

7. Жогликов В. А., Кияшко Б. В. Многоканальный анализатор спектра. (Авт. свид-во № 530623) — БИ, 1976, № 36.
8. Жогликов В. А., Кияшко Б. В. Модулятор. (Авт. свид-во № 570003) — БИ, 1977, № 31.
9. Жогликов В. А., Кияшко Б. В. Многоканальный анализатор спектра. (Авт. свид-во № 589818) — БИ, 1978, № 3.

*Поступила в редакцию 8 января 1979 г.*

УДК 535.317.2 : 531.715.2

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

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ БИПОЛЯРНЫХ ФИЛЬТРОВ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ

**Постановка задачи.** В связи с возрастающими требованиями к производительности и точности систем бесконтактного контроля геометрических параметров изделий большой интерес представляют оптические системы идентификации размеров изделий [1—3]. Среди них можно выделить теневые [4—7], корреляционные [8—9] и спектральные [10—11] системы.

Принцип действия теневых систем основан на формировании изображения изделия и измерении его параметров или сравнении его с эталонным изображением.

В корреляционных системах, использующих когерентные источники света, контроль размеров осуществляется посредством обработки корреляционной функции — результата фильтрации спектра контролируемого изделия.

Основной недостаток указанных систем — отсутствие инвариантности выходных сигналов к смещениям контролируемого объекта. Это приводит к необходимости использования быстродействующих устройств (телевизионная техника, многоэлементные и сканирующие фотоприемники, дефлекторы изображений и т. п.), предъявляет высокие требования к точности позиционирования изделия, ограничивает точность и чувствительность контроля. Кроме того, корреляционные системы с голографическими фильтрами имеют низкий коэффициент использования светового потока и обладают высокой чувствительностью к вибрациям.

В спектральных системах в отличие от рассмотренных контроль параметров изделий осуществляется по их пространственным спектрам (дифракционным картинам Фраунгофера) [12]. Поскольку спектр мощности в известной степени инвариантен к смещению объекта вдоль и поперек оптической оси системы, то такие системы позволяют проводить контроль параметров в динамике. При этом получение требуемой информации о параметрах объекта достигается путем параллельного (последовательного) считывания спектра или путем модуляции этого спектра некоторым фильтром с последующим интегрированием результирующего светового распределения.

Так как выходная характеристика системы во многом определяется передаточной функцией фильтра, то возникает задача ее нахождения (синтеза). В известных устройствах [10, 11] эта функция выбирается из эвристических соображений, что не всегда позволяет создавать системы с высокой чувствительностью, приемлемым коэффициентом использования светового потока и большим диапазоном измеряемых размеров.



В настоящей работе исследован спектральный метод контроля размеров изделий; решена задача синтеза фильтров, обеспечивающих чувствительность и энергетические потери в сравнении с известными корреляционными системами; приводятся соображения по реализации систем, в том числе систем с оперативным формированием требуемых передаточных функций. Результаты анализа подтверждены расчетами на ЭВМ и экспериментами.

**Передаточная функция фильтра.** Задачу контроля изделий сложной формы можно решить путем контроля (последовательного или параллельного) его фрагментов. Поскольку типичным фрагментом теневого изображения изделия является щель (экран) шириной  $B$ , то ограничимся рассмотрением только этого простейшего случая. Определим передаточную функцию фильтра  $H_0(u)$ , обеспечивающую заданную зависимость выходного сигнала от размера щели.

Пусть изображение контролируемого объекта, помещаемого на входе оптической системы в плоскости  $P_1$  (рис. 1), описывается функцией

$$f(x) = \text{rect}(x/B),$$

где

$$\text{rect}(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } |z| \leq 1/2; \\ 0 & \text{при } |z| > 1/2. \end{cases}$$

Тогда распределение интенсивности света в спектральной плоскости  $P_2$  будет иметь вид

$$|F(u)|^2 = |\mathcal{F}\{f(x)\}|^2 = 4\sin^2(Bu/2)/u^2. \quad (1)$$

Здесь  $\mathcal{F}\{\cdot\}$  — оператор прямого преобразования Фурье.

Поместим теперь в плоскость  $P_2$  транспарант — фильтр с пропусканием по интенсивности:

$$H_0(u) = u^2 H(u), \quad (2)$$

где  $H(u)$  — неизвестная функция, которую требуется определить.

Проинтегрируем весь световой поток в плоскости  $P_2$ , пропущенный фильтром (2). В результате получим сигнал, пропорциональный

$$g(B) = \int_{-\infty}^{\infty} |F(u)|^2 H_0(u) du. \quad (3)$$

Значение сигнала (3) зависит от размера  $B$ , поэтому функцию  $g(B)$  будем называть выходной характеристикой системы, или выходным сигналом.

Поскольку на  $g(B)$  существенное влияние оказывает функция пропускания фильтра, необходимо указать способ получения фильтра (2), обеспечивающего выходной сигнал (3), наиболее адекватный решаемой задаче контроля.

Воспользовавшись теоремой о свертке, преобразуем (3) к виду

$$g(B) = \int_{-\infty}^{\infty} 4 \sin^2\left(\frac{Bu}{2}\right) H(u) du = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}_B(x) h(x) dx,$$

где

$$\tilde{f}_B(x) = \mathcal{F}^{-1}\{4\sin^2(Bu/2)\} = 2\delta(x) - \delta(x-B) - \delta(x+B); \quad (4)$$

$$h(x) = \mathcal{F}^{-1}\{H(u)\}. \quad (5)$$

Здесь  $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$  обозначает оператор обратного преобразования Фурье.

С учетом (4) окончательно получим

$$g(B)/2\pi = 2h(0) - h(B) - h(-B). \quad (6)$$

Рассмотрим частный случай, когда  $h(0) = 0$ ,  $h(B) = h(-B)$ . Тогда

$$g(B) = -4\pi h(B). \quad (7)$$

Выражение (7) означает, что выходной сигнал с точностью до коэффициента совпадает с откликом фильтра  $h(B)$ , по которому нетрудно определить передаточную функцию  $H_0(u)$ .

В общем случае также удастся несколько упростить соотношение (6). Для этого предположим, что функция  $H(u)$  (или  $H_0(u)$ ) действительная, т. е.  $H(u) = H^*(u)$ . При этом получаем

$$h(x) = h^*(-x); \quad (8)$$

$$g^*(B) = g(B) = g(-B).$$

Исходя из свойств (8), запишем (6) следующим образом:

$$g(B)/4\pi = h(0) - h(B), \quad (9)$$

где  $h(B)$  представлено вещественной частью.

Из (8) и (9) следует, что по требуемому выходному сигналу  $g(B)$  легко определяется функция  $h(B)$  с точностью до произвольной нечетной мнимой части, не влияющей на вид выходного сигнала. Это свойство может быть использовано для упрощения вида передаточной функции фильтра  $H(u)$  (или  $H_0(u) = u^2 H(u)$ ) при заданной выходной характеристике  $g(B)$ . Определим далее из (9) связь между передаточной функцией фильтра  $H(u)$  и преобразованием Фурье  $G(u)$  выходного сигнала  $g(B)$ , продолженного для отрицательных значений  $B$  четным образом:

$$G(u) = 8\pi^2 h(0)\delta(u) - 4\pi H(u). \quad (10)$$

Функция пропускания фильтра  $H_0(u)$  при заданном выходном сигнале  $g(B)$  или при его преобразовании Фурье может быть получена из выражений (2) и (10):

$$H_0(u) = -\frac{1}{4\pi} u^2 G(u) = -\frac{u^2}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(B) e^{-juB} dB. \quad (11)$$

Поскольку в общем случае  $H_0(u)$  является биполярной функцией, она может быть реализована в двухканальной оптической системе путем задания на разных транспарантах ее положительной и отрицательной составляющих с последующим вычитанием соответствующих сигналов на электронном уровне.

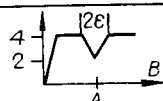
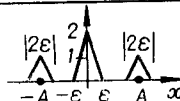
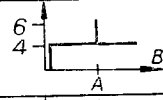
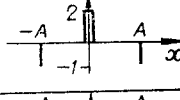
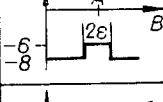
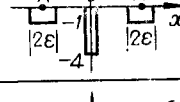
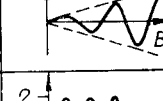
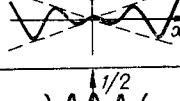
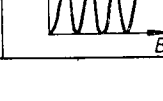
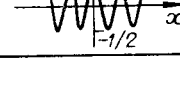
Покажем теперь на примере, как получить функцию пропускания фильтра по известной выходной характеристике.

Пусть решается задача допускового контроля, т. е. требуется определить, находится ли размер  $B$  контролируемого объекта в допуске. При этом если  $A$  — эталонный размер, а  $\varepsilon$  — величина допуска, то выходной сигнал должен быть следующего вида:

$$I(B) = \text{rect}[(B-A)/2\varepsilon]. \quad (12)$$

Для получения функции  $g(B)$  доопределим (12) для отрицательных значений  $B$  четным образом, тогда функцию  $g(B)$  можно записать в

№ фильтра	Выходной сигнал $g(B)$	Импульсный отклик $2\pi h(x)$	Передающая функция фильтра $2\pi H_0(u)$	Выходной световой поток $K$
1			$-4u \sin \epsilon u \cos Au$	$\frac{1}{2\pi} \frac{\lambda F}{D^2} \cdot 2 \cdot 10^{-5}$
2			$8u \sin \epsilon u \sin^2 \frac{Au}{2}$	$\frac{3}{4\pi} \frac{\lambda F}{D^2} \cdot 3 \cdot 10^{-5}$
3			$2u \sin \epsilon u [2 \cos Au + 1]$	$\frac{1}{3\pi} \frac{\lambda F}{D^2} \cdot 1,3 \cdot 10^{-5}$
4			$8u \sin \epsilon u \cos^2 \frac{Au}{2}$	$\frac{1}{4\pi} \frac{\lambda F}{D^2} \cdot 10^{-5}$
5			$8u \sin^2 \frac{\epsilon u}{2} \sin Au$	$\frac{1}{4\pi} \frac{\lambda F}{D^2} \cdot 10^{-5}$
6			$2u \sin(A+\epsilon)u - \frac{2}{\epsilon} \sin \epsilon u \sin Au$	$\frac{1}{\pi + \lambda F / D \epsilon} \frac{\lambda F}{D^2} \cdot 3,7 \cdot 10^{-5}$
7				
8				
9			$\frac{2}{\epsilon} \sin \epsilon u \sin Au$	$\frac{\epsilon}{D} \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}$
10			$-4u [\sin \epsilon_1 u + \sin \epsilon_2 u] \cos Au$	$\frac{1}{4\pi} \frac{\lambda F}{D^2} \cdot 10^{-5}$
11				
12				
13			$\frac{16}{\epsilon} \sin^2 \frac{\epsilon u}{2} \sin^2 \frac{Au}{2}$	$\frac{3}{8} \frac{\epsilon}{D} \cdot 4,7 \cdot 10^{-4}$
14			$\left(\frac{4}{\epsilon}\right)^3 \frac{\sin^4 \frac{\epsilon u}{2}}{u^2} \sin^2 \frac{Au}{2}$	$0,476 \frac{\epsilon}{D} \cdot 6 \cdot 10^{-4}$
15			$16u \sin^2 \frac{\epsilon u}{2} \cos^2 \left(\frac{Au}{2} - \frac{\pi}{4}\right)$	$\frac{1}{8\pi} \frac{\lambda F}{D^2} \cdot 0,5 \cdot 10^{-5}$

16			$\frac{16}{\epsilon} \sin^2 \frac{\epsilon u}{2} \cos^2 \frac{Au}{2}$	$\frac{1}{8} \frac{\epsilon}{D}$ $1,6 \cdot 10^{-4}$
17			$8\epsilon u^2 \sin^2 \frac{Au}{2}$	$\frac{3}{2\pi^2} \frac{\lambda F}{D^2}$ $1,8 \cdot 10^{-5}$
18			$-4\epsilon u^2 \left( \frac{\sin \epsilon u}{\epsilon u} \cos Au - 1 \right)$	$\frac{1}{\pi^2} \left( 1 - \frac{\lambda F}{4D\epsilon} \right) \frac{\lambda F}{D^2}$ $1,17 \cdot 10^{-5}$
19			$\pi u^2 [\delta'(u-u_1) - \delta'(u+u_1)]$	$\frac{4(\Delta x)^2}{\pi^2 A_1^3} \frac{\lambda F}{D}$ $1,9 \cdot 10^{-5}$
20			$\frac{\pi}{2} u^2 [\delta(u-2u_1) + \delta(u+2u_1)]$	$\frac{\Delta x}{2\pi^2 A_1^2} \frac{\lambda F}{D}$ $2,4 \cdot 10^{-5}$

виде

$$g(B) = \text{rect} \lfloor (B-A)/2\epsilon \rfloor + \text{rect} \lfloor (B+A)/2\epsilon \rfloor. \quad (13)$$

Выполняя преобразование Фурье выражения (13), получим, согласно (11), функцию пропускания фильтра  $H_0(u)$ , обеспечивающую требуемый выходной сигнал (12):

$$H_0(u) = -(u/\pi) \sin \epsilon u \cos Au. \quad (14)$$

Из (2), (5), (14) определим импульсный отклик фильтра

$$h(x) = -(1/4\pi) \{ \text{rect} \lfloor (x-A)/2\epsilon \rfloor + \text{rect} \lfloor (x+A)/2\epsilon \rfloor \},$$

удовлетворяющий соотношению (9).

**Возможности метода.** В таблице приведены примеры импульсных откликов и передаточных функций фильтров (по интенсивности), обеспечивающих получение различных выходных сигналов в зависимости от размера  $B$  контролируемого объекта.

При допусковом контроле, когда для контролируемого изделия существуют состояния «годен» и «негоден», желательно использовать фильтры, обеспечивающие резкое изменение уровня выходного сигнала (высокую чувствительность) в граничных точках поля допуска и постоянный уровень сигнала для других размеров. Этому требованию удовлетворяют, например, фильтры 1—4, 18, которые отличаются друг от друга различными диапазонами изменения сигналов для годных и бракованных изделий, а также уровнями этих сигналов. Если же при допусковом контроле необходимо определять знак отклонения размера  $B$  от номинала  $A$  (например, в системах активного контроля), то для этого могут быть использованы фильтры 5, 15, которые обеспечивают инверсию знака для годных изделий в зависимости от выполнения условий  $B > A$  или  $B < A$ . При необходимости определения истинного размера изделия желательно применять фильтры, дающие линейную зависимость выходного сигнала от размера годного изделия, что обеспечивается, например, фильтрами 6, 9. Для этой же цели используется фильтр 17, однако в данном случае необходимо оперативное изменение параметра  $A$  фильтра в процессе контроля. При неизменности этого параметра фильтр позволяет определить изделия с идентичными размерами  $A$ .

Спектральный метод допускает реализацию также более сложных видов контроля. Например, с помощью фильтра 7 можно определить абсолютную величину отклонения  $|B-A|$  размера от эталона и знак

этого отклонения, а с помощью фильтра 8 — осуществить допусковый контроль с большей достоверностью, чем при применении фильтра 6, и измерение размера годного изделия. Для сортировки однотипных изделий по допускам пригоден фильтр 10, а для сортировки изделий с различными эталонными размерами  $A_i$  и соответствующими допусками  $\epsilon_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) можно воспользоваться фильтром 11. Для аналогичных целей применим также фильтр 12.

Фильтры 13, 14, 16 имеют униполярную передаточную функцию  $H_0(u)$ , что существенно облегчает их реализацию. По соответствующим им выходным сигналам можно проводить допусковый контроль и определять абсолютную величину отклонения контролируемого размера от эталонного.

Остановимся теперь на фильтрах 19, 20. Для первого из них выходной сигнал и импульсный отклик изменяются по синусоидальному закону, при этом амплитуда колебаний сигнала возрастает с увеличением контролируемого размера:

$$g(B) = 2B \sin Bu_1, \quad h(x) = -(x/2\pi) \sin xu_1,$$

где  $u_1 = 2\pi A_1/\lambda F$  — параметр фильтра, определяющий частоту колебаний. Фильтр представляет собой систему четырех точечных диафрагм, расположенных при  $u = \pm u_1$ .

Измеряемый размер находится по величине и знаку сигнала. Такой фильтр может быть использован при контроле изменяющихся во времени размеров и для измерения перемещений. При этом результат измерения выражается количеством периодов сигнала за время измерения.

Аналогичными свойствами обладает фильтр 20. В отличие от 19 максимальная амплитуда сигнала не меняется при изменении контролируемого размера:

$$g(B) = 2 \sin^2 Bu_1, \quad h(x) = (1/4\pi) \cos 2u_1 x.$$

Фильтр состоит из двух (или одной, если учесть симметрию спектра мощности) точечных диафрагм, расположенных в частотной плоскости при  $u = \pm 2u_1$ . Частота сигнала пропорциональна удалению диафрагм от центра частотной плоскости. Фильтр в отличие от 19 является униполярным.

Приведенная таблица иллюстрирует лишь некоторые возможности рассматриваемого метода контроля и при необходимости может быть продолжена.

**Чувствительность метода.** Чувствительность метода  $S$  будем характеризовать коэффициентом пропорциональности между относительным изменением выходного сигнала и изменением размера контролируемого объекта:

$$|\Delta g(B)/\max g(B)| = S|\Delta B|. \quad (15)$$

Из (15) следует, что

$$S = |g'(B)/\max g(B)|, \quad (16)$$

а порог чувствительности определяется выражением

$$\Delta B = (LS)^{-1}, \quad (17)$$

где  $L = \max g(B)/\Delta g(B)$  — динамический диапазон регистрирующего устройства.

Найдем значение чувствительности для наиболее характерных сигналов, приведенных в таблице.

Для фильтра 1, например,

$$S_1 = \delta(B-A-\epsilon) + \delta(B-A+\epsilon), \quad (18)$$

т. е.  $S_1$  представляет собой идеальную характеристику для допускового контроля, так как чувствительность обращается в бесконечность в гра-

ничных точках  $A \pm \epsilon$ , когда необходимо принимать решение о том, годен объект или нет. Выражение для чувствительности (18) получено в предположении бесконечных размеров фильтра и апертуры фурье-объектива. Ограниченность фильтра приводит к более плавному изменению чувствительности.

Действительно, пусть фильтр имеет размер  $D$ :

$$\tilde{H}_0(u) = H_0(u) \operatorname{rect}(u/2u_0),$$

где  $u_0 = \pi D/\lambda F$ . Тогда, согласно (11),  $\tilde{G}(u) = -(4\pi\tilde{H}_0(u))/u^2$  и выходной сигнал  $\tilde{g}(B)$ , полученный при ограниченном фильтре, может быть записан в виде

$$\tilde{g}(B) = \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{G}(u)\} = g(B) \otimes \frac{1}{\pi B} \sin(u_0 B) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2}{\xi} \sin(u_0 \xi) g(B - \xi) d\xi. \quad (19)$$

Вычислим производную сигнала (19) при условии, что

$$g'(B) = 2\delta(B - A + \epsilon) - 2\delta(B - A - \epsilon).$$

Тогда из (19) получим

$$\tilde{g}'(B) = (2/\pi)\{[1/(B - A + \epsilon)] \sin u_0(B - A + \epsilon) - [1/(B - A - \epsilon)] \sin u_0(B - A - \epsilon)\}.$$

Если  $D \gg \epsilon$ , то с хорошей степенью точности можно положить  $\max \tilde{g}(B) = \max g(B) = 2$  и получить для оценки чувствительности следующее выражение:

$$\tilde{S}_1(B) = (1/\pi) |\sin[u_0(B - A + \epsilon)]/(B - A + \epsilon) - \sin[u_0(B - A - \epsilon)]/(B - A - \epsilon)|. \quad (20)$$

Функция чувствительности имеет вид двух узких пиков (рис. 2) с центрами в точках  $B = A \pm \epsilon$ , с амплитудой  $S_{\max} = D/\lambda F$  и шириной  $\lambda F/D$ , определяемыми размерами фильтра. Для реальных параметров оптических систем ширина этих пиков, а следовательно, и погрешность контроля составляют единицы микрометров. Учет влияния возникающей при этом систематической ошибки приведет к существенному снижению погрешностей контроля (до долей микрометров). Например, оценим порог чувствительности в точках максимального значения  $\tilde{S}_1$  для следующих параметров:  $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-3}$ ,  $F = 300$ ,  $D = 50$  мм. При  $L = 10^2$  из (17) находим  $\Delta B \sim 0,04$  мкм.

Выражения (18) и (20) характеризуют чувствительность в точках скачкообразного изменения сигнала и для других фильтров. На участках с линейным изменением сигнала, как это следует из (16), чувствительность постоянна и зависит от величины допуска. Это необходимо учитывать при выборе параметров фильтра.

**Коэффициент использования светового потока.** Коэффициент использования световой энергии определим как отношение светового потока на выходе оптической системы  $P_1$  к потоку на ее входе  $P_0$ :

$$K = P_1/P_0. \quad (21)$$

Оценим потери света при использовании, например, фильтра 1. Для этого предположим, что оптическая система имеет квадратную апертуру размером  $D \times D$ , контролируемый объект с размерами  $B \times D$  расположен в ее центре и ос-

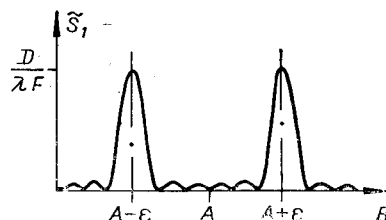


Рис. 2.

вещается световой волной с единичной амплитудой. Спектр мощности при этих условиях

$$\Phi(u, v) = (4/\lambda Fuv)^2 \sin^2(Bu/2) \sin^2(Dv/2).$$

Если функция пропускания фильтра нормирована на 1, то

$$H_0(u, v) = -(\lambda F/\pi D)u \sin \varepsilon u \cos Au \operatorname{rect}(\xi/D) \operatorname{rect}(\eta/\Delta),$$

где  $u = 2\pi\xi/\lambda F$ ,  $v = 2\pi\eta/\lambda F$ , а  $\Delta$  — размер фильтра по координате, перпендикулярной оси частот  $u$ . Прошедший через фильтр световой поток

$$P_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(u, v) H_0(u, v) d\xi d\eta. \quad (22)$$

При условии, что  $\Delta \gg \lambda F/D$ , в (22) можно провести интегрирование по  $\eta$  в бесконечных пределах. В результате получим

$$P_1 = 4D \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{B}{2} u}{u^2} H_0(u) \operatorname{rect}\left(\frac{u}{2u_0}\right) du \right\} \quad (23)$$

или, воспользовавшись теоремой о свертке, —

$$P_1 = 4D \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{\sin^2 \frac{B}{2} u}{u^2} H_0(u) \right\} \frac{\sin u_0 x}{\pi x} dx. \quad (24)$$

Поскольку  $\lim_{u_0 \rightarrow \infty} \sin u_0 x / \pi x = \delta(x)$ , то для  $\varepsilon \gg \lambda F/D$  из (24) можно получить еще одно выражение для  $P_1$ :

$$P_1 = 4D \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{\sin^2 \frac{B}{2} u}{u^2} H_0(u) \right\} \delta(x) dx. \quad (25)$$

Из (24), (25) легко оценить максимальный уровень сигнала

$$P_1 = \lambda F/2\pi. \quad (26)$$

Так как  $P_0 = D^2$ , то из (26) согласно (21) определим  $K_1 = \lambda F/2\pi D^2$ . Для  $\lambda = 0,63$  мкм,  $F = 300$  мм,  $D = 40$  мм коэффициент  $K_1$  составляет величину  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ . Такие потери являются обычными при использовании оконтурирующих фильтров с нулевым пропусканием в центре. Действительно, пусть  $H_0(u)$  представляет собой оконтурирующий фильтр  $H_0(u) = (u/u_0)^4 \operatorname{rect}(u/2u_0)$ . Тогда из (23) следует, что  $P_1 = 2\lambda F/3\pi^2 D^2$ . Световые потери при этом определяются коэффициентом  $K = 2\lambda F/3\pi^2 D^2$ , который для выбранных параметров оптической системы составляет величину  $K = 7,9 \cdot 10^{-6}$ .

Аналогичным образом можно определить коэффициент потерь для других фильтров, например для фильтра 13  $K_{13} = 0,375\varepsilon/D$ . Если  $\varepsilon = 0,05$  мм, то  $K_{13} \sim 4,7 \cdot 10^{-4}$ .

В таблице приведены формулы для оценки световых потерь оптических систем с различными фильтрами.

Что касается фильтров 19,20, то на них следует остановиться отдельно. Эти фильтры должны быть выполнены в виде узких щелей шириной  $\Delta x = \lambda F \Delta u / 2\pi \ll \lambda F/B$ . Для фильтра 20, например,

$$H_0(u) = (u/2u_1)^2 \{ \operatorname{rect}[(u - 2u_1)/\Delta u] + \operatorname{rect}[(u + 2u_1)/\Delta u] \}.$$

Интегрируя согласно (23), получим

$$P_{20} = \frac{1}{2\pi^2} \frac{\lambda F D}{A_1^2} \Delta x, \quad K_{20} = \frac{\lambda F}{D} \frac{\Delta x}{2\pi^2 A_1^2},$$

где  $A_1 = \lambda F u_1 / 2\pi$ .



Для фильтра 19

$$P_{19} = \frac{2\lambda FD\Delta x}{\pi^2} \left( \frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{(A_1 + \Delta x)^2} \right) = 8P_{20} \frac{\Delta x}{A_1}.$$

Если  $A_1 = 1$ ,  $\Delta x = 0,1$  мм, то  $K_{19} = 1,9 \cdot 10^{-5}$ ,  $K_{20} = 2,4 \cdot 10^{-5}$ .

При выборе того или иного фильтра следует учитывать характер решаемой задачи, требуемый выходной сигнал, чувствительность, энергетические потери, а также возможности его простой реализации.

**Сравнение с корреляционным методом контроля.** Спектральный метод эквивалентен корреляционному при условии интегрирования светового потока во всей корреляционной плоскости, но обладает большей гибкостью: позволяет получить практически любой желаемый выходной сигнал. Высокая крутизна изменения выходного сигнала достижима и в корреляционном методе за счет применения точечных считывающих диафрагм. Однако вследствие больших потерь света на голографическом фильтре и ограниченности размера считывающей диафрагмы в таких системах необходимо применять мощные лазеры, что не всегда представляется возможным. Поэтому в корреляционной плоскости приходится интегрировать весь световой поток или его значительную часть, вследствие чего происходит снижение чувствительности метода.

Рассмотрим, например, два голографических фильтра, применяемых в корреляционном способе допускового контроля [8], с импульсными откликами и частотными характеристиками

$$h_1(x) = \delta(x - A/2 - \varepsilon) + \delta(x + A/2 + \varepsilon) - \delta(x - A/2 + \varepsilon) - \delta(x + A/2 - \varepsilon), \quad (27)$$

$$H_1(u) = -4 \sin \varepsilon u \sin (Au/2), \quad (28)$$

$$h_2(x) = \text{rect} \left( \frac{x - A/2 - \varepsilon/2}{\varepsilon} \right) + \text{rect} \left( \frac{x + A/2 + \varepsilon/2}{\varepsilon} \right) - \text{rect} \left( \frac{x - A/2 + \varepsilon/2}{\varepsilon} \right) - \text{rect} \left( \frac{x + A/2 - \varepsilon/2}{\varepsilon} \right), \quad (29)$$

$$H_2(u) = - (8/u) \sin^2(\varepsilon u/2) \sin(Au/2). \quad (30)$$

На рис. 3, 4 приведены корреляционные функции  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  откликов (27), (29) с изображением контролируемого изделия, причем  $a$  соответствует случаю, когда размер объекта не в допуске, а  $b$  — случаю совпадения этого размера с эталонным.

Из рисунков видно, что информация о контролируемом размере  $B$  содержится в расстоянии между корреляционными импульсами. Зависимость выходного сигнала от контролируемого размера может быть получена, например, путем считывания светового потока, соответствующего двум внутренним корреляционным импульсам. Боковые импульсы в этом случае могут быть использованы для нормировки и синхронизации работы устройства.

Если ввести параметр  $\delta$ , характеризующий величину отклонения размера  $B$  контролируемого объекта от номинального  $A$ :  $\delta = |B - A|$ , то, воспользовавшись рис. 3, 4, получим следующие выходные сигналы:

$$I_1 = \int_{-\frac{|A-B|}{2} - \varepsilon}^{\frac{|A-B|}{2} + \varepsilon} |f_1(x)|^2 dx \int_{-D/2}^{D/2} dy = \begin{cases} 1 - \delta/4\varepsilon & \text{при } \delta \leq 2\varepsilon; \\ 1/2 & \text{при } \delta > 2\varepsilon; \end{cases} \quad (31)$$

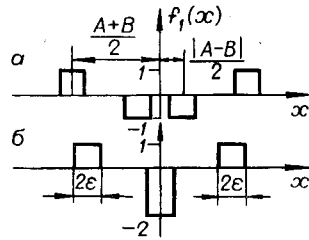


Рис. 3.

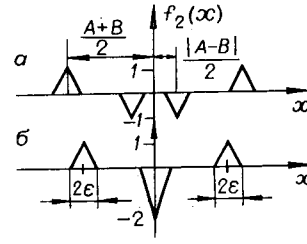


Рис. 4.

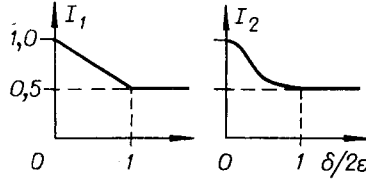


Рис. 5.

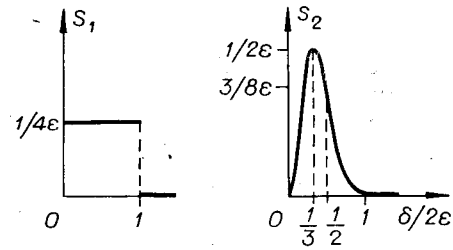


Рис. 6.

$$I = \begin{cases} 1 - \frac{3}{4} \left(\frac{\delta}{\varepsilon}\right)^2 + \frac{3}{8} \left(\frac{\delta}{\varepsilon}\right)^3 & \text{при } \delta \leq \varepsilon; \\ \frac{1}{2} + \left(1 - \frac{\delta}{2\varepsilon}\right)^3 & \text{при } \varepsilon \leq \delta \leq 2\varepsilon; \\ \frac{1}{2} & \text{при } \delta \geq 2\varepsilon. \end{cases} \quad (32)$$

Графики зависимости  $I_1$  и  $I_2$  от параметра  $\delta/2\varepsilon$  приведены на рис. 5.

Отметим, что сигналы (31), (32) эквивалентны сигналам для фильтров 13, 14 (см. таблицу). Отличие в постоянной составляющей вызвано тем, что выражения (31), (32) получены путем интегрирования световых потоков не по всей корреляционной плоскости.

В соответствии с (16) определим чувствительность рассматриваемых голографических методов:

$$S_1 = \begin{cases} 1/4\varepsilon & \text{при } \delta \leq 2\varepsilon; \\ 0 & \text{при } \delta > 2\varepsilon; \end{cases} \quad (33)$$

$$S_2 = \begin{cases} \frac{3\delta}{4\varepsilon^2} \left(2 - \frac{3\delta}{2\varepsilon}\right) & \text{при } \delta \leq \varepsilon; \\ \frac{3}{2\varepsilon} \left(1 - \frac{\delta}{2\varepsilon}\right)^2 & \text{при } \varepsilon < \delta \leq 2\varepsilon; \\ 0 & \text{при } \delta > 2\varepsilon. \end{cases} \quad (34)$$

Вид функций (33), (34) показан на рис. 6. Из приведенных соотношений следует, что  $S_1$  и  $S_2$  зависят от  $\varepsilon$  и  $\delta$ . Максимум  $S_2$  равен  $1/2\varepsilon$  и достигается при  $\delta = 2\varepsilon/3$ . Это соответствует уровню  $7/9$  сигнала (32). Таким образом, выбирая рабочую точку, обеспечивающую максимальную чувствительность, следует учитывать систематическую поправку к величине поля допуска. В соответствии с изложенным для допускового контроля более предпочтительным представляется использование спектрального метода с фильтром 1, поскольку в этом случае выходной сигнал и чувствительность определяются параметрами оптической системы и не зависят от  $\varepsilon$  и  $\delta$ , а выбор рабочей точки не приводит к изменению величины допуска.

Кроме того, чувствительность спектрального метода оказывается существенно выше.

Оценим потери света при использовании корреляционного метода контроля с фильтрами (28), (30). Нормированные функции амплитудного пропускания этих фильтров можно представить в виде

$$H_1(u, v) = \eta \sin \varepsilon u \sin(Au/2) \text{rect}(u/2u_0) \text{rect}(v/2v_0), \quad (35)$$

$$H_2(u, v) = (2,76\eta/\varepsilon u) \sin^2(\varepsilon u/2) \sin(Au/2) \text{rect}(u/2u_0) \text{rect}(v/2v_0), \quad (36)$$

где  $u_0 = v_0 = \pi D/\lambda F$ ,  $\eta$  — дифракционная эффективность фильтра. Поскольку амплитудное распределение света в плоскости фильтра имеет вид

$$\Phi_1(u, v) = (4/\lambda Fuv) \sin(Bu/2) \sin(Dv/2), \quad (37)$$

корреляционные функции можно записать следующим образом:

$$g_i(x, y) = \frac{\lambda F}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_i(u, v) \Phi_1(u, v) e^{i(ux+vy)} dudv, \quad i = 1, 2. \quad (38)$$

Из (38), используя (35)—(37) и учитывая, что  $\lim_{\alpha \rightarrow \infty} \frac{\sin \alpha x}{\pi x} = \delta(x)$ , трудно получить корреляционные функции при номинальном размере контролируемого объекта  $B = A$ :

$$g_1(x, y) = 0,5\eta \text{rect}(y/D) \{ \text{rect}(x/2\varepsilon) - 0,5 \text{rect}[(x-A)/2\varepsilon] - 0,5 \text{rect}[(x+A)/2\varepsilon] \}, \quad (39)$$

$$g_2(x, y) = 0,35\eta \text{rect}(y/D) \{ \Lambda(x/2\varepsilon) - 0,5\Lambda((x-A)/2\varepsilon) - 0,5\Lambda((x+A)/2\varepsilon) \}, \quad (40)$$

где

$$\Lambda\left(\frac{x}{2\varepsilon}\right) = \begin{cases} 1 - \frac{|x|}{\varepsilon} & \text{при } |x| \leq \varepsilon; \\ 0 & \text{при } |x| > \varepsilon. \end{cases}$$

Интегрируя световой поток в корреляционной плоскости области  $|x| \leq \varepsilon$ , из (39), (40) получим

$$P_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} |g_1(x, y)|^2 dx \right\} dy = \eta^2 \frac{\varepsilon D}{2}, \quad (41)$$

$$P_2 = 0,079\eta^2 \varepsilon D. \quad (42)$$

Коэффициент использования световой энергии определяется тогда из (41), (42) согласно (21):

$$K_{01} = 0,5\eta^2 \varepsilon / D, \quad (43)$$

$$K_{02} = 0,079\eta^2 \varepsilon / D. \quad (44)$$

Пусть  $\eta^2 = 5 \cdot 10^{-2}$ ,  $\varepsilon = 0,05$  мм,  $D = 40$  мм. Тогда из (43), (44) находим  $K_{01} \sim 3 \cdot 10^{-5}$ ,  $K_{02} \sim 5 \cdot 10^{-6}$ . Заметим, что при спектральном методе контроля для аналогичного выходного сигнала  $K_{14} \sim 6 \cdot 10^{-4}$ .

Из сравнения спектрального метода контроля с корреляционным следует, что первый из них имеет, как правило, меньшие световые потери и обеспечивает существенно большую чувствительность.

**Способы реализации фильтров.** Фильтры — транспаранты с плотностью, изменяющейся в соответствии с положительной и отрицательной частями функции  $H_0(u)$ , — могут быть получены путем оптической записи (с помощью фотопостроителей), напыления, травления и т. п. Фазовые искажения фильтров оказываются несущественными.

Если размер контролируемого объекта по координате  $y$  значительно больше его размера по координате  $x$ , т. е.  $D \gg B$ , то фильтры могут быть

выполнены в виде транспарантов с круговой симметрией. Поскольку в этом случае спектр мощности

$$|F(u, v)|^2 = |F(u)|^2 \delta(v), \quad (45)$$

такие фильтры обеспечивают инвариантность выходной характеристики системы к ориентации объекта.

При построении полутонных транспарантов приходится учитывать нелинейные свойства регистрирующей среды. Избежать этого можно при использовании фильтров в виде бинарных силуэтных транспарантов [13]:

$$T(u, v) = \text{rect}[v/\alpha H_0(u)] \text{rect}(u/D).$$

При этом объективы, формирующие спектр контролируемого объекта, должны включать в себя анаморфотные элементы, обеспечивающие равномерное освещение фильтра вдоль координаты  $v$  в области, определяемой из условия  $T(u, v) = 1$ . Силуэтные фильтры при выполнении условия (45) также обеспечивают инвариантность выходного сигнала к ориентации объекта. Они выполняются в полярных координатах  $(\varphi, \rho)$  таким образом, что угловой размер прозрачной области транспаранта определяется из выражения  $\varphi = H_0(\rho)$ . Интегрирование световых потоков осуществляется в процессе вращения фильтра или спектра контролируемого объекта.

Поскольку получение фильтров связано с определенными сложностями, желательно указать способ изменения их параметров простыми средствами. Это может быть достигнуто путем мультипликации изображений. Если, например, в качестве мультипликатора изображения используется косинусоидальная решетка, размещаемая в плоскости фильтра  $H_0(u)$ , то для фильтра 1 таблицы получаем

$$\tilde{H}_0(u) = H_0(u) \cos^2(A_0 u/2), \quad (46)$$

где  $A_0$  определяет период решетки. Из (46) следует, что  $\tilde{H}_0(u)$  представляет собой сумму передаточных функций  $H_0(u)$  при значениях эталонного размера  $A$ ,  $A + A_0$ ,  $A - A_0$ :

$$\tilde{H}_0(u) = H_0(u)|_A + 0,5 \{H_0(u)|_{A+A_0} + H_0(u)|_{A-A_0}\}.$$

Таким образом, для изменения эталонного размера достаточно дополнить основной фильтр  $H_0(u)$  униполярным в виде решетки с определенным периодом. Искажение уровня выходного сигнала при этом может быть легко учтено. Аналогичным образом варьируется и параметр  $\varepsilon$ . Заметим, что оперативное изменение периода решеток достигается при использовании муарового эффекта совмещенных решеток.

Что касается фильтров 19, 20, то они допускают смену своих параметров при изменении положения диафрагм в частотной плоскости оптической системы. При этом фильтр 19 может быть реализован колебательными смещениями двух диафрагм во времени с последующим вычитанием полученных сигналов. Четность спектра мощности позволяет выполнить такой фильтр в виде одной колеблющейся точечной диафрагмы. При этом измеряемые параметры могут быть определены не только по интенсивности сигнала, но и по количеству его периодов, полученных при изменении размера объекта или перемещении считывающих диафрагм в заданных пределах, т. е. при сканировании спектра [1].

Сканирование спектра возможно и более сложными фильтрами.

Рассмотрим, например, фильтр 17 с функцией пропускания

$$H_0(u) = u^2 \sin^2(Au/2)$$

и предположим, что он выполнен в виде двух транспарантов  $H_0(u) = T_1(u)T_2(u)$ :

$$T_1(u) = u^2, \quad T_2(u) = \sin^2(Au/2).$$

Пусть транспарант  $T_2(u)$  смещается в процессе контроля вдоль оси  $u$ ,

тогда его можно представить в виде

$$T_2(u) = \sin^2(Au/2 - \varphi(t)), \quad (47)$$

где функция  $\varphi(t)$  описывает движение фильтра. Выходной сигнал для такого фильтра является функцией времени и определяется выражением

$$g(B, t) = \cos^2 \varphi(t) \int_{-\infty}^{\infty} \sin^2 \frac{Bu}{2} \sin^2 \frac{Au}{2} du + \sin^2 \varphi t \int_{-\infty}^{\infty} \sin^2 \frac{Bu}{2} \cos^2 \frac{Au}{2} du. \quad (48)$$

Из (48) нетрудно определить

$$g(B, t) = \begin{cases} \text{const} & \text{при } A \neq B; \\ \text{const} \left(1 + \frac{1}{2} \cos 2\varphi(t)\right) & \text{при } A = B. \end{cases} \quad (49)$$

Регистрация переменной составляющей (49) в соответствии с функцией  $\varphi(t)$  обеспечивает получение сигнала, эквивалентного (с точностью до постоянной составляющей) сигналу, приведенному в таблице для фильтра 17. Аналогичные результаты имеют место и для ряда других фильтров таблицы или отдельных их составляющих. Это в первую очередь относится к фильтрам 13—17, а также 2, 4, 5 и 9 (при  $\epsilon = A$ ).

Учитывая возможность использования фильтра (47), можно предположить его реализацию с помощью акустооптического модулятора света, который позволяет сформировать распределение интенсивности в плоскости фильтра

$$\sin^2(Au/2 - \Omega t).$$

В этом случае достигается оперативность изменения эталонного размера. Сигнал, эквивалентный (49), получается при регистрации светового распределения на частотах  $\Omega$  и  $2\Omega$ , соответствующих эталонным размерам  $A/2$  и  $A$ .

**Контроль сложных объектов.** Результаты, относящиеся к простому одномерному объекту, применимы также в случае контроля нескольких размеров изделий более сложной формы.

Рассмотрим объект в виде двух щелей с размерами  $B_1$  и  $B_2$  и расстоянием между ними  $\Delta$  (рис. 7, а). Спектр мощности такого объекта имеет вид

$$|F(u)|^2 = |(2/u)\sin(B_1u/2)|^2 + |(2/u)\sin(B_2u/2)|^2 + (8/u^2)\sin(B_1u/2)\sin(B_2u/2)\cos[\Delta + (B_1 + B_2)/2]. \quad (50)$$

Если при контроле используется фильтр 11 с эталонными размерами  $A_1$  и  $A_2$ , то нетрудно показать, что с его помощью можно проводить одновременно допусковый контроль размеров  $B_1$  и  $B_2$ , так как перекрестный член в (50) при определенном соотношении размеров  $B_1$ ,  $B_2$  и  $\Delta$  не оказывает влияния на выходной сигнал.

Предположим теперь, что требуется контролировать размеры прямоугольного объекта

$$f(x, y) = \text{rect}(x/B_1)\text{rect}(y/B_2).$$

Поскольку его спектр мощности

$$|F(u, v)|^2 = |(4/uv)\sin(B_1u/2)\sin(B_2v/2)|^2,$$

для контроля параметров  $B_1$  и  $B_2$  могут применяться различные комбинации фильтров  $H_0(u)$  по ортогональным координатам:

$$H_0(u, v) = H_0(u)H'_0(v).$$

Если же контролируемый объект имеет более сложный вид (рис. 7, б), то при контроле его размеров  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  также можно использовать пары

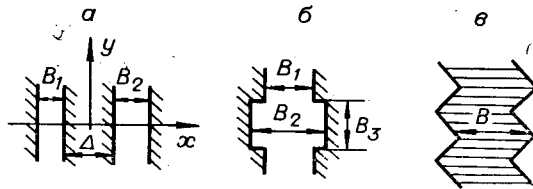


Рис. 7.

одномерных фильтров, однако для этого необходимо, чтобы измеряемые параметры удовлетворяли определенным соотношениям (которые могут быть легко получены), устраняющим влияние перекрестных членов в спектре мощности объекта на выходной сигнал. Устранение

их влияния на результат контроля достигается также при специальной организации оптической части системы. Для этого контролируемые участки объекта должны освещаться некогерентными между собой световыми пучками, например с помощью линейного источника света. Для указанных объектов спектры мощности тогда приобретают вид

$$|F(u)|^2 = |(2/u)\sin(B_1u/2)|^2 + |(2/u)\sin(B_2u/2)|^2,$$

и при контроле размеров  $B_1$  и  $B_2$  могут быть использованы различные фильтры  $H_0(u)$ , полученные для одномерного объекта.

Заметим, что в ряде случаев удается исключить необходимость взаимно-некогерентного освещения контролируемых участков объекта, что обеспечивается при формировании одномерного спектра  $F(u)$  с помощью анаморфотных оптических элементов. Контроль требуемых параметров осуществляется с помощью набора фильтров  $H_0(u)$ , расположенных по координате  $v$ , или одним фильтром при сканировании спектра по этой координате. Такой метод, например, может быть положен в основу контроля среднего диаметра наружной резьбы (рис. 7, в).

**Результаты экспериментов.** С целью подтверждения возможности применения спектрального метода с биполярными фильтрами для контроля размеров изделий и учета влияния ограниченности размеров фильтров на вид выходного сигнала проводились моделирование метода на ЭВМ и эксперименты на макете оптической системы.

Для численных расчетов использовался фильтр

$$H_0(u) = u \sin \epsilon u \cos Au \operatorname{rect}(u/2u_0).$$

При этом вычислялся интеграл вида

$$I(u_0, \epsilon, A, B) = \int_{-\infty}^{\infty} |F(u)|^2 H_0(u) du, \quad (51)$$

где  $F(u)$  определяется выражением (1) при различных значениях  $u_0, \epsilon, A, B$ .

Расчеты выполнялись для  $\epsilon = 0,1, A = 1$  мм при изменении размера фильтра  $D = \lambda Fu_0/\pi$  в пределах от 19 до 20 мм.

Оказалось, что приведенное отклонение сигнала  $\Delta I$  от его значений, соответствующих неограниченному фильтру, не превышало  $6 \cdot 10^{-3}$  при  $B \leq 5$  мм, т. е. отношение сигнал/шум или его динамический диапазон  $L = 1/\Delta I \sim 160$ . Значение  $L$  зависит от произведения  $Q = u_0\epsilon$ . Увеличение  $Q$  приводит к увеличению количества периодов  $\sin \epsilon u$ , помещающихся на заданном размере фильтра, что вызывает снижение уровня флуктуаций сигнала и, следовательно, увеличение его динамического диапазона  $L$ . При  $Q \rightarrow \infty$  (случай неограниченного фильтра) параметр  $L \rightarrow \infty$  и выходной сигнал (51) имеет идеальный вид, приведенный в таблице.

На рис. 8, а показана зависимость сигнала (51) от изменения размера  $B$  контролируемого объекта для следующих параметров фильтра:  $\epsilon = 0,0295, A = 0,295, D = 35,4, F = 415$  мм. Динамический диапазон сигнала в этом случае  $L \sim 14$ . Сигналы  $I^+$  и  $I^-$ , соответствующие положительной и отрицательной составляющим фильтра  $H_0(u)$ , при тех же его параметрах изображены на рис. 8, б, в.

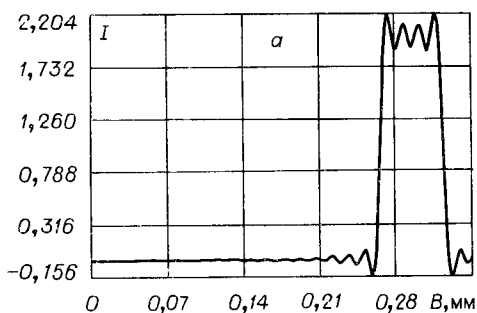


Рис. 8.

Следует отметить, что даже при малых  $\epsilon$  динамический диапазон сигнала остается довольно большим по сравнению с рассмотренными ранее корреляционными способами контроля. Например, при прецизионном контроле, когда величина допуска  $\epsilon \sim 0,5$  мкм, и для весьма заниженного значения  $D = 20$  мм величина  $L$  оказывается больше 3. График выходного сигнала для этих параметров при  $A = 0,1$  мм,  $F = 300$  мм показан на рис. 9. Заметим, что ярко выраженная колебательная структура сигналов, показанных на рис. 8, 9, ограничивающая их динамический диапазон, обусловлена конечным размером используемых фильтров. Существенное уменьшение амплитуды колебаний, т. е. увеличение  $L$ , может быть достигнуто при применении аподизированных фильтров.

Для проверки предложенного спектрального метода контроля и подтверждения результатов расчетов были проведены эксперименты на макете оптической системы, схема которой в двух проекциях показана на рис. 10.

В качестве контролируемого объекта использовалась плоская щелевая диафрагма  $I$ , обеспечивающая непрерывное изменение размера  $B$  объекта в диапазоне от 0 до 0,4 мм. Диафрагма освещалась параллельным когерентным пучком света и объективом  $L_1$  с фокусным расстоянием  $F \sim 415$  мм, в плоскости  $P_1$  формировался ее спектр пространственных частот по координате  $u$ . По координате  $v$  с помощью цилиндрического объектива  $L_2$  обеспечивалось равномерное освещение в плоскости  $P_1$  на участке размером около 10 мм. В эту плоскость устанавливался фильтр 2, выполненный в силуэтном виде:

$$H_0(u) = u \sin(4\pi u/u_0) \cos(40\pi u/u_0) \text{rect}(u/2u_0), \quad (52)$$

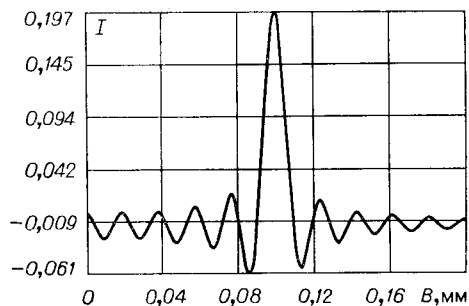


Рис. 9.

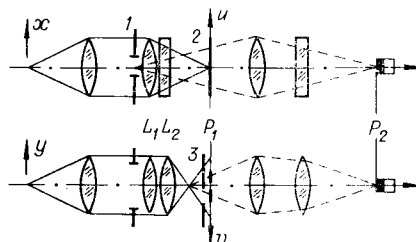
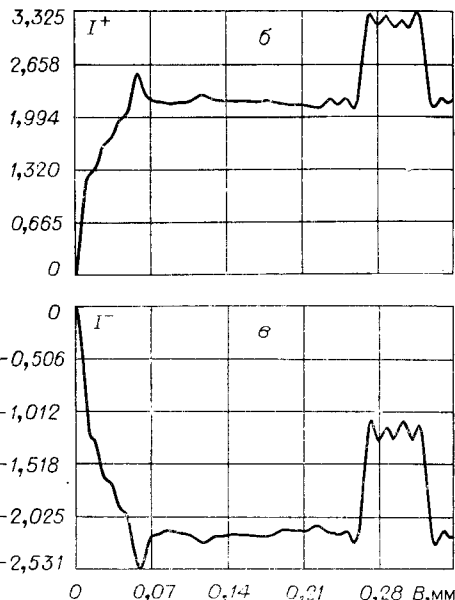


Рис. 10.

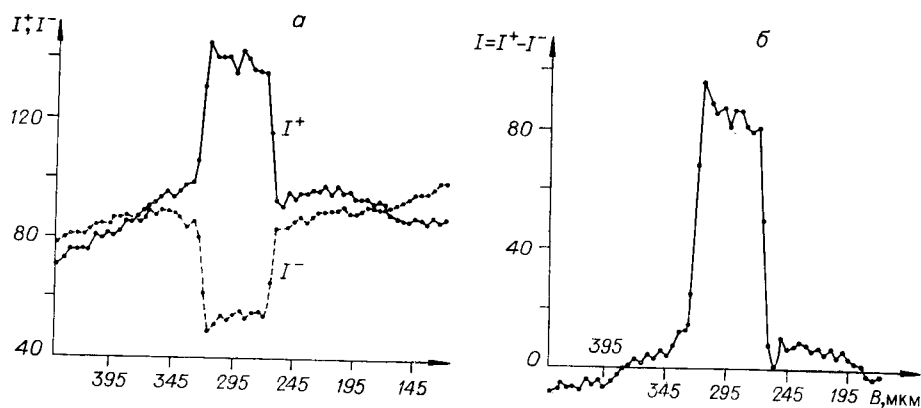


Рис. 11.

причем сплутанные части, соответствующие положительной и отрицательной составляющим (52), были разнесены по координате  $v$  на 1,77 мм, а максимальные их амплитуды составляли 3,5 мм. Размер фильтра по координате  $u$  равнялся 35,4 мм. С помощью диафрагмы  $Z$  перекрывалась одна из составляющих фильтра (52), а прошедший через него световой поток регистрировался ФЭУ в плоскости  $P_2$ . Графики сигналов, снимаемых с ФЭУ, от положительной и отрицательной составляющих фильтра в зависимости от размера  $B$  диафрагмы  $I$  приведены на рис. 11, а, на рис. 11, б показаны их разности. Положение центра сигнала и ширина максимума находятся в соответствии с выбранными параметрами фильтра ( $\varepsilon = 4\pi/u_0 = 0,0295$ ,  $A = 40\pi/u_0 = 0,295$  мм), а небольшая асимметрия и отклонения от нулевого уровня обусловлены дефектами фильтра, диафрагмы и неточностью установки фильтра.

Таким образом, результаты экспериментов свидетельствуют о возможности практической реализации спектрального метода контроля размеров изделий.

**Заключение.** Результаты исследования подтверждают перспективность использования предложенного спектрального метода с биполярными передаточными функциями фильтров для контроля размеров изделий. Преимущества его перед корреляционными методами заключаются в более высокой чувствительности и энергетической эффективности, отсутствии процессов голографирования и возможности получения нужной выходной характеристики, а также в инвариантности его к положению, а в ряде случаев и к ориентации контролируемого объекта в процессе контроля.

Авторы выражают благодарность П. Е. Твердохлебу за полезные замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л., Машиностроение, 1978.
2. Иванов А. Г. Измерительные приборы в машиностроении. М., Машиностроение, 1964.
3. Бесконтактный контроль размеров в станкостроении. М., Машиностроение, 1975.
4. Справочник по технике линейных измерений. М., Машигиз, 1959.
5. Саркин В. И. Современное состояние средств контроля размеров, формы и шероховатости поверхности деталей приборов. М., ЦНИИТЭИприборостроения, 1979. (Обзорная информация. Приборы, средства автоматизации и системы управления. ТС—9. Экономика и технология приборостроения, вып. 3.)



6. Суминов В. М., Гольдберг М. Н., Гребнев А. А. Телевизионный измерительный автомат «СТАРК».— Техника кино и телевидения, 1973, № 3, с. 53.
7. Болдырева И. С., Буторин В. А., Бычков Р. М. и др. Контроль размеров деталей сложной формы.— Автометрия, 1976, № 3, с. 67.
8. Астафьева Т. В., Бычков Р. М., Коронкевич В. П. и др. Применение методов когерентной оптики для контроля геометрических параметров изделий.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. (Тезисы докладов.) Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1979.
9. Indebetouw G. Application of Optical Processing Techniques to the Quality Control of Micromechanics.— Appl. Opt., 1977, vol. 16, N 7, p. 1944.
10. Бычков Р. М., Коронкевич В. П., Чугуй Ю. В. Измерение параметров резьбы методами когерентной оптики.— ОМП, 1977, № 11, с. 50.
11. Устройство для измерения диаметра движущейся проволоки в процессе изготовления. (Авт. свид-во № 324486.)— БИ, 1972, № 2.
12. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М., Мир, 1971.
13. Потатуркин О. И., Твердохлеб П. Е., Чугуй Ю. В. Обобщенный спектральный анализ изображений с использованием силуэтных фильтров.— Автометрия, 1973, № 5.

*Поступила в редакцию 17 августа 1979 г.*

---