

ВЫВОДЫ

Представление чисел в системе остаточных классов с использованием предложенных рациональных алгоритмов выполнения операций позволяет применить в АУ, основанных на принципах табличной арифметики, ПЗУ с объемом памяти, вполне реальном в ближайшем будущем ($10^5 \div 10^6$ бит). Использование таких модулей в табличных АУ с временем выборки порядка десятков наносекунд позволяет создать арифметические устройства с фиксированной запятой с быстродействием порядка десятков миллионов операций в секунду независимо от разрядности операндов. Существенным преимуществом АУ табличного типа в системе остаточных классов, кроме быстродействия, является схемотехническая и конструктивная модульность и функциональная простота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Камме. Проектирование сложных логических устройств с помощью типовых ПЗУ.— «Электроника», 1970, т. 43, № 1.
2. А. Хемел. Выполнение операций с помощью ПЗУ.— «Электроника», 1970, т. 43, № 10.
3. И. И. Коршевер, Г. Г. Матушкин, П. Е. Твердохлеб. Цифровые функциональные преобразования на основе оптических запоминающих устройств.— «Автометрия», 1974, № 1.
4. И. Я. Акушский, Д. И. Юдицкий. Машинная арифметика в остаточных классах. М. «Сов. радио», 1968.
5. Л. А. Орлов, Ю. М. Попов. Оптоэлектронное арифметическое устройство в системе остаточных классов.— «Автометрия», 1972, № 6.
6. А. Свобода. Развитие вычислительной техники в Чехословакии. Система счисления остаточных классов.— «Кибернетический сборник». М. «Мир», 1964, № 8.
7. И. Я. Акушский и др. Преобразователь кода из системы остаточных классов в полиадический код.— Авт. свид-во № 328448. ОИПОТЗ, 1972, № 6.
8. Jules H. Gildg. Memories turn to never materials, but care hangs on of the old reliable. — "Electronic Design", 1973, № 11.
9. Оптическое ПЗУ.— «Экспресс-информация. ВТ», 1971, № 44.

*Поступила в редакцию 14 июня 1974 г.;
окончательный вариант — 6 января 1975 г.*

УДК 621.378:681.33

В. И. ФЕЛЬДБУШ, Ю. В. ЧУГУИ

(Новосибирск)

КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛУЭТНЫХ ФИЛЬТРОВ

Многоканальная фильтрация сигналов (радиочастотных, оптических, ультразвуковых и т. д.) — одно из перспективных применений когерентно-оптических систем обработки информации. Задача синтеза таких систем сводится, как известно, к задаче синтеза фильтров пространственных частот [1]. Реализация фазовых и амплитудных компонентов фильтров предполагает использование многоградационных фазовых, а также полутонных транспарантов с большим диапазоном пропускания, изготовление которых связано с серьезными технологическими трудностями. Правда, эти трудности частично преодолеваются при получении фильтров по методу Вандер Люгта [2]. Однако в этом случае удается получать лишь согласованные фильтры.

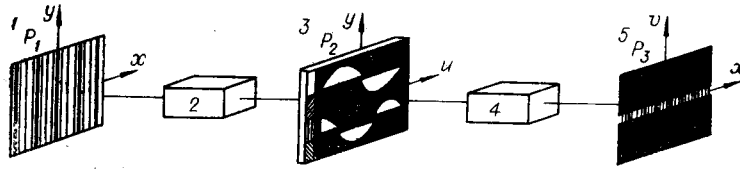


Рис. 1. Структурная схема оптической системы комплексной фильтрации с полутонным вводом обрабатываемого сигнала.

Эффективный путь решения этой задачи состоит в применении двухградационных фильтров с силуэтной записью передаточных функций (силуэтных фильтров) [3, 4]. Такие фильтры просты в изготовлении и имеют лучшие характеристики в сравнении с полутонными. Дополняя их полуволновой фазовой пластинкой, можно формировать биполярные передаточные функции [3].

В настоящей работе изложены результаты дальнейших исследований в этом направлении. Показано, что силуэтные фильтры можно применять для синтеза когерентно-оптических систем не только с биполярными, но и комплексными передаточными функциями. Предложено несколько вариантов таких систем, реализующих комплексную одно- и многоканальную фильтрацию сигналов. Системы обладают повышенной точностью вычислений, что является следствием применения фильтров с силуэтными изображениями передаточных функций. Приведены экспериментальные результаты по фильтрации (в том числе инверсной) тестовых сигналов.

Принцип силуэтной комплексной фильтрации сигналов. Покажем, что на основе силуэтных фильтров и четырехградационной фазовой пластинки можно производить комплексную фильтрацию сигналов. При этом обрабатываемый сигнал может вводиться в оптическую систему в виде полутонного или силуэтного изображений. Использование силуэтных изображений позволяет расширить класс обрабатываемых сигналов до биполярных и даже комплексных.

Принцип фильтрации поясняется схемой, показанной на рис. 1. Исходный транспарант 1 с записью сигнала $f(x)$ в виде амплитудного распределения

$$f_D(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{A}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{D}\right) f(x), \quad (1)$$

где

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

размещается в плоскости P_1 . Оптическим звеном 2 выполняется одномерное преобразование Фурье, при котором в плоскости P_2 формируется амплитудное распределение света, пропорциональное

$$\dot{F}_{D'}(u) = \text{rect}\left(\frac{y}{D'}\right) \dot{F}(u) \quad (2)$$

($\dot{F}(u)$) — спектр сигнала $f(x)$, а D' — размер светового распределения по оси y).

Распределение (2) далее модулируется силуэтным составным фильтром 3. Такой фильтр реализует комплексную передаточную функцию $H(u) = H_{\text{Re}}(u) + jH_{\text{Im}}(u)$, где $H_{\text{Re}}(u)$ и $H_{\text{Im}}(u)$ — действительная и мнимая ее составляющие. Каждая из составляющих записывается на фильтре в силуэтном виде на своей дорожке, смещенной относительно оси u на

величину $\pm c$ (рис. 2, а), где $c = \max[|H_{\text{Re}}(u)|, |H_{\text{Im}}(u)|] + 2\epsilon$ (2ϵ — промежуток между изображениями составляющих $H_{\text{Re}}(u)$, $H_{\text{Im}}(u)$, а также между изображениями их положительной и отрицательной частей)*. При этом используется четырехградационная фазовая пластинка, осуществляющая сдвиг фазы проходящей волны света на изображениях положительной и отрицательной частей $H_{\text{Re}}(u)$ и $H_{\text{Im}}(u)$ по закону $0, \pi, \pi/2, 3\pi/2$ (см. рис. 2, б). Амплитудное пропускание составного фильтра можно описать выражением

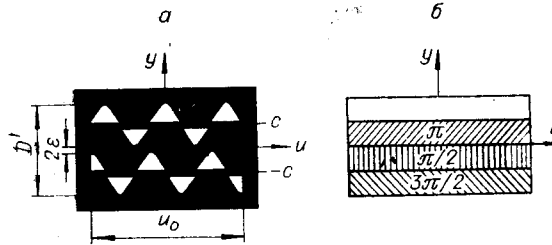


Рис. 2. Амплитудный и фазовый компоненты силуэтного составного фильтра.

$$\begin{aligned} \dot{T}(u, y) = & \text{rect}\left(\frac{u}{u_0}\right) \text{rect}\left\{\frac{y - H_{\text{Re}}(u)/2 - c - \epsilon \text{sign}[H_{\text{Re}}(u)]}{|H_{\text{Re}}(u)|}\right\} \text{sign}(y - c) + \\ & + j \text{rect}\left(\frac{u}{u_0}\right) \text{rect}\left\{\frac{y - H_{\text{Im}}(u)/2 + c - \epsilon \text{sign}[H_{\text{Im}}(u)]}{|H_{\text{Im}}(u)|}\right\} \text{sign}(y + c). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь u_0 — размер фильтра по оси u , $\text{sign}(z)$ — знаковая функция, причем

$$\text{sign}(z) = \begin{cases} 1 & \text{для } z > 0; \\ 0 & \text{для } z = 0; \\ -1 & \text{для } z < 0. \end{cases}$$

В результате двумерного преобразования Фурье, выполняемого звеном 4 (см. рис. 1), и применения в плоскости P_3 операции узкополосной фильтрации на выходе фильтра 5, полуширина которого $\Delta v \ll \ll 2\pi/D'$, получим распределение

$$\begin{aligned} g_{\Delta v}(x) = & \text{rect}\left(\frac{v}{2\Delta v}\right) \int_{-u_0/2}^{u_0/2} \int_{-D'/2}^{D'/2} \dot{F}_D(u) \dot{T}(u, y) e^{j(ux+vy)} dudy \approx \text{rect}\left(\frac{v}{2\Delta v}\right) \times \\ & \times \int_{-u_0/2}^{u_0/2} \dot{F}(u) \dot{H}(u) e^{jux} du = \text{rect}\left(\frac{v}{2\Delta v}\right) [f(x) \otimes h(x)], \end{aligned} \quad (4)$$

где $h(x)$ — импульсный отклик системы, связанный с $H(u)$ преобразованием Фурье.

Таким образом, путем модуляции силуэтного составного фильтра (с записью комплексной передаточной функции) спектром обрабатываемого сигнала и последующих операций двумерного преобразования Фурье и узкополосной фильтрации полученного светового распределения вычисляется свертка сигнала с данным импульсным откликом.

Описанная схема фильтрации проста в реализации. Ее недостатки — необходимость точной установки узкополосного фильтра, а также невысокий коэффициент использования светового потока в плоскости P_3 .

Указанных недостатков можно избежать при применении многодорожечного силуэтного фильтра [5]. В этом случае пропускание составного фильтра с записью, например, биполярной передаточной функции

* Здесь и далее для простоты нами опущены масштабные множители, появляющиеся при силуэтной записи функций на фильтре.

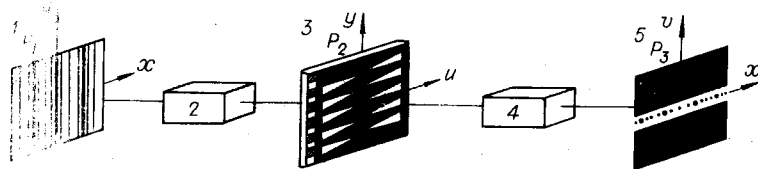


Рис. 3. Структурная схема системы фильтрации с многодорожечным фильтром.

на N параллельных дорожках (для удобства выбрано нечетным) имеет вид

$$T(u, y) = \text{rect}\left(\frac{u}{u_0}\right) \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \text{rect}\left\{\frac{y - H(u)/2 - \varepsilon \text{sign}[H(u)] - nd}{|H(u)|}\right\} \text{sign}(y - nd), \quad (5)$$

где $d = D/N$ — расстояние между дорожками. При этом в (5) предполагается, что амплитуда силуэтной записи $H(u)$ не превышает $d/2$.

Соответствующая схема системы фильтрации приведена на рис. 3. Элементы 1, 2 и 4 этой схемы идентичны элементам предшествующей, а элементы 3, 5 обозначают многодорожечный силуэтный (составной) и полосовой фильтры. Если полуширину Δv_N фильтра 5 выбрать из условия $\Delta v_N = \frac{2\pi}{D} k$, где $k \leq 0,3N$, то, согласно [5], с учетом (4) и (5) распределение поля на его выходе изменяется по закону

$$g_{\Delta v_N}(x) = \text{rect}\frac{v}{2\Delta v_N} H_N(v) [f(x) \otimes h(x)]. \quad (6)$$

Здесь функция $H_N(v) = \frac{\sin(Ndv/2)}{\sin(dv/2)}$ описывает результат интерференции света от N идентичных дорожек силуэтного фильтра 3. Эта функция является аналогом фильтра, выделяющего автоматически искомое направление считывания в плоскости P_3 . Снижение чувствительности системы к погрешности установки фильтра 5 объясняется характером поведения функции $H_N(v)$ в окрестности $|v| \leq \Delta v_N$.

В случае обработки силуэтного изображения сигнала $f(x)$ (в общем случае комплексного) схема системы фильтрации имеет вид, показанный на рис. 4. Исходный составной транспарант 1 с многодорожечной силуэтной записью сигнала $f(x)$ устанавливается в плоскости P_1 . С помощью звена 2 выполняется преобразование силуэтного изображения сигнала в полутонное вида (1). Способ дальнейшей обработки полученного распределения аналогичен описанному ранее (элементы 3—6 этой схемы соответствуют элементам 2—5 на рис. 3).

Отметим, что применение узкополосного (полосового) фильтра в системах фильтрации необязательно. Его роль, например, может выполнять диафрагма фотоприемника или соответствующий размер сканирующего элемента.

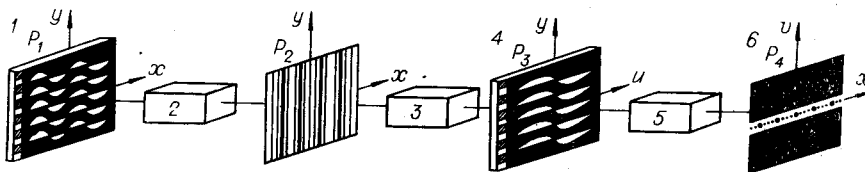


Рис. 4. Структурная схема системы фильтрации с силуэтным вводом обрабатываемого сигнала.

Системы фильтрации сигналов. Рассмотрим теперь принципиальные схемы когерентно-оптических систем фильтрации. Многообразие таких систем обусловлено в основном возможностью реализации преобразования вида (2) звеньями с различной конфигурацией оптической системы, определяемой, как показано ниже, шириной дорожки D полутоновой записи обрабатываемого сигнала. Этот параметр зависит от используемых устройств ввода сигналов и может изменяться в широких пределах.

Для полноты картины нами наряду с вновь предложенными системами фильтрации анализируется известная (асигматическая) система, описанная в [3].

Астигматическая система а. Принципиальная схема этой системы (в двух проекциях) представлена на рис. 5, а, б. Исходный транспарант 1 с полутоновой записью сигнала размещается в плоскости P_1 и освещается плоской монохроматической волной света. Совместным действием цилиндрического и сферического объективов 2 и 3 производится проектирование транспаранта 1 по координате y в плоскость P_2 фильтра 4, а по координате x — преобразование Фурье. Двумерное преобразование Фурье выполняется цилиндрическим и сферическим объективами 5 и 6. Наличие астигматической системы для двумерного преобразования Фурье необходимо для того, чтобы плоскости наблюдения преобразования Фурье по координатам x и η совпадали. При этом параметр силуэтного фильтра D' выбирается из условия $D' \leq Df_2/f_1$.

Такая система позволяет проводить и многоканальную обработку сигналов $f_i(x)$, где $i=1, 2, \dots, M$, путем применения фильтра с силуэтной записью в виде параллельных дорожек передаточных функций $H_i(u)$ и последующей дополнительной «развязки» сигналов $g_i(x)$ по координате η в плоскости P_3 . «Развязка», например, может быть осуществлена с помощью решеток с различной пространственной частотой, установленных в области изображений функций $H_i(u)$.

К достоинству астигматической оптической системы следует отнести возможность проведения в ней многоканальной обработки сигналов, а к недостатку — необходимость использования большого количества объективов, дефекты которых (царапины, неоднородности) могут давать повышенный уровень оптического шума. Кроме того, использование анаморфотной оптики связано с повышением требований к точности юстировки элементов системы по ориентации.

С целью устранения указанных недостатков предложены другие оптические системы.

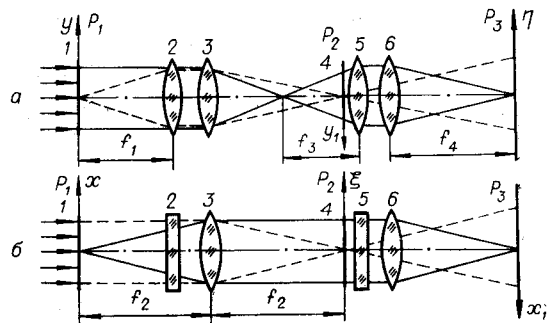


Рис. 5. Схема астигматической системы фильтрации.

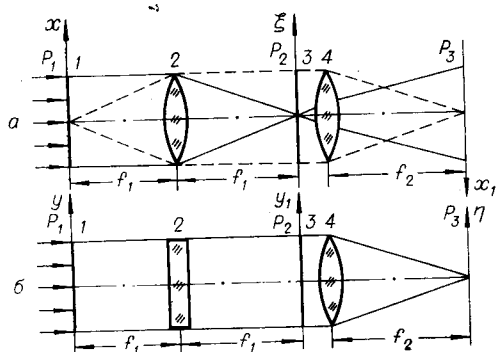


Рис. 6. Схема системы фильтрации с геометрическим проектированием.

Система с геометрическим проектированием. Рассмотрим оптическую систему, приведенную на рис. 6, а, б, где 1 — транспарант с полутоновой записью сигнала $f(x)$, 2 — цилиндрический объектив, 3 — силуэтный фильтр, 4 — сферический объектив. В системе отсутствуют оптические элементы, проектирующие плоскость P_1 в P_2 по координате y , поэтому размеры транспаранта по оси y в этих плоскостях в геометрическом приближении одинаковы.

Из-за дифракции света происходит размытие размера D транспаранта. Для того чтобы при заданных длине волны излучения лазера λ и расстоянии $z=2f_1$ дифракционные явления были незначительны, величина D должна быть такой, чтобы характерный размер соответствующей дифракционной картины был намного меньше D , т. е.

$$\lambda z/D \ll D. \quad (7)$$

Условие (7), как известно, соответствует слабой дифракции Френеля. Полагая $\lambda=0,6 \cdot 10^{-3}$ мм, $z=600$ мм, $D=10$ мм, находим, что при таких параметрах условие (7) легко выполняется: $\lambda z/D^2=0,4 \cdot 10^{-3} \ll 1$. Для уменьшения влияния дифракции света размер силуэтного фильтра D' выберем согласно равенству

$$D'=D/s, \quad (8)$$

где s — коэффициент запаса ($s > 1$). При $s=1,5$ из (8) получаем $D'=6$ мм.

Система с геометрическим проектированием выгодно отличается от предыдущей тем, что содержит всего два фокусирующих элемента. Это позволяет снизить ее шумы. Наличие в системе лишь одного цилиндрического объектива упрощает ее юстировку и не приводит к заметным

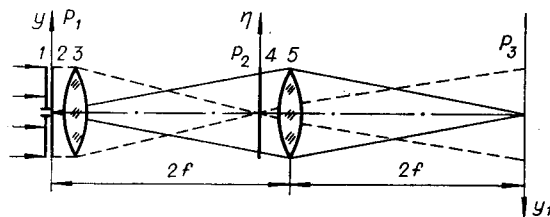


Рис. 7. Схема системы фильтрации со щелевой диафрагмой.

ухудшениям ее пространственно-частотных характеристик. Такая система пригодна для обработки сигналов с шириной дорожки записи, удовлетворяющей условию (7). В противном случае этот размер должен быть предварительно увеличен (с помощью телескопической системы).

Система со щелевой диафрагмой. Эта система представлена на рис. 7, где 1 — щелевая диафрагма; 2 — транспарант с полутоновой записью сигнала $f(x)$; 3, 5 — сферические объективы; 4 — силуэтный фильтр. В отличие от двух предыдущих систем она не содержит цилиндрической оптики, что является ее достоинством.

Для формирования в плоскости P_3 амплитудного распределения (1), слабо меняющегося в пределах размера D' фильтра 4, в данной системе используется явление дифракции света на диафрагме 1. Выбором ее ширины D можно обеспечить требуемую равномерность светового распределения по оси y в пределах фильтра 4.

Действительно, в результате двумерного преобразования Фурье над входным распределением (1) для поля в плоскости P_2 можно получить

$$\dot{F}(\xi, \eta) = \dot{F}\left(\frac{2\pi}{\lambda f} \xi\right) \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda f} D \eta\right)}{\pi \eta / \lambda f}, \quad (9)$$

где ξ, η — координаты плоскости P_2 , а f — фокусное расстояние объектива 3. Выберем D таким образом, чтобы на размере фильтра 4 второй

член в выражении (9) менялся незначительно, т. е. из условия

$$\frac{2\lambda f}{D} \gg D'. \quad (10)$$

Проведенные расчеты показывают, что при $D' = \lambda f / 5D$ изменение амплитуды поля в пределах $[-D'/2, D'/2]$ не превышает 3%. Полагая $f = 1,5 \cdot 10^3$ мм, $D' = 2$ мм, $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-3}$ мм, получим, что величина D должна составлять 0,09 мм.

К недостаткам системы со щелевой диафрагмой следует отнести низкий коэффициент использования светового потока лазерного излучения. Кроме того, в такой системе предъявляются жесткие требования к стабильности размера D диафрагмы в пределах апертуры системы $[-A/2, A/2]$. Согласно (9), изменение этого размера по закону $\tilde{D} = D'[1 + \mu(x)]$ приводит к тому, что в плоскости P_2 вместо спектра функции $f(x)$ наблюдается спектр функции $[1 + \mu(x)]f(x)$. Отсюда например, следует, что при указанных выше параметрах оптической системы и допустимом искажении $f(x)$ на 1% величина флюктуаций $\mu(x)D$ размера диафрагмы не должна превышать 0,001 мм.

Система со сфокусированным освещением. Недостатки оптической системы со щелевой диафрагмой устраняются в системе, схема которой приведена на рис. 8, а, б. Кроме двух сферических

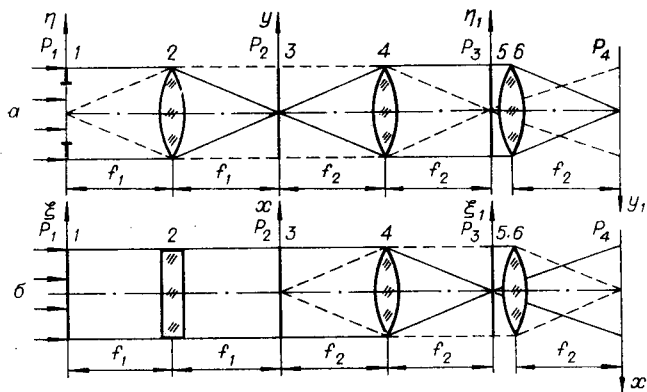


Рис. 8. Схема системы фильтрации со сфокусированным освещением.

объективов 4 и 6 эта система содержит дополнительный цилиндрический объектив 2, в передней фокальной плоскости P_1 которого установлена диафрагма 1. С помощью объектива 2 световой поток, прошедший через диафрагму 1, фокусируется на входном транспаранте 3, в результате чего более рационально используется световой поток на входе системы.

В такой системе не происходит потери светового потока и в плоскости P_3 . Действительно, пренебрегая дифракцией света вдоль оси ξ , в плоскости P_2 получим распределение

$$G(y) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda f_1} D y\right)}{\pi y / \lambda f_1}, \quad (11)$$

где f_1 — фокусное расстояние объектива 2, а D — размер диафрагмы. Распределение $G(y)$ модулируется далее транспарантом 3 с записью обрабатываемого сигнала. Если теперь над результирующим распределением произвести преобразование Фурье, то поле в плоскости P_3 будет иметь вид

$$\hat{F}_D(\xi_1) = \text{rect} \frac{\eta_1}{D'} \hat{F}(\xi_1). \quad (12)$$

Здесь $D' = f_2 D / f_1$. Нетрудно заметить, что преобразования (11) и (12) соответствуют проектированию диафрагмы 1 из плоскости P_1 в плоскость силуэтного фильтра 5 с пространственной фильтрацией поля в промежуточной плоскости P_2 . Следовательно, в рассмотренной системе в отличие от системы со щелевой диафрагмой полностью используется световой поток, прошедший через элемент 3.

С помощью оптической системы со сфокусированным освещением можно проводить многоканальную обработку сигналов, идентичную по всем каналам. Для этого в плоскости P_1 необходимо поместить расщепитель падающего пучка, формирующий в P_2 набор световых распределений $G_i(y)$ с периодом, равным ΔD . Расщепитель может быть изготовлен, например, голографическим путем.

Оценим возможное при этом число каналов обработки. Пусть размер рабочего поля системы в плоскости P_1 и однодорожечного фильтра по оси y равен D , а число амплитудных уровней передаточной функции — m , что соответствует динамическому диапазону силуэтной записи $L = 20 \lg m$ (дБ). Тогда величина ΔD будет определяться из условия отсутствия наложения дифракционных картин, соответствующих соседним каналам, т. е.

$$\Delta D = 2\lambda f m / D, \quad (13)$$

где принято, что $f_1 = f_2 = f_3 = f$. С учетом (13) число каналов можно определить по формуле

$$M = D / \Delta D = D^2 / 2\lambda f m. \quad (14)$$

Если $D = 50$ мм, $m = 100$ ($L = 40$ дБ), $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-3}$ мм, $f = 500$ мм, то получим, что $M = 40$.

В случае использования многодорожечного силуэтного фильтра

$$M = D^2 / 2\lambda f m_N, \quad (15)$$

где $m_N = m / N$. Если $N = 4$, то $M = 10$.

Отметим, что в оптической системе со сфокусированным освещением предъявляются повышенные требования к допустимому уровню зернистости регистрирующей среды транспаранта 3. Это связано с тем, что этот транспарант помещается в плоскость фокусировки входного пучка, характерный размер которого при указанных выше параметрах λ , f и D составляет десятки микрон.

Системы с двухградационным заданием входных сигналов. Перейдем теперь к оптическим системам фильтрации силуэтных изображений сигналов. На рис. 9, а, б приведена принципиальная схема одной из таких систем, соответствующая ранее описанной структурной схеме (см. рис. 5). Она содержит транспарант 1 с много-

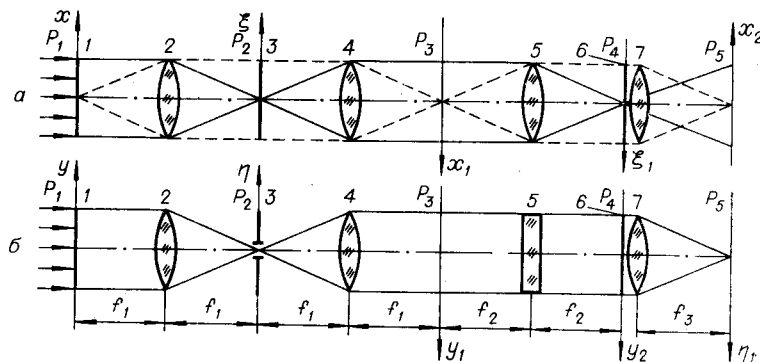


Рис. 9. Схема системы фильтрации с преобразованием силуэтного изображения сигнала в полутоновое.

дорожечной записью сигнала $f(x)$; сферические объективы 2, 4, 7; полосовой фильтр 3; многорожечный силуэтный фильтр 6 и цилиндрический объектив 5.

Элементы 1—4 являются компонентами системы, осуществляющей преобразование силуэтного изображения сигнала в полутоновое. Действительно, распределение амплитуды поля за полосовым фильтром 3 равно

$$\dot{F}_{\Delta v_N}(u) = \text{rect}\left(\frac{v}{2\Delta v_N}\right) H_N(v) \dot{F}(u), \quad (16)$$

где $u = \frac{2\pi}{\lambda f_1} \xi$, $v = \frac{2\pi}{\lambda f_1} \eta$.

Выберем $\Delta v_N = \frac{2\pi}{D} k$, где $k \leq N/2$. Тогда можно показать, что при выполнении объективом 4 обратного преобразования Фурье в случае $N \gg 1$ поле в плоскости P_3 имеет вид

$$F^{-1}\{\dot{F}_{\Delta v_N}(u)\} \approx \text{rect}\left(\frac{x}{A}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{D'}\right) f(x). \quad (17)$$

Здесь $F^{-1}\{\cdot\}$ обозначает обратное двумерное преобразование Фурье, а $D' \leq D$. Таким образом, в результате низкочастотной фильтрации (по оси η) изображения с многорожечной силуэтной записью сигнала $f(x)$ формируется полутоновое распределение вида (17), которое далее может обрабатываться, например, в оптической системе с геометрическим проектированием (объективы 5, 7 и фильтр 6).

Схема оптической системы, в которой преобразование силуэтного изображения сигнала в полутоновое совмещено с преобразованием Фурье, показана на рис. 10, а, б, где 1 — транспарант с силуэтным изображением сигнала $f(x)$; 2, 6 — цилиндрические объективы; 3 — полосовой фильтр; 4 — сферический объектив; 5 — силуэтный фильтр.

В данной системе элементами 2—4 производится фильтрация входного изображения по координате y . При этом сферическим объективом 4 по координате x выполняется преобразование Фурье сигнала $f(x)$. Обратное двумерное преобразование светового распределения, прошедшего через силуэтный фильтр 5, осуществляется объективами 4 и 6, проектирующими плоскости P_1 и P_2 по координатам x и η в плоскость P_4 .

Рассмотренная оптическая система по сравнению с предыдущей содержит меньшее количество оптических элементов. Однако применение в системе двух цилиндрических объективов приводит к сложностям ее юстировки.

Таким образом, при выборе той или иной системы фильтрации необходимо учитывать ширину дорожки D полутоновой записи обрабатываемого сигнала, поскольку сложность системы и ее характеристики во многом определяются этим параметром. Проведенный анализ показывает, что при больших D лучшие характеристики по точности вычислений следует ожидать от системы с геометрическим проектированием, а при малых D — от системы со сфокусированным освещением. В случае промежуточных значений D может быть рекомендована астигматическая система фильтрации.

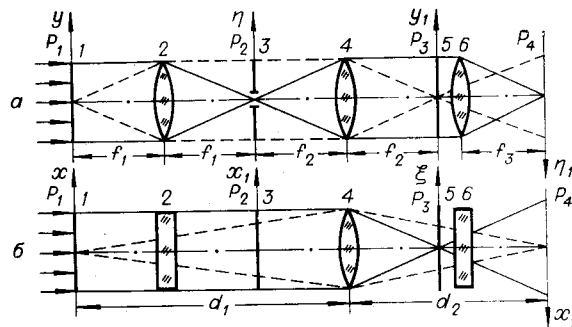


Рис. 10. Схема системы фильтрации с преобразованием силуэтного изображения сигнала в его спектр Фурье.

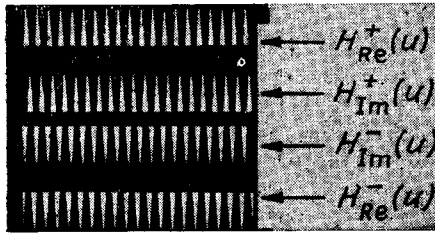


Рис. 11. Амплитудный компонент силуэтного фильтра, реализующего передаточную функцию $H(u) = e^{ja u}$.

Пример комплексной фильтрации. В качестве силуэтного фильтра использовался фильтр, реализующий комплексную передаточную функцию $H(u) = e^{ja u} = \cos au + j \sin au$, где $a = 40\pi/u_0$. Размеры фильтра — 20×20 мм. Его амплитудный компонент показан на рис. 11, где H_{Re}^+ (H_{Re}^-) и H_{Im}^+ (H_{Im}^-) — положительные (отрицательные) части действительной и мнимой составляющих функций $H(u)$. Построение контуров частей этих составляющих осуществлялось плоттером НР9862А, управляемым от мини-ЭВМ НР9820А.

Фазовый компонент фильтра формировался с помощью полуволновой и четвертьволновой пластинок, изготовленных методом напыления в вакууме сернистого цинка на стеклянную подложку. Пластинки располагались друг за другом, причем четвертьволновая пластинка осуществляла сдвиг фазы проходящей волны света на $\pi/2$ в области изображений функций $H_{Im}^+(u)$ и $H_{Im}^-(u)$, а полуволновая — на π в области изображений функций $H_{Re}^+(u)$ и $H_{Re}^-(u)$. Таким путем моделировался четырехградационный фазовый фронт.

Фильтрация проводилась в астигматической оптической системе. Результаты сканирования импульсного отклика системы с указанным фильтром представлены (в относительных единицах) в таблице.

Можно видеть, что импульсный отклик, кроме ожидаемого $+1$ -го дифракционного порядка, содержит и дополнительные. Их появление в отклике обусловлено неточностью задания фазовой составляющей функции $H(u)$. Максимальная интенсивность этих порядков составляет 7,2% от интенсивности $+1$ -го порядка.

В качестве сигнала выбирался прямоугольный импульс (щель). На рис. 12 приведен вид светового распределения в плоскости P_3 . Наличие фильтра приводит к смещению сигнала на выходе, т. е. появлению его в $+1$ -м дифракционном порядке. Эффект мультиплицирования сигнала объясняется характером импульсного отклика фильтра.

Таким образом, результаты экспериментов свидетельствуют о возможности осуществления комплексной фильтрации сигналов силуэтными фильтрами.

Устранение влияния аппаратной функции прибора. Если прибор относится к классу линейных инвариантных систем, то вносимое им искажение сигнала $g(x)$ описывается интегралом свертки.

Практически на искаженный сигнал $f(x)$ всегда накладывается выходной шум прибора и шум регистратора $n(x)$ (например, шумы зернистости фотопленки), и при аддитивном характере шумов выходной сигнал прибора имеет вид

Описанные системы допускают многоканальную обработку сигналов, причем число каналов при заданных параметрах оптической системы и динамическом диапазоне силуэтных фильтров в 40 дБ может достигать нескольких десятков.

С целью проверки работоспособности некоторых из рассмотренных ранее систем силуэтной фильтрации, а также изучения их возможных применений проводились эксперименты по обработке тестовых сигналов.

| Номер дифракционного порядка | Теоретические значения интенсивности | Экспериментальные значения интенсивности |
|------------------------------|--------------------------------------|--|
| -2 | 0 | 0,072 |
| -1 | 0 | 0,052 |
| 0 | 0 | 0,051 |
| +1 | 1 | 1 |
| +2 | 0 | 0,046 |

$$f(x) = g(x) \otimes h(x) + n(x), \quad (18)$$

где $h(x)$ — аппаратная функция (импульсный отклик прибора).

В связи с этим возникает задача восстановления сигнала $g(x)$ по известным $f(x)$ и $h(x)$. Это соответствует апостериорному повышению разрешающей способности прибора. Задачи такого рода относятся к классу обратных задач и представляют интерес, например, для спектроскопии [6, 7].

Решение ее линейными методами сводится к формированию корректирующей аппаратной функции $\tilde{h}(x)$ (или фильтра с передаточной функцией $\tilde{H}(u) = F\{\tilde{h}(x)\}$). Если на вход системы с аппаратной функцией $h(x)$ подать сигнал $f(x)$, то на ее выходе получим оценку исходного сигнала

$$\tilde{g}(x) = f(x) \otimes \tilde{h}(x) = [g(x) \otimes h(x) + n(x)] \otimes \tilde{h}(x). \quad (19)$$

В качестве восстанавливающего фильтра может быть выбран фильтр, минимизирующий среднеквадратическую погрешность отклонения сигнала $g(x)$ от его оценки $\tilde{g}(x)$, с передаточной функцией

$$\tilde{H}(u) = \frac{\dot{H}^*(u)}{|\dot{H}(u)|^2 + N(u)/|\dot{G}(u)|^2}, \quad (20)$$

где $\dot{G}(u)$, $\dot{H}(u)$ — спектры Фурье сигнала $g(x)$ и аппаратной функции $h(x)$, а $N(u)$ — спектр мощности шума [8]. Такой фильтр в отличие от инверсного учитывает поведение отношения сигнал/шум $|\dot{G}(u)|^2/N(u)$ в диапазоне изменения u . В ряде случаев это отношение достаточно положить равным константе.

Так как восстанавливающие фильтры имеют большой динамический диапазон (40—60 дБ) и синтез их (в виде полутонных транспарантов) связан с выполнением довольно трудоемких операций [9], то для решения задачи устранения влияния аппаратной функции представляется целесообразным использовать силуэтные фильтры.

Нами проведены эксперименты по восстановлению размытых сигналов с записью их как в полутонном, так и в силуэтном видах (случай одноканальной обработки).

При полутонной записи сигнала аппаратная функция моделировалась прямоугольным импульсом (случай «смаза»), т. е.

$$h(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta}\right), \quad (21)$$

где Δ — ширина импульса.

Для аппаратной функции (21) спектр Фурье $H(u)$, приведенный к значению $H(0)$, равен $H(u) = \sin(\Delta u)/(\Delta u)$. В этом случае при $N(u)/|G(u)|^2 = \alpha$ передаточная функция корректирующей системы

$$\tilde{H}(\omega) = \frac{\omega \sin \omega}{(\omega \sin \omega)^2 + \alpha \omega^2}, \quad (22)$$

где $\omega = \Delta u$. Значение α выбиралось равным 10^{-3} , а $\Delta = 0,26$ мм. Размеры фильтра — 8×24 мм (рис. 13). Восстановление проводилось в астигматической системе (см. рис. 5) с параметрами $f_1 = f_3 = 280$ мм, $f_2 = f_4 = 300$ мм.

Исследовались возможности уменьшения ширины аппаратной функции (22). Для этого на вход системы подавался прямоугольный импульс с $\Delta = 0,26$ мм. На рис. 14, а показан вид светового распределе-



Рис. 12. Результат фильтрации прямоугольного импульса силуэтным фильтром с записью передаточной функции $\tilde{H}(u) = e^{ja^2u}$.

Рис. 13. Силуэтный фильтр, восстанавливающий размытый сигнал (устранение влияния прямоугольной аппаратной функции).

риной 1; 0,5; 0,26; 0,1 мм и с периодами 2; 1; 0,52; 0,36 мм. Полутоновой прозрачный с амплитудным пропусканием $f(x)$ получался с помощью одномерного интегрирующего звена, описанного в [10]. На входе этого звена размещался прозрачный с силуэтным изображением сигнала, соответствующего результату свертки сигналов $g(x)$ и $h(x)$. Регистрация выходного светового распределения проводилась в линейной области Т—Е-характеристики фотопленки КН-1. На рис. 15, а приведен вид исходного прозрачного с записью сигнала $f(x)$, подлежащего восстановлению.

Характер сигнала на выходе оптической системы при отсутствии фильтра показан на рис. 15, б (см. распределение интенсивности света вдоль оси x), а улучшенный вариант этого сигнала — на рис. 15, в. Следует отметить хорошее качество восстановления. На рис. 15, в легко обнаруживаются самые узкие импульсы, ширина которых в 2,6 раза меньше ширины аппаратной функции.

На увеличенном изображении восстановленного сигнала можно заметить неполное восстановление импульсов. Это объясняется тем, что фильтр с передаточной функцией (22) восстанавливает не все пространственные частоты.

Эксперименты по восстановлению сигнала, заданного на прозрачном в силуэтном виде, проводились на основе системы фильтрации, приведенной на рис. 10, с параметрами $f_1=f_3=280$ мм, $f_2=450$ мм. В качестве $h(x)$ выбирались характерные аппаратные функции вида (21) с $\Delta=0,26$ мм (случай а) и гауссоида

$$h(x) = e^{-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}, \quad (23)$$

где $\sigma=0,256$ мм (случай б).

В случае а сигнал $g(x)$ представлял собой последовательность прямоугольных импульсов с переменной шириной 0,05; 0,1; 0,26; 0,4; 0,9 мм и разными периодами соответственно 0,31; 0,36; 0,52; 0,8; 1,8 мм. С помощью плоттера НР9862А изготовлялся оригинал с контурной многодорожечной записью сигнала $f(x)$. Путем дальнейшей обработки контурная запись превращалась в силуэтную и из такого оригинала фоторедуцированием получался многодорожечный силуэтный прозрачный, показанный на рис. 16.

На графиках рис. 17, а, б представлены результаты сканирования аппаратной функции (21) до и после обработки ее фильтром с пере-

тической системы восстанавливающего фильтра ширина $h(x)$ уменьшается почти в 8 раз (см. рис. 14, б) и составляет 30 мк.

В качестве исходного сигнала $g(x)$ выбиралась последовательность прямоугольных импульсов с переменной шириной 2; 1; 0,52; 0,36 мм.

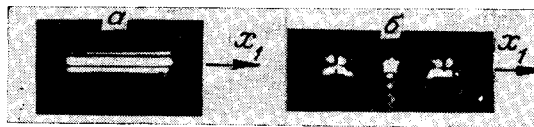


Рис. 14. Вид сигнала (аппаратной функции) на выходе системы при отсутствии (а) и при наличии (б) восстанавливающего фильтра (см. распределение интенсивности света вдоль оси x_1).

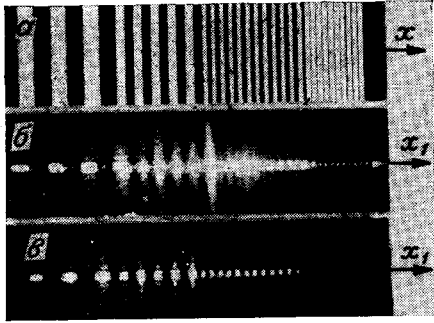


Рис. 15. Полутонное изображение размытого сигнала на входе (а) и выходе (б) системы (при отсутствии фильтра) и результат его восстановления (в).

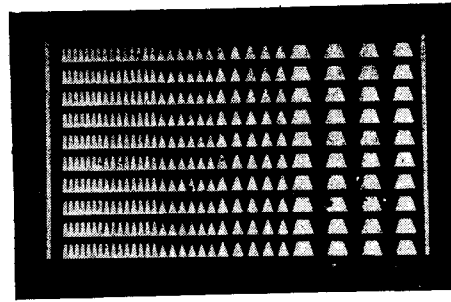


Рис. 16. Многодорожечный силуэтный транспарант с записью размытого сигнала (случай прямоугольной аппаратной функции). Ориентация транспаранта по углу производится по спектру меток (двух вертикальных щелей).

даточной функцией (22) (Δx — размер сканирующей диафрагмы фотоприемника вдоль оси x). Можно видеть, что полуширина результирующего импульсного отклика уменьшилась в 11 раз. Оценки показывают, что при $\Delta x \rightarrow 0$ значение полуширины восстановленной функции $h(x) \otimes \tilde{h}(x)$ близко к величине дифракционного размытия оптической системы.

На рис. 18, а, б показаны результаты сканирования светового распределения, соответствующего размытому прямоугольному импульсу шириной 50 мк до и после обработки его восстанавливающим фильтром. Полуширина восстановленного в результате экспериментов сигнала $|g_s(x)|^2 \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta x}\right)$ составляет 100 мк (кривая 1 на рис. 18, б).

Отличие этого сигнала от ожидаемого $|g_r(x)|^2 \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta x}\right)$ (кривая 2) объясняется конечными размерами диафрагмы фотоприемника и дифракционными ограничениями оптической системы.

В случае б в качестве исходного сигнала выбрана последовательность дельта-функций, расстояние между которыми δx принимало следующий ряд значений: 0,8; 0,7; 0,6; 0,40; 0,2 σ . Многодорожечный силуэтный транспарант с записью сигнала $f(x)$ показан на рис. 19. Такой характер сигнала соответствует часто встречающейся в спектроскопии ситуации выделения близких линий.

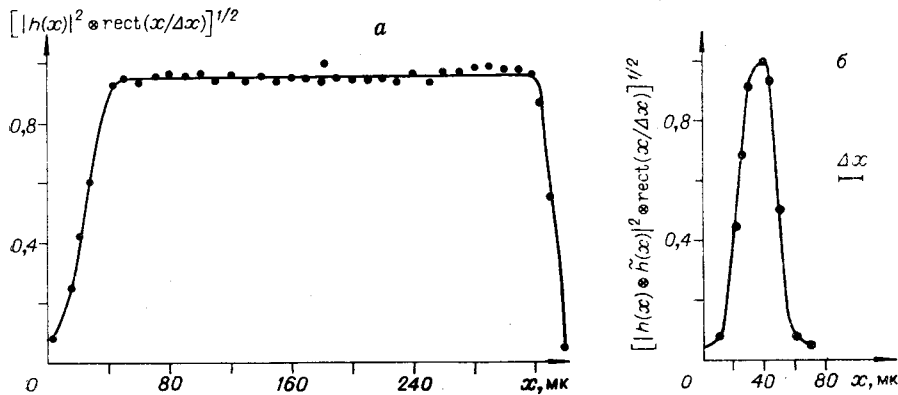


Рис. 17. Результаты сканирования прямоугольной аппаратной функции до (а) и после (б) обработки ее фильтром.

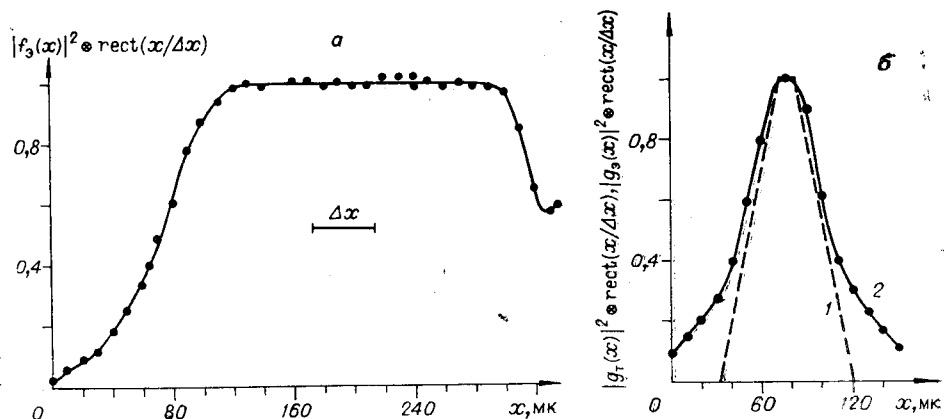


Рис. 18. Результаты сканирования размытого прямоугольного импульса до (а) и после (б) обработки его фильтром (кривая 2). Кривой 1 показан ожидаемый вид восстановленного сигнала.

Для восстановления сигнала $g(x)$ использовался многорожечный силуэтный фильтр, реализующий передаточную функцию

$$\tilde{H}(w) = \frac{e^{-w^2}}{e^{-2w^2} + \alpha}, \quad (24)$$

где $w = u\sigma/2$, а $\alpha = 10^{-4}$. Вид силуэтного фильтра показан на рис. 20.

Результаты сканирования сигнала $g(x)$ с $\delta x = 0,2; 0,7; 0,8\sigma$ до и после фильтрации представлены на рис. 21, а, б (кривые 1—3). Анализ полученных данных показывает, что полуширина аппаратной функции (23) уменьшилась в 2,5 раза. В результате этого произошло разделение двух близких спектральных линий с $\delta x = 0,8\sigma$. Так как амплитуда спектра гауссоиды сильно затухает на высоких частотах, то полученное значение увеличения разрешающей способности (2,5 раза) следует считать достаточно хорошим. Искажение формы кривых на рис. 21, б обусловлено погрешностью установки фильтра по ориентации.

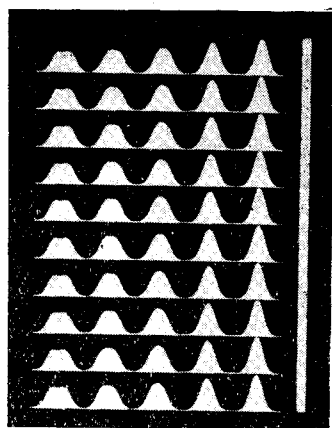


Рис. 19. Многорожечный силуэтный транспарант с записью размытого сигнала (случай гауссовой аппаратной функции).



Рис. 20. Многорожечный восстанавливающий фильтр для устранения влияния гауссовой аппаратной функции.

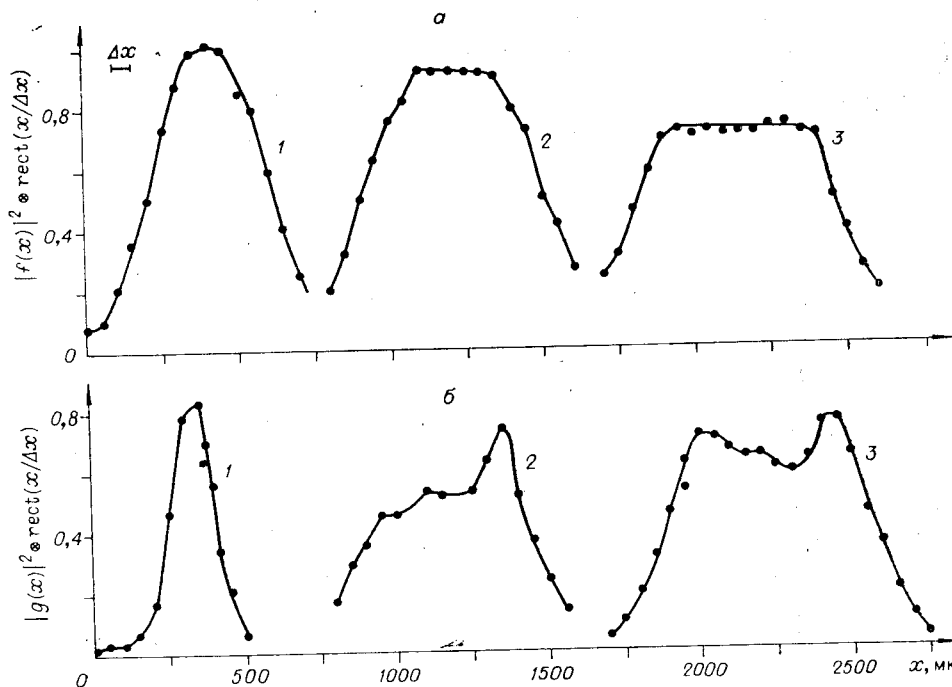


Рис. 21. Результаты сканирования сигнала, изображение которого показано на рис. 19, до (а) и после (б) восстановления его фильтром.

Из сравнения результатов восстановления сигналов, заданных в виде силуэтных и полутоновых изображений, можно сделать вывод о том, что в последнем случае достигается более эффективное уменьшение ширины аппаратной функции. Это объясняется повышенной точностью задания обрабатываемого сигнала при его двухградационной записи.

ВЫВОДЫ

1. Предложенные когерентно-оптические системы обработки на основе двухградационных транспарантов позволяют осуществлять комплексную фильтрацию сигналов с произвольным импульсным откликом. Это подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований. Обрабатываемые сигналы могут задаваться в полутоновом и силуэтном видах.

2. Системы фильтрации допускают многоканальную обработку с числом каналов порядка нескольких десятков при динамическом диапазоне фильтра в 40 дБ.

3. Среди рассмотренных систем фильтрации при малых значениях ширины дорожки D полутоновой записи сигнала лучшие характеристики по точности вычислений следует ожидать от системы со сфокусированным освещением, а при больших D — от системы с геометрическим проектированием. В случае промежуточных значений D может быть рекомендована астигматическая система.

4. Экспериментальные результаты, полученные при решении задачи устранения влияния аппаратной функции прибора, свидетельствуют о возможности эффективного применения предложенных систем фильтрации.

Такие системы могут быть также применены для синтеза заданных амплитудно-фазовых волновых фронтов (при освещении фильтра пло-

ской волной). В частности, путем голографической регистрации таких фронтов можно получать полутоновые фильтры с требуемым импульсным откликом.

Авторы выражают искреннюю благодарность канд. техн. наук П. Е. Твердохлебу за полезные советы, высказанные им при чтении рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970.
2. A. Vander Lugt. Signal detection by complex spatial filtering.— "IEEE Trans.", 1964, April, IT-10, vol. 2, p. 139—145.
3. Ю. В. Чугуй. Оптическая обработка сигналов с помощью силуэтных фильтров.— «Автометрия», 1972, № 5.
4. Л. А. Луизова, В. Н. Кирпичников. Использование оптического Фурье-преобразования при обработке спектрограмм.— В кн.: Проблемы голографии (Межвузовский сборник научных трудов). Вып. IV. М., 1974.
5. Ю. В. Чугуй. Анализ спектров сигналов с многодорожечной силуэтной записью.— «Автометрия», 1974, № 6.
6. С. Г. Раутиан. Реальные спектральные приборы.— «УФН», 1955, XVI, вып. 3.
7. В. А. Зубов. Оптический метод исключения аппаратной функции прибора.— «Опт. и спектр.», 1968, т. XXV, вып. 5.
8. Carl W. Helstrom. Image restoration by the method of least squares.— "J. Opt. Soc. Am.", 1967, vol. 57, № 3.
9. George W. Stroke, Franz Furrer, Donald R. Lamberty. Deblurring of motion-blurred photographs using extended-range holographic Fourier-transformation division.— "Opt. Commun.", 1969, vol. 1, № 3.
10. Б. Е. Кривенков, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Оптический метод кодирования изображений при помощи преобразования Адамара.— «Автометрия», 1974, № 6.

Поступила в редакцию 24 апреля 1975 г.

УДК 681.3:621.391.23

Я. П. ВЫСТАВКИН, Г. Н. КУКЛИН, С. А. РЕДКОЗУБОВ

(Москва)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАКЕТИРОВАНИЯ СООБЩЕНИЙ В СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ

Введение. Сетевые системы обмена и передачи информации по особенностям построения аппаратуры передачи данных можно разделить на два больших класса. К первому классу относятся сетевые системы, в которых после коммутации канала и установления связи между отправителем сообщения и его адресатом осуществляется передача и обмен информацией без всяких трансформаций передаваемого сообщения. К этому классу сетевых систем обмена информацией можно отнести, например, систему EDS (Elektronische Datenvermittlung Systems), которая разрабатывается в ФРГ. Ко второму классу сетевых систем обмена информацией можно отнести системы, в которых отправитель сообщения независимо от состояния своего адресата передает сообщение через промежуточные центры обмена информацией — коммуникационные процессоры (КП), осуществляющие накопление, редактирование, сборку и передачу сообщения адресату. Такого рода системы можно назвать сетевыми системами с накоплением информации. К этому клас-