

ЛИТЕРАТУРА

1. Нежевенко Е. С., Потатуркин О. И. Метод реализации нелинейных операторов средствами когерентной оптики.— «Автометрия», 1979, № 1, с. 127.
2. D'Auria L., Huignard J. P., Slezak C. S., Spitz E. Experimental holographic read-write memory using 3-D storage.— "Appl. Opt.", 1974, vol. 13, N 4, p. 808—814.
3. Carlsten W. John. Holographic digital data processing system with sequential data storage and retrieval.— Пат. США 340-173LM (G11c13/04, G02B27/38), № 4034355, заявл. 5.05.75, опубл. 5.07.77.
4. Нежевенко Е. С., Салов Г. И., Твердохлеб П. Е., Уманцев Г. Д. Линейный адаптивный классификатор оптических изображений.— «Автометрия», 1971, № 3, с. 82—84.
5. Lipson S. G., Nisenson P. Imaging characteristics of the Itek PROM.— "Appl. Opt.", 1974, vol. 13, N 9, p. 2052—2060.
6. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью. М., «Сов. радио», 1976.

Поступила в редакцию 18 августа 1978 г.

УДК 535.317.2 : 531.715.2

С. В. МИХЛЯЕВ, Ю. В. ЧУГУИ

(Новосибирск)

ОПЕРАТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ДОПУСКОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ФОРМЫ ИЗДЕЛИЙ

Введение. Как известно, контроль формы изделий оптическими приборами (проекторами, микроскопами) сводится к визуальному сравнению оператором увеличенного изображения изделия с некоторым эталоном в виде чертежа поля допусков, воспроизводящим минимальные и максимальные размеры изделия [1]. В связи с возрастающими требованиями к производительности и точности контрольных операций и многообразием форм и размеров контролируемых объектов возникает задача оперативного формирования указанных полей допусков. Существующие методы их изготовления (на оргстекле, фотопластинках, кальках) не отвечают этим требованиям. Они предполагают использование дорогостоящего оборудования (координатных машин, графопостроителей) либо высококвалифицированного ручного труда и не отличаются большой производительностью. Кроме того, получаемые чертежи в процессе эксплуатации быстро изнашиваются и подвержены деформациям, а процесс контроля изделий с их помощью практически не поддается автоматизации.

В данной работе впервые исследуется возможность оперативного формирования полей допусков средствами когерентной оптики на основе применения эталонных (или номинальных) изделий. Это достигается с помощью фильтра пространственных частот в обычной когерентно-оптической системе фильтрации [2]. При помещении на вход этой системы эталонного изделия (рис. 1, а) на ее выходе формируется контурное изображение в виде поля допусков (рис. 1, б). Выполняемое при этом линейное преобразование можно свести к двум операциям, первая из которых обеспечивает получение контура (границы) объекта, а вторая — расщепление его на два компонента, соответствующих внешнему и внутреннему контурам поля допусков (см. рис. 1, б). Исходя из этого ниже рассматриваются два метода синтеза фильтров, называемых в дальнейшем расщепляющими. Анализируются различные способы их реализации, приводятся результаты экспериментов.

Первый метод синтеза фильтров. В этом случае передаточная функция фильтра определяется из условия расщепления тестового объекта в виде одномерного края (полуплоскости).

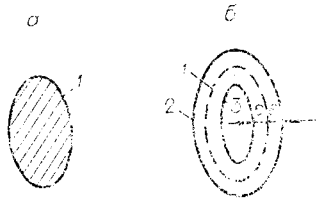


Рис. 1. Схематичное изображение поля допусков:
a — теневое изображение эталонного изделия; *b* — поле допусков (1 — граница изделия, 2 и 3 — внешний и внутренний контуры поля допусков).

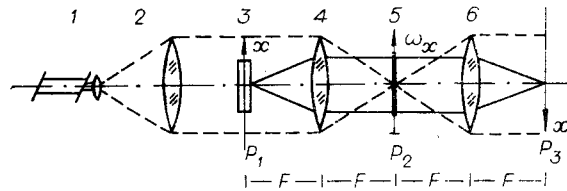


Рис. 2. Оптическая система фильтрации:
 1 — лазер, 2 — коллиматор, 3 — изделие, 4, 6 — объективы прямого и обратного преобразований Фурье, 5 — фильтр.

Рассмотрим этот метод сначала для одномерных объектов (типа цилиндр). При этом в дальнейшем из соображений простоты анализа будем пренебрегать влиянием объемности изделий на вид поля допусков. Поскольку основным элементом одномерных объектов является край, то ограничимся рассмотрением лишь этого случая.

Итак, пусть на входе когерентно-оптической системы в плоскости P_1 (рис. 2) помещается одномерный край, амплитудное пропускание которого $f(x)$ описывается ступенчатой функцией Хевисайда (рис. 3, *a*), т. е.

$$f(x) = Y(x). \quad (1)$$

Нетрудно понять, что если теперь построить фильтр с импульсным откликом (рис. 3, *б*)

$$h(x) = \delta'(x - \epsilon) - \delta'(x + \epsilon), \quad (2)$$

где $\delta'(x)$ — производная от дельта-функции Дирака [3], то на выходе системы в плоскости P_3 получим контурное изображение $g(x)$, соответствующее требуемому полю допусков для края

$$g(x) = f(x) \otimes h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) h(x - \xi) d\xi = \delta(x - \epsilon) - \delta(x + \epsilon). \quad (3)$$

Вид функции $g(x)$ приведен на рис. 3, *в*. Отметим, что поле допусков при таком преобразовании получается симметричным, т. е. внутренний и внешний его контуры отстоят на одинаковом расстоянии ϵ от контура объекта.

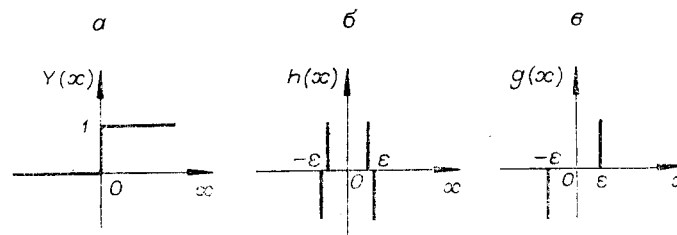


Рис. 3. Формирование поля допусков для одномерного края:
a — амплитудное пропускание края $Y(x)$; *б* — импульсный отклик одномерного расщепляющего фильтра $h(x)$; *в* — выходное распределение $g(x)$, соответствующее полю допусков.

Найдем передаточную функцию расщепляющего фильтра с импульсным откликом (2). По определению

$$H(\omega_x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) e^{-j\omega_x x} dx \simeq \omega_x \sin \varepsilon \omega_x. \quad (4)$$

Можно видеть, что передаточная функция расщепляющего фильтра (4) состоит из произведения двух составляющих, первая из которых обеспечивает оконтуривание объекта, а вторая — расщепление этого контура.

Воспользуемся теперь полученными результатами для синтеза двумерных расщепляющих фильтров. Потребуем, чтобы такой фильтр обладал следующими свойствами:

а) радиальной симметрией:

$$h(x, y) = h(\rho), \quad H(\omega_x, \omega_y) = H(\omega), \quad (5a)$$

где $\rho^2 = x^2 + y^2$, а $\omega^2 = \omega_x^2 + \omega_y^2$;

б) «нулевой» реакцией в отсутствие объекта:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) dx dy = 0; \quad (5б)$$

в) расщеплением полуплоскости на два контура:

$$\int_{-\infty}^x \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) dy \right\} dx = \frac{1}{2} [\delta(x - \varepsilon) - \delta(x + \varepsilon)]. \quad (5в)$$

Из свойства (5а) следует, что для нахождения передаточной функции фильтра достаточно определить $H(\omega_x, 0)$, т. е. одно его сечение. Выполнив преобразование Фурье правой и левой частей выражения (5в) и воспользовавшись свойством (5б), в результате можно получить

$$H(\omega_x, 0)/\omega_x = \sin \varepsilon \omega_x.$$

Тогда передаточная функция двумерного расщепляющего фильтра

$$H(\omega) = \omega \sin \varepsilon \omega. \quad (6)$$

Выражение (6) — естественное обобщение передаточной функции (4) на двумерный случай.

Отметим, что фильтр (6) получен из условия расщепления плоской границы (5в). В связи с этим рассмотрим, к чему приводит попытка расщепления этим фильтром двумерного объекта, имеющего вид бесконечного прямого угла (рис. 4, а) и описываемого произведением одномерных функций Хевисайда:

$$f(x, y) = Y(x)Y(y). \quad (7)$$

Результат фильтрации этого объекта можно представить в виде

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega_x, \omega_y) H(\omega) e^{j(\omega_x x + \omega_y y)} d\omega_x d\omega_y, \quad (8)$$

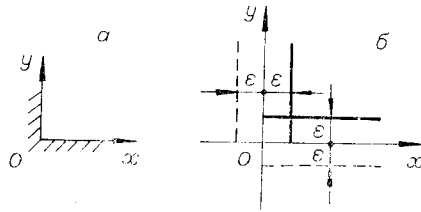


Рис. 4. Бинарное изображение в виде прямого угла (а) и характер его расщепления при малых ε (б).

где $F(\omega_x, \omega_y)$ — спектр объекта (7). Принимая во внимание, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} Y(x) e^{-j\omega_x x} dx = \pi \delta(\omega_x) + \frac{1}{j\omega_x},$$

для $g(x, y)$ получим следующее выражение:

$$g(x, y) = 1/2[\delta(x - \varepsilon) - \delta(x + \varepsilon) + \delta(y - \varepsilon) - \delta(y + \varepsilon)] - g_1(x, y), \quad (9)$$

где $g_1(x, y)$, в свою очередь, определяется выражением

$$g_1(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega \sin \varepsilon \omega}{\omega_x \omega_y} \exp[j(\omega_x x + \omega_y y)] d\omega_x d\omega_y. \quad (10)$$

Расчеты показывают, что при $\varepsilon \rightarrow 0$

$$g(x, y) = 1/2[\delta(x - \varepsilon) - \delta(x + \varepsilon)]Y(y) + 1/2[\delta(y - \varepsilon) - \delta(y + \varepsilon)]Y(x).$$

Вид функции $g(x, y)$ приведен на рис. 4, б, где сплошная линия соответствует положительным, а штриховая — отрицательным ее значениям. Из этого рисунка видно, что при расщеплении угла фильтром (б) образуются два контура, отстоящих друг от друга на 2ε , причем отрезки прямых, составляющие внутренний контур, пересекаются в точке $x=y=\varepsilon$, а составляющие внешний — имеют разрыв при $x < 0, y < 0$.

При конечных ε , как показывают оценки, эффект расщепления контура объекта также имеет место. Однако в этом случае функция $g(x, y)$ в области $|x| \leq \varepsilon, |y| \leq \varepsilon$ может принимать ненулевые значения.

Таким образом, фильтром (б) осуществляется идеальное расщепление одномерного края. При применении его к объектам с негладкой границей картина расщепления в областях ее изломов несколько усложняется. Однако это не приводит к заметному искажению геометрии поля допусков. На практике вследствие конечной кривизны границы объектов эффекты разрыва внешнего контура поля допусков будут выражены в меньшей степени.

Второй метод синтеза фильтров. Согласно этому методу, фильтр строится исходя из схожести импульсных откликов для одномерного и двумерного случаев.

Действительно, обратимся к одномерному отклику (2). Учтем при этом условия (5а) и (5б). Очевидно, что двумерный импульсный отклик, удовлетворяющий этим условиям, в общем случае можно представить в виде совокупности N концентрических кольцевых областей с амплитудным пропусканием каждой из них $(-1)^n f_n(\rho)$, где $2 \leq n \leq N$. При этом функции $f_n(\rho)$ можно выбрать исходя либо из заданного характера расщепления тестовых объектов, либо из эвристических соображений.

Выберем $N=2$. Тогда по аналогии с откликом (2) двумерный отклик можно представить в виде двух узких концентрических колец с амплитудными пропусканиями $f_1(\rho) = 1$ и $f_2(\rho) = -\varepsilon/(\varepsilon + \Delta)$, т. е.

$$h(\rho) = \delta(\rho - \varepsilon) - \varepsilon \delta(\rho - \varepsilon - \Delta) / (\varepsilon + \Delta), \quad (11)$$

где параметр Δ определяется разностью радиусов колец.

Определим, например, результат расщепления фильтром с откликом (11) тестового объекта в виде прозрачного отверстия радиусом a с функцией пропускания

$$P_a(\rho) = \begin{cases} 1, & \rho \leq a; \\ 0, & \rho > a. \end{cases} \quad (12)$$

С этой целью вычислим выходное распределение

$$g(\rho) = P_a(\rho) \otimes h(\rho). \quad (13)$$

Воспользуемся при этом известным результатом [3]

$$P_a(\rho) \otimes \delta(\rho - \varepsilon) = \begin{cases} 2\pi\varepsilon, & \rho < a - \varepsilon; \\ 2\varepsilon\Theta, & a - \varepsilon < \rho < a + \varepsilon; \\ 0, & \rho > a + \varepsilon, \end{cases}$$

где $2\varepsilon\rho \cos \Theta = \rho^2 - a^2 + \varepsilon^2$.

Тогда для $g(\rho)$ окончательно можно получить следующее выражение:

$$g(\rho) = \begin{cases} 0, & \rho < a - \varepsilon - \Delta; \\ 2\frac{\Delta}{\varepsilon} \frac{\varepsilon^2 + a^2 - \rho^2}{[\rho^2 - (\varepsilon - a)^2]^{1/2} [(\varepsilon + a)^2 - \rho^2]^{1/2}}, & a - \varepsilon < \rho < a + \varepsilon; \\ 0, & \rho > a + \varepsilon + \Delta. \end{cases} \quad (14)$$

График этой функции для $\Delta/\varepsilon \ll 1$ приведен на рис. 5. Нетрудно понять, что расщепленное изображение имеет вид двух концентрических колец с резкими максимумами при $\rho = a \pm \varepsilon$, что соответствует полю допуска объекта (12).

Вычислим теперь передаточную функцию фильтра с откликом (11), которая является результатом преобразования Ганкеля от этого отклика. Можно показать, что при $\Delta/\varepsilon \ll 1$

$$H(\omega) = \omega J_1(\varepsilon\omega), \quad (15)$$

где $J_1(x)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка.

Таким образом, для формирования изотропных и симметричных полей допусков по эталонным объектам могут быть использованы фильтры (6) и (15). Несмотря на некоторое различие передаточных функций, структура их примерно одинакова. Они содержат низкочастотную и высокочастотную составляющие, первая из которых обеспечивает оконтуривание объекта, а вторая — его расщепление.

Ниже будет показано, что более простым с точки зрения практической реализации является фильтр (15), хотя, как показывают расчеты, он и дает более плавные контуры в расщепленном изображении, чем фильтр (6).

Методики получения расщепляющих фильтров. Перейдем теперь к вопросам технической реализации фильтров с передаточными функциями (6) и (15). Эти функции содержат амплитудную $|H(\omega)|$ и фазовую бинарную $e^{j\arg H(\omega)}$ составляющие. Исходя из этого возможны различные методики их получения.

Амплитудно-фазовая методика. В этом случае фильтр представляет собой совокупность двух транспарантов с записью соответственно амплитудной и фазовой составляющих передаточной функции $H(\omega)$. При этом фазовая составляющая принимает лишь два значения: 0 и π . Очевидно, что такая методика получения фильтров предполагает наличие хорошо отработанной технологии изготовления амплитудных (полутоновых) и фазовых транспарантов.

Интерферометрическая методика. Расщепляющий фильтр, согласно этой методике, получается путем голографирования спектра Фурье $H(\omega)$, синтезированного путем

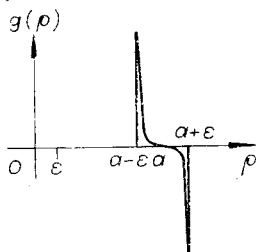


Рис. 5. Результат расщепления круга $P_a(\rho)$.

амплитудного вычитания двух спектров, соответствующих положительной $h^+(\rho)$ и отрицательной $h^-(\rho)$ составляющим импульсного отклика $h(\rho) = h^+(\rho) - h^-(\rho)$. Такое вычитание может быть осуществлено, например, с помощью интерферометра Маха — Цендера, в двух плечах которого помещаются прозрачные с записью указанных составляющих отклика. Основные недостатки приведенной методики обусловлены высокими требованиями к качеству элементов интерферометра и подложек прозрачных.

Методика на основе оконтуривающего фильтра. По этой методике для синтеза расщепляющего фильтра (15) используется промежуточный оконтуривающий фильтр с передаточной функцией ω^2 .

Поясним эту методику. С этой целью представим функцию (15) в виде

$$H(\omega) = (J_1(\varepsilon\omega)/\omega)\omega^2.$$

Отсюда следует, что $H(\omega)$ можно представить произведением двух составляющих, первая из которых соответствует спектру отверстия радиусом ε , а вторая — передаточной функции двумерного оконтуривающего фильтра.

Таким образом, для получения расщепляющего фильтра достаточно сформировать спектр круглого отверстия, промодулировать его оконтуривающим униполярным фильтром и голографически зарегистрировать результирующее световое распределение.

Амплитудная методика. В отличие от рассмотренных ранее эта методика предполагает использование для расщепления лишь одного униполярного фильтра. При этом отпадает необходимость в применении фазосдвигающих элементов и процесса голографирования.

Действительно, выберем передаточную функцию фильтра в виде

$$\tilde{H}(\omega) = [H(\omega)/\omega^2 + \beta]H_1(\omega), \quad (16)$$

где $H(\omega)$ и $H_1(\omega)$ — передаточные функции соответственно расщепляющего и оконтуривающего фильтров. Из (6) и (15) следует, что выбором параметра β можно обеспечить выполнение условия, при котором $\tilde{H}(\omega) \geq 0$. В этом случае фильтр (16) может быть реализован на одном прозрачном. В качестве примера на рис. 6 приведен график функции (16) при $H(\omega) = \omega J_1(\varepsilon\omega)$ и $H_1(\omega) = \omega^2 e^{-\alpha\omega^2}$ (случай аподизированного квадратичного фильтра).

Нетрудно понять, что наличие в (16) второго члена приводит к появлению, наряду с двумя контурами поля допуска, дополнительного интенсивного центрального контура, соответствующего границе объек-

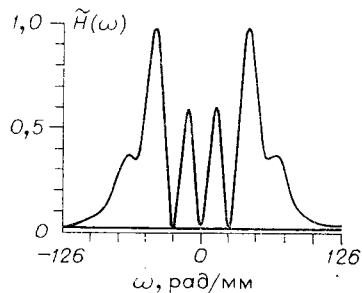


Рис. 6. Передаточная функция униполярного расщепляющего фильтра.

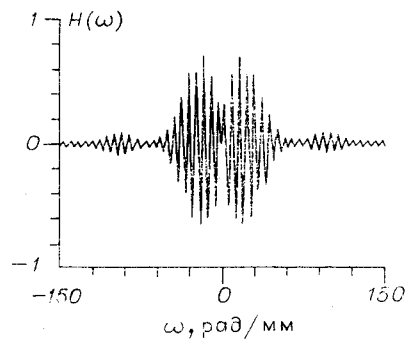


Рис. 7. Передаточная функция расщепляющего фильтра с импульсным откликом в виде двух концентрических колец с ширинами $\Delta_1 = 0,09$ и $\Delta_2 = 0,1$.

та (см. приложение). Таким образом, униполярный фильтр может быть использован в тех случаях, когда контурное изображение эталонного объекта не оказывает отрицательного влияния на процесс визуального контроля изделий. Кроме того, применение такого фильтра оправдано при определении знака отклонения размера изделия от эталона.

Среди рассмотренных методик получения фильтров наиболее простой является методика на основе оконтуривающего фильтра, однако перспективной, по нашему мнению, представляется амплитудно-фазовая, несмотря на сложность ее реализации. Эта методика исключает процесс голографирования и связанные с ним энергетические потери и геометрические искажения полей допусков.

Результаты экспериментов. Для подтверждения возможности формирования полей допусков когерентно-оптическими методами был проведен ряд экспериментов, включающий моделирование процесса расщепления на ЭВМ, а также расщепление реальных объектов в когерентно-оптической системе.

С целью изучения характера светового распределения в расщепленном изображении проводился расчет свертки импульсного отклика фильтра с плоским краем (1). При этом использовался импульсный отклик в виде двух концентрических колец с амплитудными пропусками $f_1(\rho) = -1$ и $f_2(\rho) = 1$. Условие нулевой реакции (5б) дает следующую связь между ширинами колец Δ_1 и Δ_2 отклика при максимальном радиусе кольца $\rho_{\max} = 1$:

$$\Delta_2 = 1 - \Delta_1 - (1 - 2\Delta_1(2 - \Delta_1))^{1/2}.$$

Передаточная функция такого фильтра для $\Delta_1 = 0,09$ и $\Delta_2 = 0,1$ приведена на рис. 7. Нетрудно понять, что выходное распределение $g(x)$, соответствующее результату расщепления одномерного края, состоит из двух контуров с экстремумами в точках $x_1 \approx -1 + \Delta_1$ и $x_2 \approx 1 - \Delta_1$.

На рис. 8, а, б приведены сечения одного контура для двух значений Δ_1 : 0,2 и 0,09. Как и следовало ожидать, меньшему Δ_1 соответствует более узкий контур. Для приведенных распределений характерно плавное изменение $g(x)$ на участке $[0, x_1]$, что обусловлено особенностью свертки для выбранного двумерного импульсного отклика.

Исследования показали, что уменьшить ширину контура можно с помощью импульсного отклика с числом колец $N > 2$. Более крутой фронт контура в этом случае достигается за счет более быстрой компенсации его внутренними кольцами отклика. В качестве примера на рис. 9 приведено сечение одного контура при $N = 3$ и ширинах колец $\Delta_1 = 0,09$; $\Delta_2 = 0,17$; $\Delta_3 = 0,07$.

Кроме моделирования расщепления края, проводились также эксперименты на ЭВМ по расщеплению изображения в виде прямого угла, характерного для многих изделий. При этом использовался фильтр

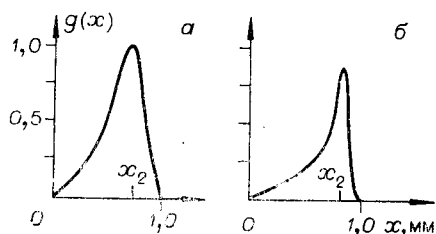


Рис. 8. Результат расщепления одномерного края при $\Delta_1 = 0,2$ (а) и $\Delta_1 = 0,09$ (б).

(Показан лишь один контур.)

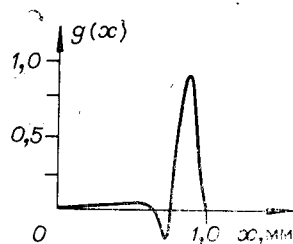


Рис. 9. Результат расщепления одномерного края фильтром при $N = 3$; $\Delta_1 = 0,09$; $\Delta_2 = 0,17$; $\Delta_3 = 0,07$.

с импульсным откликом (11) при $\epsilon = 1$ и $\Delta = 0,2$. Результат расщепления этого объекта в виде полутонного изображения, полученного с помощью фотопостроителя, показан на рис. 10. Можно видеть, что для отрезков прямых, составляющих угол, расщепление имеет место всюду, за исключением области их излома (пересечения), причем разрыв в этой области претерпевает лишь внешний контур изображения поля допусков.



Рис. 10. Моделирование расщепления угла.

При расщеплении реальных изделий в оптической системе (см. рис. 2) использовался голографический фильтр, синтезированный с помощью оконтуривающего фильтра

$H_1(\omega) = \omega^2 e^{-\alpha\omega^2}$, полученного по методике, изложенной в работе [4]. При этом радиус ϵ исходного круглого отверстия для оконтуривания составлял $\sim 0,1$ мм. В качестве оптических элементов использовались объективы «Индустар-37» с $F=300$ мм. Голографирование частотной характеристики фильтра осуществлялось на фотопластинках ЛОИ-2.

На рис. 11, а, 12, а приведены теневые изображения реальных изделий сложной формы, а на рис. 11, б, 12, б — результаты расщепления изображений этих изделий в оптической системе.

В целом следует отметить удовлетворительное качество полученных полей допусков изделий, определяющееся, с одной стороны, характеристиками используемого фильтра, а с другой — видом объемного изделия: его отражательными характеристиками, конфигурацией, размерами. Радикальное улучшение качества полей допусков может быть достигнуто при применении неголографических амплитудно-фазовых фильтров.

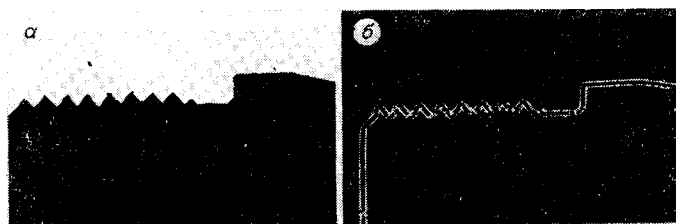


Рис. 11. Изображение цилиндра (а) и результат его расщепления в системе (б).

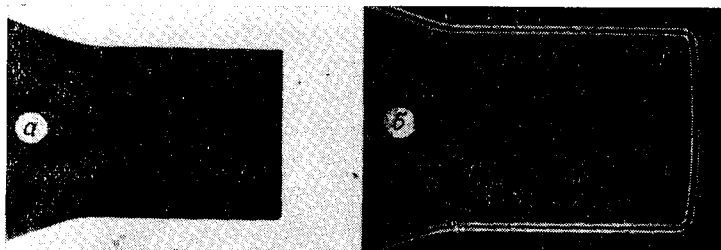


Рис. 12. Изображение сложной цилиндрической детали (а) и результат расщепления ее в системе (б).

Заключение. Результаты экспериментов свидетельствуют о возможности оперативного формирования полей допусков средствами когерентной оптики на основе применения эталонных изделий. Для получения изотропных и симметричных полей допусков могут быть использованы фильтры с передаточными функциями (6), (15). Выбор вида функции определяется возможностью ее практической реализации по одной из предложенных методик.

Разработанный метод оперативного формирования полей допусков может быть положен в основу создания новых (в том числе автоматических) приборов контроля формы изделий.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Оценим интенсивность центрального и боковых контуров, соответствующих полю допусков эталонного изделия при использовании амплитудной методики синтеза фильтров.

В этом случае передаточную функцию фильтра можно записать в виде

$$H_2(\omega) = \beta(H_1\omega) + \gamma\omega^2, \quad (1')$$

где $H_1(\omega) = \omega \sin \varepsilon\omega$ — передаточная функция расщепляющего фильтра.

Коэффициент γ в (1') определяется из условия неотрицательности $H_2(\omega)$, т. е. $\sin \varepsilon\omega/\varepsilon\omega + \gamma/\varepsilon \geq 0$, откуда

$$\gamma = \Theta\varepsilon \approx 0,22\varepsilon. \quad (2')$$

Для вычисления коэффициента β потребуем, чтобы $\max\{H_2(\omega)\} = 1$. Тогда из (1') получаем, что

$$\beta = [(1 + 0,22\varepsilon\omega_0)\omega_0]^{-1}, \quad (3')$$

где ω_0 — граничная частота, пропускаемая фильтром.

Рассмотрим результат фильтрации $g(x)$ одномерного края ограниченным фильтром с $\tilde{H}_2(\omega) = H_2(\omega)P_{\omega_0}(\omega)$:

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_2(\omega) P_{\omega_0}(\omega) \delta(\omega_y) \left[\pi \delta(\omega_x) + \frac{1}{j\omega_x} \right] e^{j(\omega_x x + \omega_y y)} d\omega_x d\omega_y, \quad (4')$$

где функция $P_{\omega_0}(\omega)$ определена в (12).

В результате несложных преобразований из (4') с использованием (1') можно получить

$$g(x) = \beta f_1(x) + \gamma \beta f_2(x). \quad (5')$$

Здесь $f_1(x)$ описывает результат расщепления одномерного края (поле допусков), а $f_2(x)$ — результат его оконтурирования:

$$f_1(x) = -\frac{\sin \omega_0(x + \varepsilon)}{x + \varepsilon} + \frac{\sin \omega_0(x - \varepsilon)}{x - \varepsilon}; \quad (6')$$

$$f_2(x) = 2\omega_0^2 \left[\frac{\sin \omega_0 x}{(\omega_0 x)^2} - \frac{\cos \omega_0 x}{\omega_0 x} \right]. \quad (7')$$

Из (5')—(7') следует, что максимум интенсивности света в контурах поля допусков

$$I_1 \sim (\beta\omega_0)^2, \quad (8')$$

а в оконтуренном изображении края

$$I_2 \sim 0,74 (\gamma\beta)^2 \omega_0^4. \quad (9')$$

При этом координаты этих максимумов $x_1 = \pm \epsilon$, $x_2 \approx \pm 2,07/\omega_0$ соответственно.

Воспользовавшись (8'), (9'), получим, что

$$\frac{I_2}{I_1} = 0,74 \gamma^2 \omega_0^2 = 2,06 \left(\frac{\epsilon}{x_2} \right)^2 = 2,06 N^2,$$

где параметр N определяется отношением размера допуска 2ϵ к расстоянию между главными максимумами в оконтуренном изображении. Например, при $\epsilon = 50$ мкм, $x_2 = 5$ мкм интенсивность центрального контура в 200 раз превышает интенсивность в контурах поля допусков. Это следует учитывать при выборе параметров фильтра, синтезируемого по амплитудной методике.

Авторы выражают благодарность М. А. Гофману за помощь в проведении экспериментов, Р. М. Бычкову, Б. Е. Кривенкову и Б. Н. Чулицкину за полезные замечания и интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Г. Измерительные приборы в машиностроении. М., «Машиностроение», 1964.
2. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970.
3. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М., «Мир», 1971.
4. Чугуй Ю. В. Методика получения оптических фильтров пространственных частот.— В кн.: Оптические устройства для хранения и обработки информации. Под. ред. чл.-кор. АН СССР Нестерихина Ю. Е. Новосибирск, изд. ИАНЭ СО АН СССР, 1975.

Поступила в редакцию 17 июня 1978 г.

УДК 535.317.2 : 531.715.2

Б. Е. КРИВЕНКОВ, Ю. В. ЧУГУЙ

(Новосибирск)

КАЧЕСТВЕННОЕ ОКОНТУРИВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ТЕНЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Введение. Как известно, визуальный контроль формы и размеров изделий проекторами и микроскопами сводится либо к сравнению увеличенного во много крат теневого изображения контролируемого изделия с эталонным изображением (например, в виде поля допусков), либо к непосредственному измерению требуемых размеров. Последнее достигается путем совмещения края (границы) объекта с меткой и последующего прецизионного перемещения объекта до совпадения метки с противоположным краем [1]. Использование для целей контроля (особенно прецизионного) теневой проекции связано с определенными недостатками. Один из них обусловлен сложностью профиля изображения края, приводящего вследствие дифракционного размытия к ошибкам визирования на него метки прибора. Кроме того, наличие больших по площади освещенных и темных участков в таком изображении приводит к быстрой утомляемости оператора.