

Ю. В. ЧУГУИ
 (Новосибирск)

ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СИЛУЭТНЫХ ФИЛЬТРОВ

Часто задача создания когерентно-оптических устройств (КОУ) с требуемой импульсной реакцией $h(x)$ сводится к задаче синтеза фильтра пространственных частот со знакопеременной функцией передачи $H(\omega_x)$, где $h(x)$ и $H(\omega_x)$ связаны преобразованием Фурье. Подобные фильтры изготавливаются в виде транспарантов, амплитудное пропускание которых $T(x)$ пропорционально функции передачи, и применяются, например, при дифференцировании одномерных сигналов, исключении аппаратной функции и т. п. [1].

Трудности синтеза указанных фильтров возникают из-за нелинейной характеристики амплитудное пропускание — экспозиция регистрирующих сред. Даже при учете этой нелинейности динамический диапазон пропускания фильтра не превышает 10—15 дБ [2]. Определенные трудности возникают и при моделировании «знакопеременности» функции, поскольку функция передачи фазового транспаранта резко усложняется фазового транспаранта, обеспечивающего сдвиг фазового фронта прошедшей волны света на π в местах изменения знака функции $H(\omega_x)$. Эти трудности усугубляются при многоканальной обработке информации, поскольку функция передачи фазового транспаранта резко усложняется. Наконец, на точность работы КОУ существенное влияние оказывает шум от зернистости фотоматериала. Уровень шума зависит от среднего значения коэффициента пропускания транспаранта по интенсивности $\overline{|T|^2}$ и имеет максимальное значение при $\overline{|T|^2} \approx 0,6 - 0,65$ [3].

В настоящей работе показано, что для обработки одномерных сигналов в качестве фильтров с успехом могут применяться транспаранты с силуэтным двухградационным изображением функции $H(\omega_x)$ (рис. 1), описываемые функцией пропускания

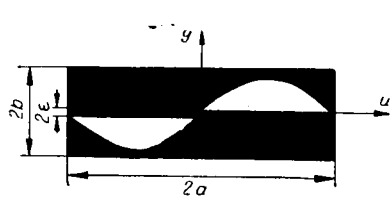


Рис. 1.

$$T(u, y) = \begin{cases} +1, & \text{если } u, y \in S_1; \\ -1, & \text{если } u, y \in S_2; \\ 0 & \text{в остальной области,} \end{cases} \quad (1)$$

где S_1 — область, ограниченная прямой $y = \varepsilon$ и контуром функции $H^+(u) + \varepsilon$, а S_2 — область, ограниченная прямой $y = -\varepsilon$ и контуром функции $H^-(u) - \varepsilon$;

$H^+(u)$ и $H^-(u)$ — соответственно положительная и отрицательная части функции $H(u)$, заданной на интервале $[-a, a]$.

Пусть амплитудное распределение света на выходе фильтра пропорционально функции $T(u, y) \dot{F}(\omega_x)$, где $\dot{F}(\omega_x)$ — комплексный спектр Фурье входного сигнала $f(x)$, а переменные ω_x и u связаны соотношением $\omega_x = \frac{2\pi}{\lambda f_1} u$ (f_1 — параметр, характеризующий спектроанализатор). Тогда после двумерного преобразования Фурье распределение комплексной амплитуды света будет описываться функцией переменных ξ, η , т. е.

$$g(\xi, \eta) = \iint_S T(u, y) \dot{F}\left(\frac{2\pi}{\lambda f_1} u\right) e^{j \frac{2\pi}{\lambda f_2} (u\xi + y\eta)} du dy = \int_{-a}^a \dot{F}\left(\frac{2\pi}{\lambda f_1} u\right) \times \\ \times \left\{ \int_{\varepsilon}^{H^+(u) + \varepsilon} e^{j \frac{2\pi}{\lambda f_2} y\eta} dy - \int_{H^-(u) - \varepsilon}^{-\varepsilon} e^{j \frac{2\pi}{\lambda f_2} y\eta} dy \right\} e^{j \frac{2\pi}{\lambda f_2} u\xi} du, \quad (2)$$

где S — область задания функции $T(u, y)$, а f_2 — параметр, характеризующий двумерный преобразователь Фурье. Если для простоты принять $f_1 = f_2 = f$, то распределение амплитуды света вдоль направления $\eta = 0$ будет определяться соотношением

$$g(\xi) = \int_{-a}^a [H^+(u) + H^-(u)] \dot{F}\left(\frac{2\pi}{\lambda f} u\right) e^{j \frac{2\pi}{\lambda f} u\xi} du. \quad (3)$$

Принимая теперь во внимание, что $H^+(u) + H^-(u) = H(u)$ по определению, получим

$$g(\xi) = \int_{-a}^a \dot{F}\left(\frac{2\pi}{\lambda f} u\right) H(u) e^{j \frac{2\pi}{\lambda f} u\xi} du = \int_L f(x) h(\xi - x) dx, \quad (4)$$

где $h(\xi) = \int_{-a}^a H(u) e^{j \frac{2\pi}{\lambda f} u\xi} du$, а L — область задания функции $f(x)$.

Таким образом, использование двухградационного фильтра с силуэтным изображением $H(u)$ приводит к вычислению интеграла свертки (4). В этом случае значительно упрощается технология изготовления фильтров. Их можно синтезировать методами фотографии, фотолитографии, удаления материала лучом лазера и т. д. Наиболее простым из них является фотографический метод, при котором синтез фильтра сводится к графическому построению функции $H(u)$ в черно-белом виде с последующим репродуцированием. Уровень шума от зернистости двухградационных фотографических транспарантов по сравнению с полутонными заметно уменьшается и определяется в основном шумом прозрачных участков.

Знаковую часть биполярной функции $H(u)$ можно моделировать с помощью фазовой пластинки, осуществляющей сдвиг волны света по фазе на π в области S_1 по отношению к области S_2 и, таким образом, с неизменной функцией передачи для различных биполярных функций $H(u)$. Поскольку интеграл свертки (4) не зависит от параметра ε , то выбором его значения можно значительно снизить требования к величине переходной области раздела фаз указанной пластинки и точности ее установки.

При выводе выражения (4) предполагалось, что силуэтный фильтр принимает две крайние градации пропускания 0 и 1. В действительно-

сти необходимо учитывать конечное амплитудное пропускание фотоматериала T_{\min} в области, соответствующей нулевым значениям функции $T(u, y)$. Рассмотрим более подробно, как это отразится на конечном результате. Для этого определим действующее значение $H'(u)$ с учетом T_{\min} и коэффициента амплитудного пропускания T_{\max} фотоматериала в областях S_1 и S_2 . Нетрудно видеть (см. рис. 1), что $H'(u)$ является алгебраической суммой двух слагаемых, соответствующих положительной и отрицательной областям задания функции $T(u, y)$:

$$\begin{aligned} H'(u) &= T_{\max} H(u) + T_{\min} (b - H(u)) + T_{\min} \epsilon - T_{\min} (b + \epsilon) = \\ &= (T_{\max} - T_{\min}) H(u), \end{aligned} \quad (5)$$

где $2b$ — размер фильтра по оси y . Отсюда следует, что функции $H'(u)$ и $H(u)$ связаны через масштабный множитель. Важно отметить, что постоянная составляющая в выражении (5) для биполярных фильтров не оказывает влияния.

Динамический диапазон ΔL фотографического силуэтного фильтра определим следующим образом (в децибелах):

$$\Delta L = 20 \lg \frac{H'_{\max}}{\Delta H_{\text{экр}}}, \quad (6)$$

где $H'_{\max} = (T_{\max} - T_{\min}) H_{\max}$, а $\Delta H_{\text{экр}}$ — минимальное эквивалентное значение $H(u)$, определяемое зернистостью и частотно-контрастной характеристикой пленки, частотно-контрастной характеристикой объектива, режимом проявления и т. д. Величина ΔL для силуэтного фильтра с параметрами $H'_{\max} = 1$ мм, $\Delta H_{\text{экр}} = 10$ мкм (фотопленка «Микрат ВР», репродукционный объектив И50Р с разрешением в центре около 100 лин/мм) может составлять порядка 40 дБ.

Оптическая схема, реализующая указанный способ обработки сигнала $f(x)$, представлена на рис. 2. Исходный транспарант с сигналом $f(x)$ помещается в плоскость P_1 на пути плоского монохроматического пучка света. С помощью совместного действия цилиндрического и сферического объективов O_1 и O_2 по координате y осуществляется проектирование транспаранта в плоскость силуэтного фильтра P_2 , а по координате x — преобразование Фурье. Двумерное преобразование Фурье выполняется также с помощью цилиндрического и сферического объективов O_3 и O_4 . Наличие анаморфотной системы для двумерного преобразования Фурье необходимо для того, чтобы плоскости наблюдения преобразования Фурье по координате ξ и η совпадали. Параметры силуэтного фильтра и оптической системы проектирования по координате y должны быть между собой согласованы следующим образом:

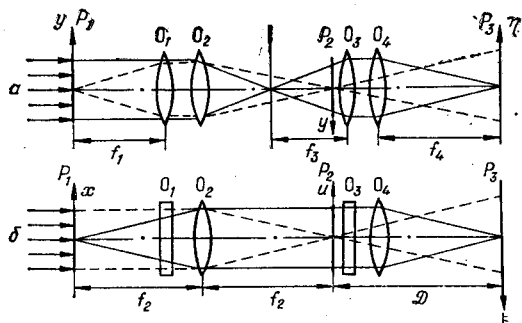


Рис. 2.

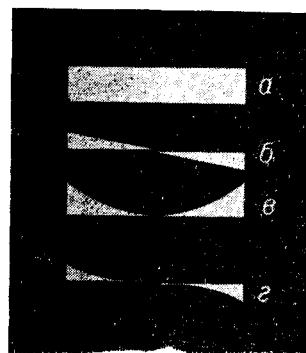


Рис. 3.

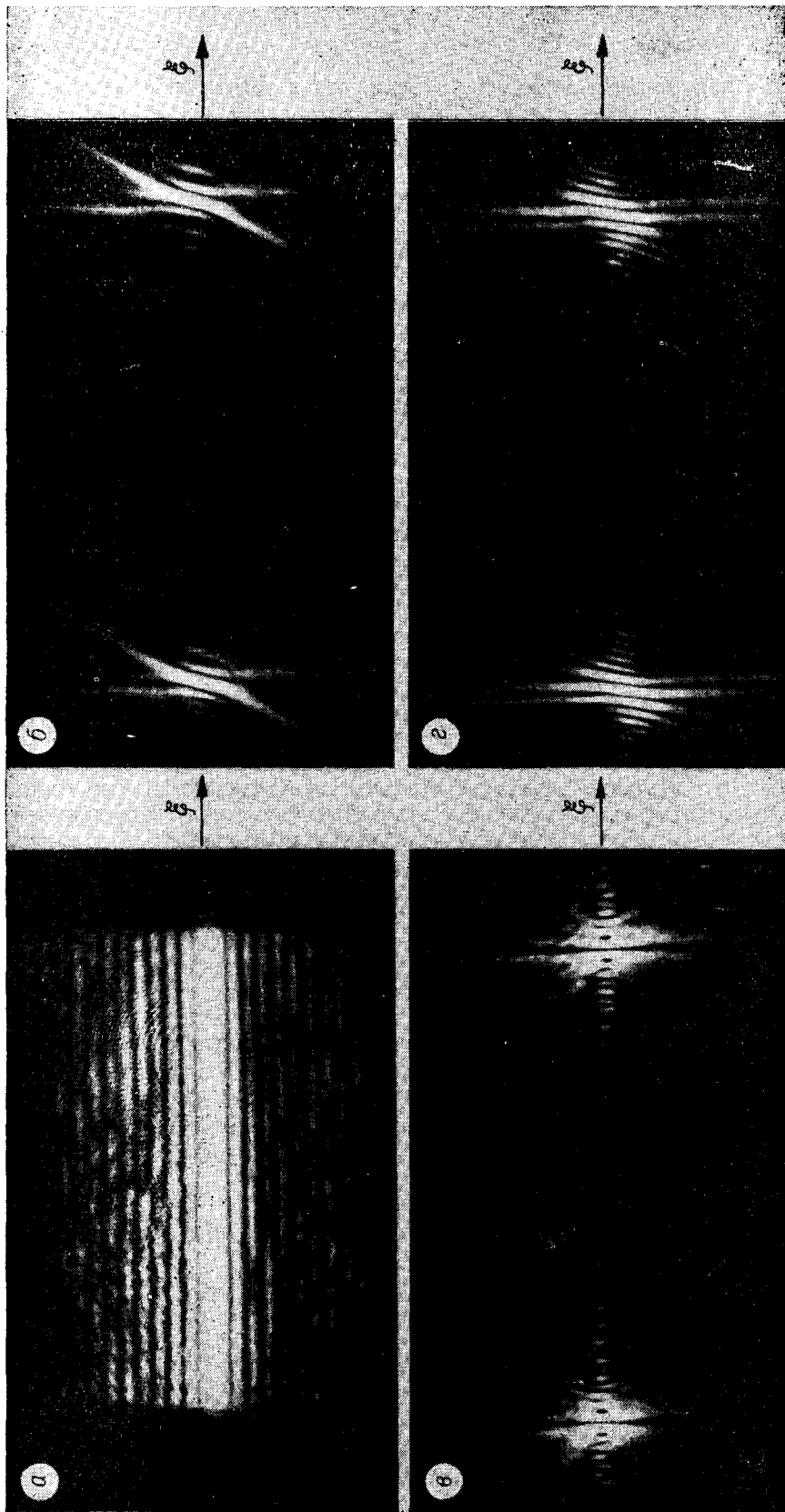


Рис. 4.

$$b' = \frac{f_2}{f_1} b,$$

где b' — полуширина световой полосы, соответствующей сигналу $f(x)$.
Для амплитудного распределения света вдоль оси ξ ($\eta=0$) в плоскости P_3 можно получить выражение

$$g(\xi) \sim e^{j \frac{\pi}{\lambda D} \xi^2} \int_L f(\mu x) h(\xi - x) dx, \quad (7)$$

где μ — масштабный множитель, равный $-f_1/f_4$.

Регистрацию светового распределения в плоскости P_3 можно осуществить либо с помощью сканирующего фотоприемника, либо путем отклонения светового пучка в направлении ξ относительно неподвижного фотоприемника с точечной диафрагмой, выходной сигнал с которого пропорционален $|g(\xi)|^2$. Конечные размеры диафрагмы фотоприемника приводят к погрешности считывания. Анализ этой погрешности проведен в [4].

На базе рассмотренной оптической системы можно производить и многоканальную обработку одномерных сигналов $f_i(x)$ ($i=1, 2, \dots, N$). Знаковую часть соответствующих фильтров $H_i(u)$ можно реализовать с помощью фазовой решетки с периодом, равным расстоянию между фильтрами $H_i(u)$ по оси y . Для «развязки» сигналов $g_i(\xi)$ в плоскости P_3 можно, например, использовать синусоидальную решетку, ориентация и частота которой в пределах фильтра с функцией передачи $t_i(u, y)$ определяется из условия отсутствия взаимного перекрытия областей, соответствующих световым распределениям $g_i(\xi, \eta)$. Можно также пойти по пути получения голограмм сфокусированных изображений фильтров на разных несущих, причем полуволновой фазовый сдвиг рационально осуществлять на этапе голографирования.

Работа устройства (см. рис. 2) проверена экспериментально. На его вход подавалось двухградационное изображение прямоугольного импульса. На рис. 3 показаны силуэтные фильтры, используемые в экспериментах. Первый из них (см. рис. 3, а) моделирует апертурные ограничения фильтров. Его действие приводит к искажениям входного сигнала на его краях (см. направление ξ на рис. 4, а). Импульсные отклики устройства с функциями передачи $H_1(u) = k_1 u$, $H_2(u) = k_2 u^2$, $H_3(u) = k_3 u^3$ (см. рис. 3, б—г) соответствуют дифференцирующим звеньям для вычисления первых трех производных. На рис. 4, б—г приведены световые распределения в плоскости P_3 , соответствующие результатам дифференцирования. Нетрудно видеть, что вдоль направления ξ есть выбросы на краю изображения прямоугольного импульса, число которых определяется порядком производной.

В заключение автор считает своим долгом поблагодарить канд. техн. наук П. Е. Твердохлеба за советы и замечания при подготовке к печати данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. J. Cutrona, E. N. Leith, C. J. Palermo, L. J. Porcello. Optical Data Processing and Filtering Systems.— IRE Trans., 1960, June, IT — 6, № 3. Русский перевод: За рубежом радиотехника, 1962, № 10.
2. F. Scott. The Production of Variable — Transmission Sinusoidal Patterns and Other Images.— Photographic Science and Engineering, 1965, v. 9, № 2.
3. В. А. Бургов. Основы записи и воспроизведения звука. М., «Искусство», 1954.
4. И. С. Гибин, А. Г. Козачок, Е. С. Нежевенко, Ю. Н. Солодкин, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Анализ спектров одномерных сигналов оптическими методами.— Автометрия, 1971, № 1.

Поступила в редакцию
4 апреля 1972 г.