рис. 5, б иллюстрирует эффект потери чувствительности коррелятором при  $\beta = \pi/2$ .

Для сравнения отметим, что в известном корреляторе [1], предназначенном для контроля малых отверстий (диаметр 0,5 мм), крутизна преобразования равнялась 2,5%/мкм, а погрешность контроля — 1,5% от размера. Для нашего коррелятора эти величины соответственно равны 2,0%/мкм и 0,12%.

Таким образом, результаты экспериментов подтверждают правильность выводов данной работы.

#### ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ выходной характеристики лазерного дифракционного коррелятора с несимметричным импульсным откликом показывает, что она имеет более высокую крутизну преобразования. Это позволяет повысить надежность контроля по сравнению с коррелятором, имеющим фильтр с симметричным откликом.

2. Фильтр с несимметричным откликом может быть получен теми же методами, что и фильтр с симметричным откликом.

3. Анализ влияния смещения голограммы на выходную характеристику коррелятора дает возможность количественно сформулировать требования к точности и стабильности ее установки в случаях симметричного и несимметричного импульсных откликов.

В заключение автор выражает признательность Р. М. Бычкову и Ю. В. Чугую за обсуждение работы и замечания, а также инженеру В. Г. Марченко за помощь в проведении экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Indebetouw G. Application of Optical Processing Technique to the Quality Control of Micromechanics.— Appl. Opt., 1977, vol. 16, N 7.
2. Астафьева Т. Б. и др. Применение методов когерентной оптики для контроля геометрических параметров изделий.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. [Тез. докл.]. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1979.
3. Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Оперативное формирование полей допусков при контроле формы изделий.— Автометрия, 1979, № 1.
4. Кривенков Б. Е., Чугуй Ю. В. Качественное оконтуривание двумерных теневых изображений.— Автометрия, 1979, № 1.
5. Левин В. Я. и др. Изготовление и исследование фазовых масок для устройств хранения и обработки информации.— ОМП, 1978, № 3.

Поступила в редакцию 16 июня 1980 г.