

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

И.Д. Николов

АДАПТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

1. Введение

Оптические методы и системы для записи, обработки и передачи изображений находят широкое применение в современной науке и технике. Большие массивы цифровых и полутоновых изображений требуют быстрого анализа и оценки. Главным преимуществом оптических методов является возможность быстрой классификации и обработки снимков. Современные оптико-электронные комплексы работают более эффективно, чем ЭВМ и оптические процессоры. Оптические адаптивные методы имеют некоторые новые функциональные возможности для обработки изображений [1,2]. Линзовые объективы для обработки информации используются в устройствах для корреляционного анализа, повышения контраста расфокусированных изображений, распознавания объектов на случайном фоне, оконтуривания фигур, улучшения качества полутоновых изображений и т.д. [3-7]. Совместные исследования, проведенные в ИППИ АН СССР и ЦЛОЗОИ БАН, привели к разработке нового класса адаптивных оптических систем [3].

Прикладные проблемы цифровой оптики и синтеза фильтров рассмотрены в работе [2]. Решение абберационной задачи и изучение зеркальных оптических систем позволили нам создать новый гибридный комплекс для адаптивной обработки информации. Разработанные оптические устройства отличаются компактностью и эффек-

тивностью [5,7]. Цель данной работы - обобщение накопленного опыта на основе полученных результатов от применения созданных оптических систем и анализ дальнейшего развития адаптивных методов при разработке оптико-электронных комплексов для гибридной и автоматизированной обработки изображений.

Внеосевые параболические зеркала использованы нами успешно в полностью отражательных схемах для работы с адаптивными фильтрами и оптической обратной связи при обработке разных изображений [4,7]. Наше предложение состоит в том, чтобы использовать динамический нелинейный элемент в компактной зеркальной системе, в частотной плоскости которой локальная оптическая плотность по всему полю адаптивного фильтра изменяется в зависимости от падающей интенсивности в любой точке записываемого спектра объектного транспаранта [4,6]. Для любой оптической передаточной функции системы амплитудно-частотная функция фильтра должна быть согласована с действующим спектром объекта для оптимальной обработки и передачи сигналов [3-7]. Необходимо синтезировать такой адаптивный фильтр, который может подавить шум вне области сигнального спектра и одновременно обеспечить минимум дисперсии ошибок. Разработаны базовые схемы и устройства для пассивной, управляемой и гибридной адаптации при оптической обработке изображений.

2. Адаптивные методы обработки изображений

Адаптивная оптическая система самонастраивается (адаптируется) к изменяющимся условиям работы. Сущность адаптивных методов состоит в том, что автоматически корректируются характеристики оптической системы с целью получения наилучшего образа наблюдаемого объекта или обрабатываемого изображения. Теоретические основы адаптивной обработки базируются на классической теории Аббе для формирования изображения в микроскопе и на фазово-контрастном методе Цернике [7]. Действие фильтрующего объектива и роль нулевого порядка при образовании изображения с высокой разрешающей способностью в результате двойной дифракции и использование амплитудно-фазового фильтра в фазово-контрастном микроскопе для подавления освещающего фона от нулевого порядка аналогичны работе адаптивного оптического элемента (АОЭ) в оптической системе обработки

Этот случай является более сложной задачей, которая может быть решена с помощью набора независимых фильтров типа Кальмана-Бьюси. Для моделирования адаптации используются разные методы и алгоритмы. Если математическая модель корректна, то адаптивная оптическая система быстро самонастраивается. Отрицательный градиент в центре малой области $\hat{A}(i)$ адаптивного фильтра направлен к максимальному уменьшению функции адаптации $F(\hat{A})$, и переход к соседнему центру локальной области фильтра определяется из выражения

$$\hat{A}(i+1) = \hat{A}(i) - \mu(i) \nabla F[\hat{A}(i)] / \{ \|\nabla F[\hat{A}(i)]\| \}, \quad (1)$$

где $\mu(i)$ - коэффициент адаптации, который определяет скорость сходимости алгоритма; $\|\nabla F[\hat{A}(i)]\|$ - норма градиента вектора; $\nabla F[\hat{A}(i)]$ - градиент специфической функции в выбранной точке A для локальной области адаптивного фильтра.

Обычно более удобно задать $\mu = \text{const}$ и $\|\cdot\| = 1$ при практической реализации фильтров.

Нелинейные адаптивные алгоритмы работают быстрее, чем линейные. Для синтеза фильтров можно использовать метод стохастической аппроксимации, который имеет высокую скорость сходимости. Однако синтез оптимальных адаптивных двумерных фильтров в реальном масштабе времени практически невозможен с помощью современных ЭВМ. Нелинейная фильтрация требует гораздо меньше времени, чем линейные методы, и адаптивные алгоритмы проще для реализации. Локально-оптимальный двумерный фильтр решается с помощью градиентной оптимизационной процедуры. Важно правильно определить коэффициент адаптации μ для записи спектра изображения, так как нужна высокая скорость действия фильтра. Оптическая система формирует распределение интенсивности в своей частотной плоскости в виде спектра, который записывает оптимальный адаптивный фильтр с функции типа

$$Q(f_x, f_y) = \frac{\mu^*(f_x, f_y) \Phi_o(f_x, f_y)}{|S(f_x, f_y)|^2 \Phi_o(f_x, f_y) + \Phi_n(f_x, f_y)}, \quad (2)$$

где $\Phi_o(f_x, f_y)$ и $\Phi_n(f_x, f_y)$ - плотности спектральной мощности соответственно для сигнала и шума, когда эти величины изменяются статистически независимо при записи фильтра.

информации. АОЭ представляет собой нелинейный фильтр, который воздействует одновременно на весь пространственно-частотный спектр в Фурье-плоскости линейной оптической системы. Адаптивный нелинейный фильтр ослабляет яркий нулевой порядок, ненужные пространственные частоты и фон светорассеивания с целью повышения контраста, резкости и информационной способности обрабатываемой картины.

Существующие линейные и нелинейные алгоритмы для адаптации разделяются на две категории:

- адаптация с эталонной моделью (оптическая система с обучением), для которой реакция системы известна заранее и разностный сигнал формируется в любой момент времени синхронизации в блоке фильтрации для управления процессом в нужном направлении;
- адаптация без эталонной модели (оптическая система без обучения), когда реакция адаптивной оптической системы предварительно неизвестна.

Функция влияния $\psi^*(f_x, f_y)$ зависит от пространственных частот f_x, f_y спектра и отражает характеристики фильтрующего блока при формировании А03 для Фурье-преобразования $S(f_x, f_y)$ обрабатываемого объекта. Коэффициент пропускания записываемого амплитудного фильтра пропорционален интенсивности спектрального распределения в частотной плоскости оптической системы для обрабатываемого изображения. Таким образом сложный адаптивный фильтр формируется в виде суперпозиции локальных нейтральных фильтров для любого индивидуального спектрального порядка с центром $A(i)$.

3. Экспериментальные результаты обработки изображений

В качестве транспаранта для записи А03 мы использовали электрохромные сэндвичные устройства и панхроматические фотоэмульсии с прямым самопроявлением [4,6,7]. На рис. 1 показаны кривые изменения амплитудного коэффициента T_a в зависимости от времени экспонирования t : реверсивный электрохромный транспарант (а) имеет максимальную оптическую плотность D в красной области спектра и T_a изменяется нелинейно для напряжений электродов 2,5-3,5 В при мощности записывающего пучка 15 МВт в нулевом порядке спектра; а самопроявляющиеся под действием света фотоэмульсии записывают А03 так же нелинейно (б) после экспозиции $t = 15$ с (кривые 1, 2 и 3) при энергии 7,2 МВт в центре спектра (от He-Ne лазера). На рис. 2 представлена лабораторная установка для адаптивной обработки изображений: оптическая схема а синтезирована из внеосевого параболического зеркала 1 и информационной плоскости 2, проходящей через фокус F зеркала 1, который расположен в центре зеркала 3, и содержащей информационный транспарант 4 и фотоприемник 5. Спектр объекта 4 с шумом записывается на светочувствительном слое пластины 9, которая поставлена перед плоским зеркалом 3. Освещающий пучок 6 проходит через транспарант 4 и фокусируется зеркалом 1, которое формирует двумерный спектр на поверхности зеркала 3. Ось оптической системы 7 расположена на высоте H над оптической осью 8 зеркала 1. На рис. 2,б показан созданный обрабатывающий блок зеркальной установки в ЦЛОЗОО БАН. На рабочую плоскость фильтрующего блока проецируется спектр с ярким нулевым порядком и высоким уровнем шума (рис. 3), который можно ослабить с помощью пассивного адаптивного элемента 9 (рис. 2,а). На фотографии видно, что световое пятно в центре зашумляет низкие частоты спектра (рис. 3,б). Сложный реальный спектр (рис. 4) имеет шум нулевого порядка с широким пьедесталом, который захватывает до +5 порядка (рис. 4,б). Параболическое зеркало 1

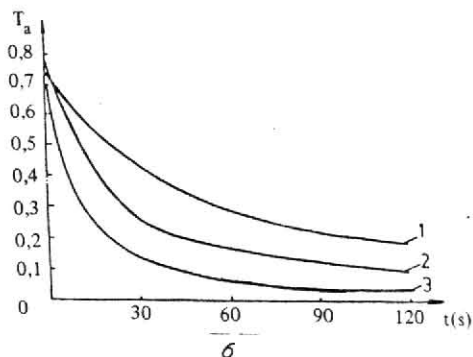
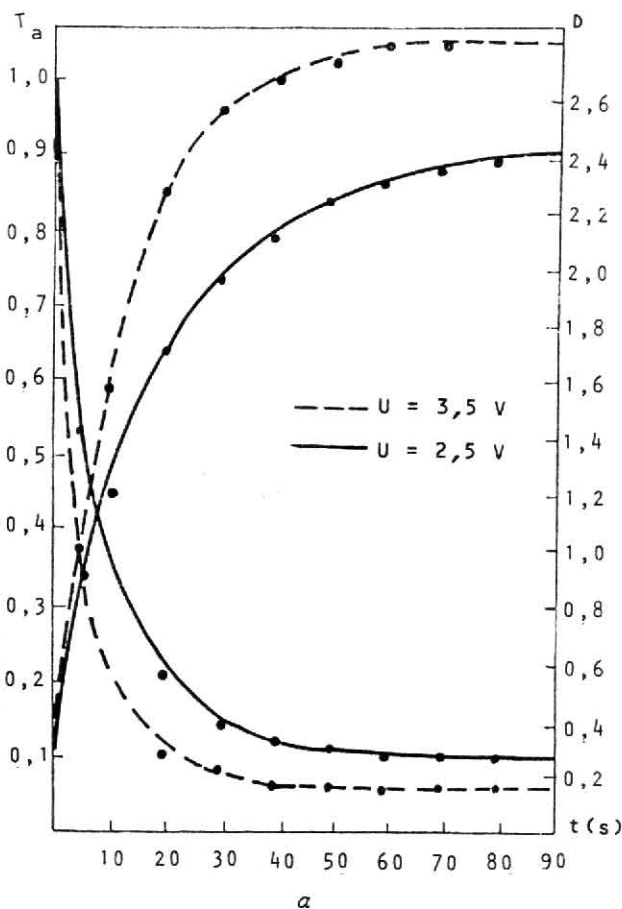


Рис. 1. Кривые изменения амплитудного коэффициента от времени экспонирования: а - для электрохромного транспаранта; б - для самопроявляющихся фотоэмульсий

формирует неискривленный сложный спектр с разделенными высокими порядками (до +11), который обрабатывается А03 9 (рис. 2,а).

При управляемой адаптации электрохромный А03 подавляет нулевой порядок спектра (рис. 5) и уменьшает шумовой пьедестал (рис. 5,б) и в конце записи фильтра формирует темные пятна в центре и первых порядках спектра (рис. 5,в). Функция адаптации $\psi(f_x, f_y)$ для данного нелинейного фотоматериала изменяется в зависимости от вида обрабатываемого

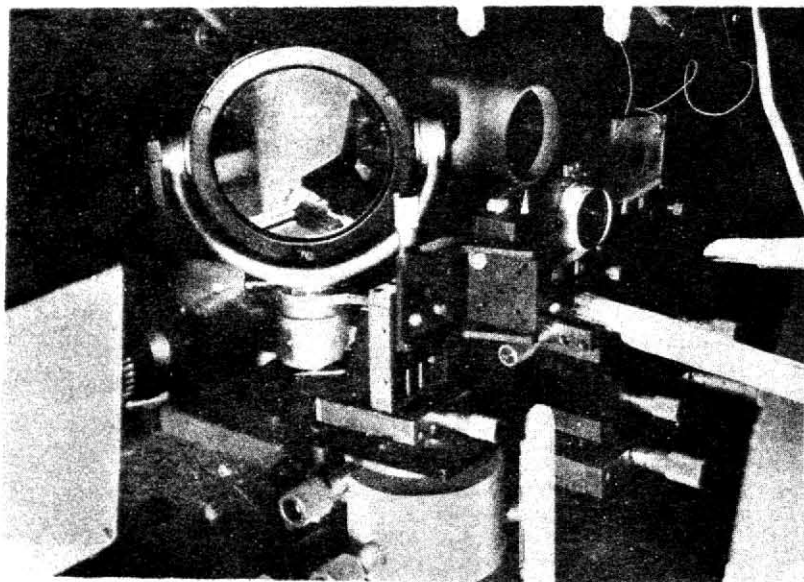
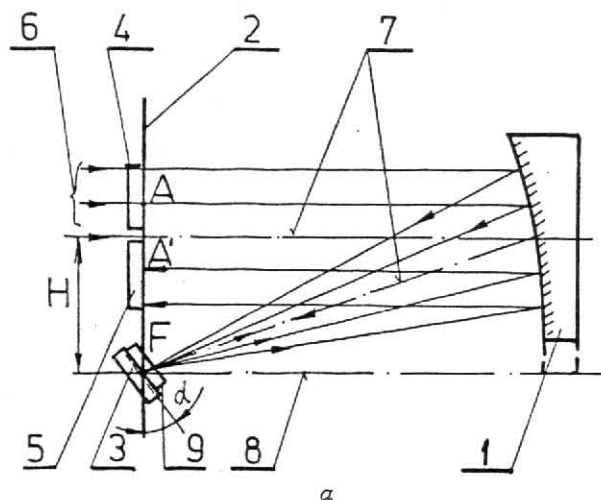
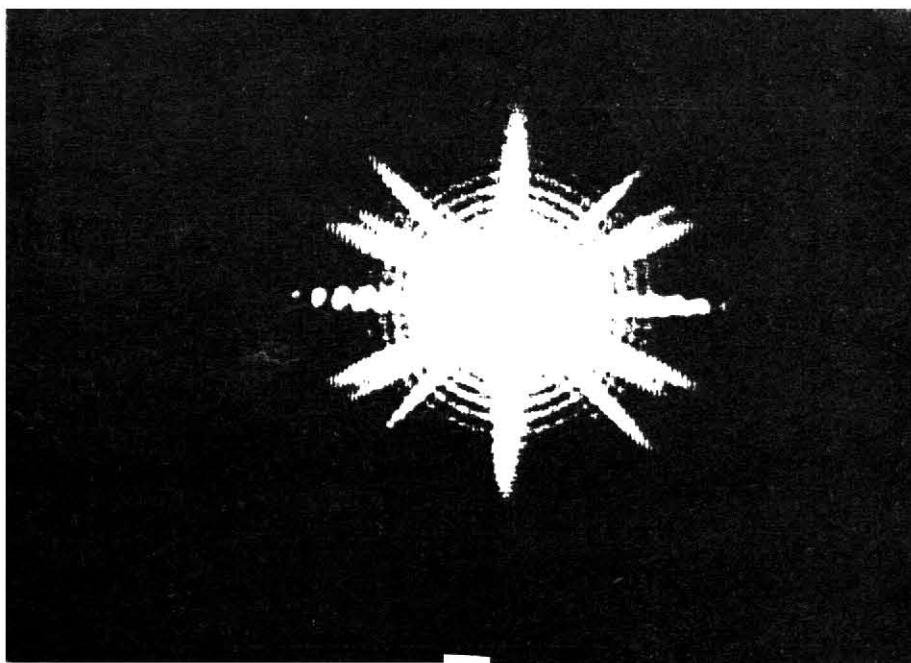


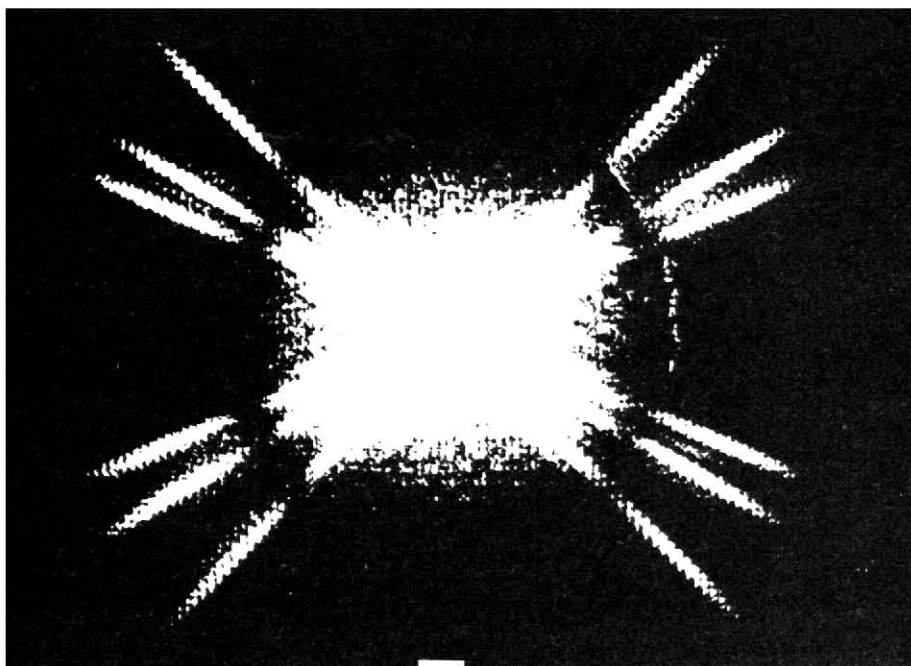
Рис. 2. Установка для адаптивной обработки изображений: а - оптическая схема; б - обрабатывающий блок

пространственно-частотного спектра. Для объекта с низкими пространственными частотами интенсивность спектра сосредоточена в центре фильтра (рис. 6) и на АОЭ формируется яркое светлое пятно (действие противоположное, чем на рис. 5, б) с темным кольцом вокруг (рис. 6, б). При изменении времени запи-

си АОЭ (рис. 7, а) или напряжения на электродах транспаранта (рис. 7, б) коэффициент адаптации α не меняется для сосредоточенного спектра и темное кольцо на АОЭ сохраняется. Действие адаптивного фильтра здесь малоэффективно при обработке изображений с низкими частотами (рис. 8).



а

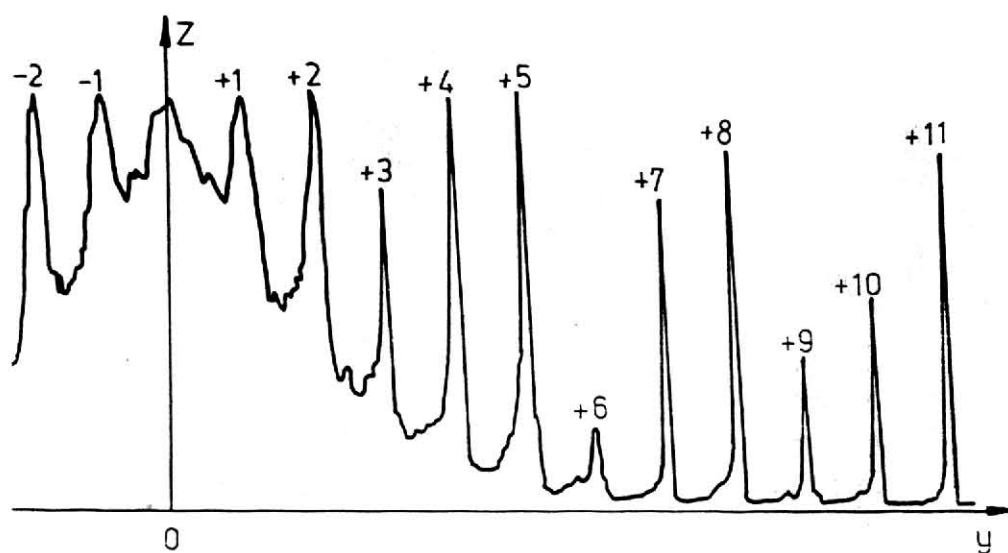


б

Рис. 3. Спектры с ярким нулевым порядком: а - спектр с круговой симметрией;
б - спектр прямоугольного объекта



а



б

Рис. 4. Сложный спектр: а - фотография шумового пятна; б - денситограмма сечения спектра под углом 45° к вертикальной оси

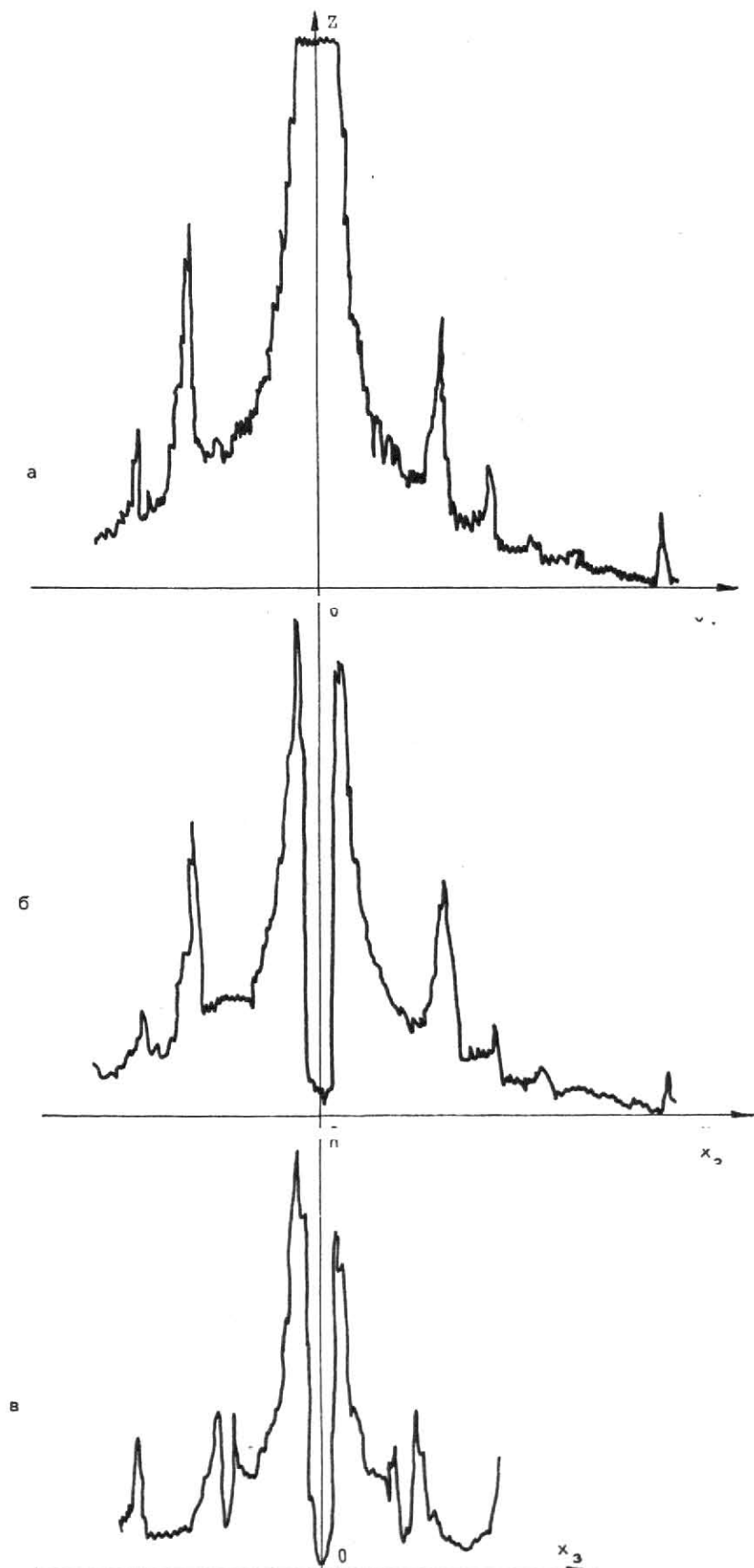


Рис. 5. Подавление нулевого порядка сложного спектра:
 а - сечение исходного спектра; б - уменьшение шума в центре спектра;
 в - подавление центрального и первых порядков спектра

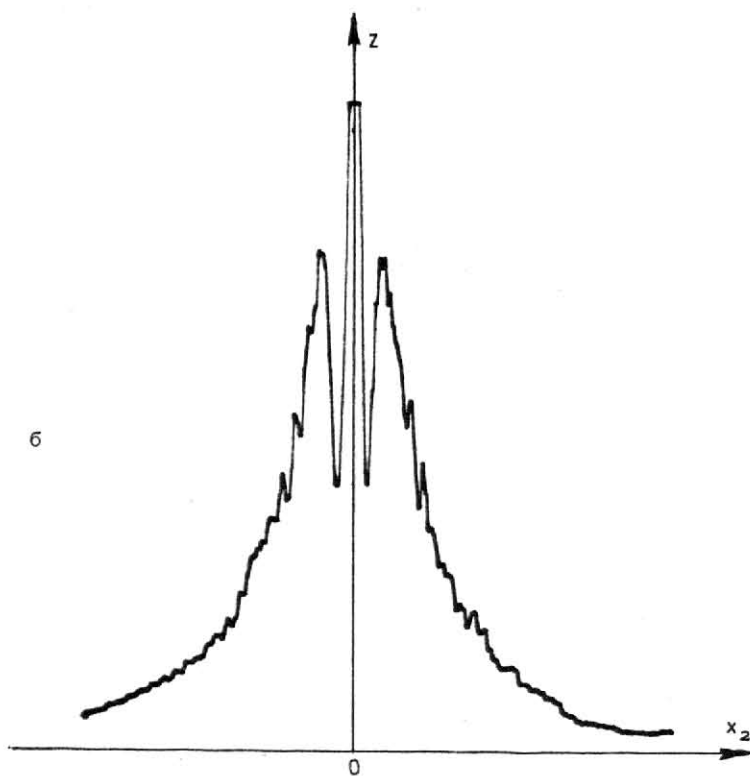
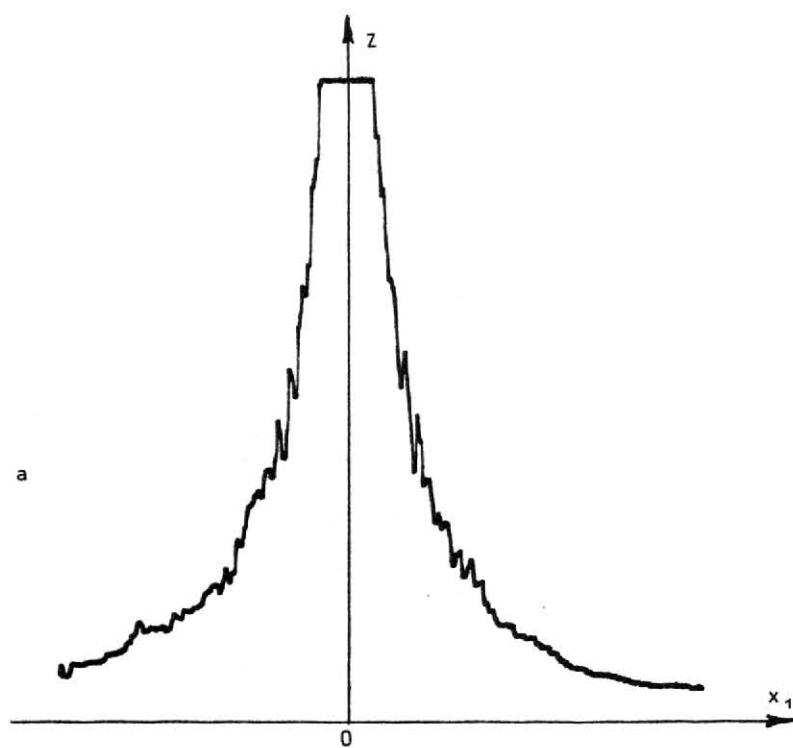


Рис. 6. Сосредоточенный спектр в центре
 фильтра: а - сечение яркого светового
 пятна на негативе; б - темное кольцо,
 записанное на электрохромном транспаранте

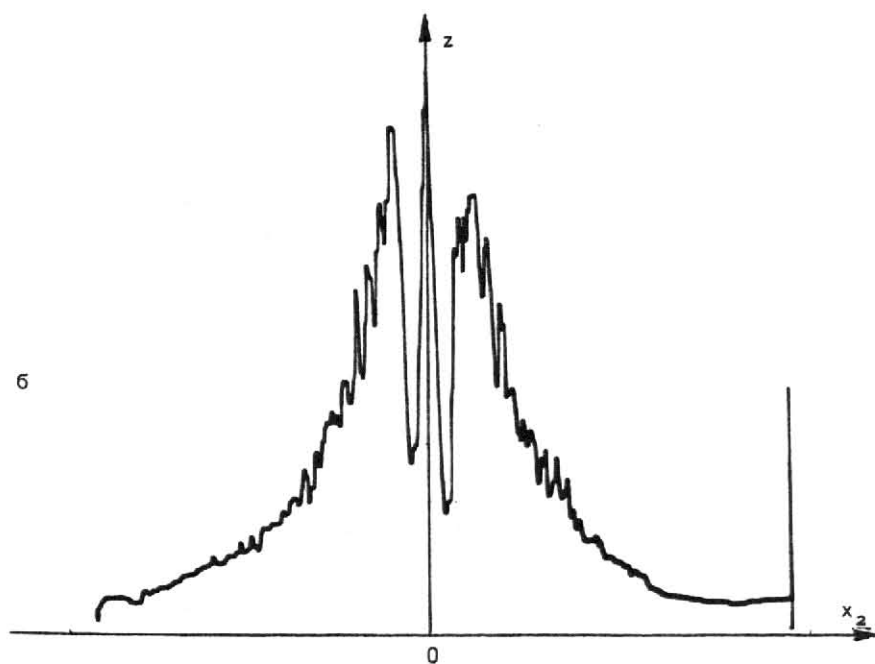
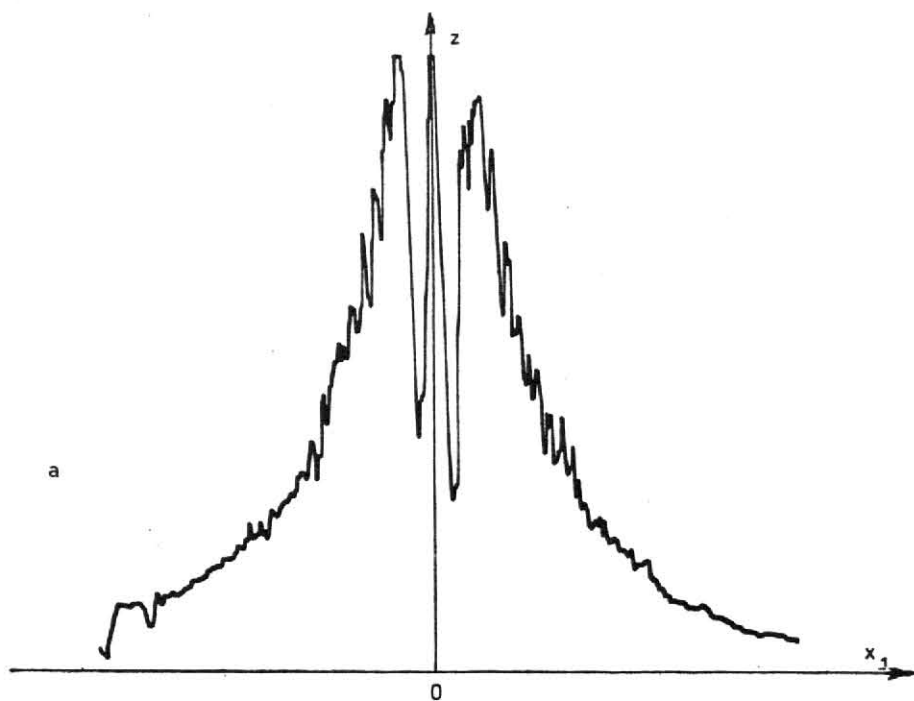


Рис. 7. Управление адаптивным фильтром:
 а - изменение времени записи на
 электрохромном TRANSPARANTE, б -
 изменение напряжения на электродах
 TRANSPARANTE

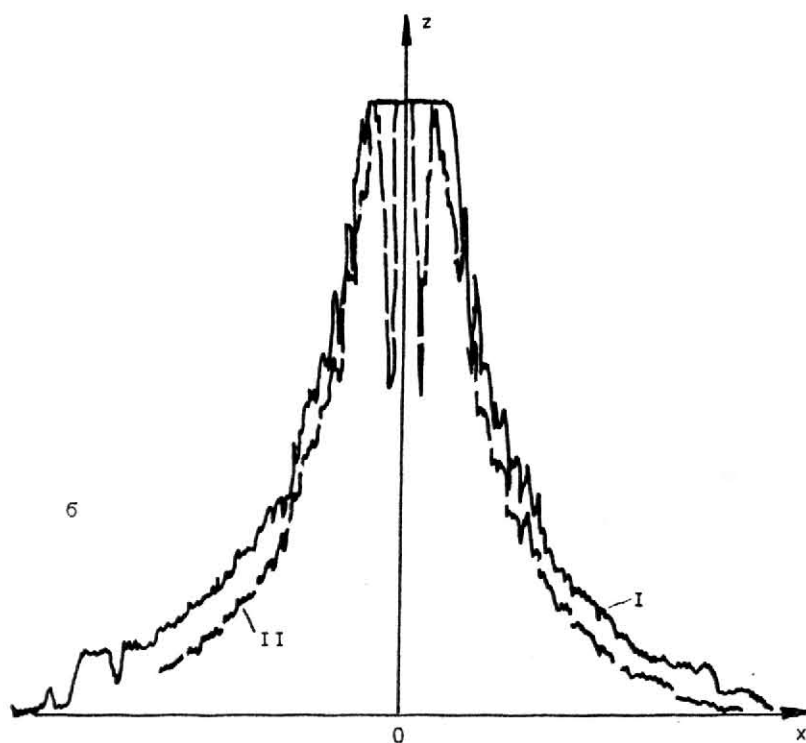
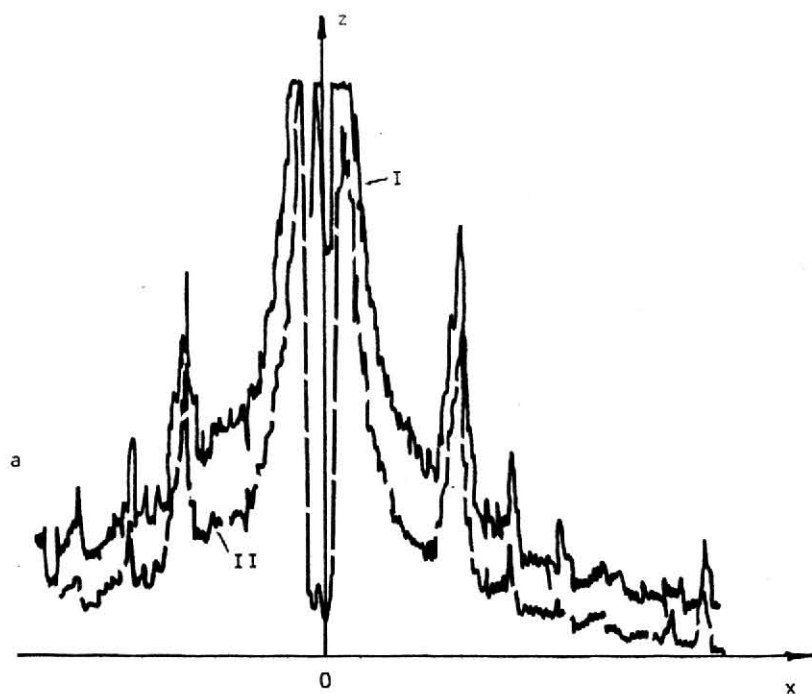


Рис. 8. Действие электрохромного адаптивного фильтра (I - исходный спектр, II - обработанный спектр): а - сечение сложного спектра, б - сечение сосредоточенного спектра

Нами разработаны две оптические системы для управляемой и гибридной адаптации фильтрующего блока с помощью двух длин волн при обработке изображений. Синтезирована линзовая *а* и зеркальная *б* оптические схемы с двумя контурами обратной связи для записи и управления характеристик АОЗ (рис. 9). Линзовая схема состоит из объектива 6, в переднем фокусе *F* которого расположена информационная плоскость 5 с входным транспарантом 3, выходным фотоприемником 4 и контрольным приемником 15. Ла-

зер 1 с длиной волны λ_1 и фильтрующим коллиматором 2 освещает блок управляемого транспаранта 3 параллельным пучком лучей 18. В заднем фокусе *F* объектива 6 поставлена обрабатывающая плоскость 8, совпадающая с рабочими поверхностями селективного зеркала 9 и частотного фильтра 7, перед которым расположен АОЗ 10. Пучок лучей с управляющей длины волны λ_2 , который выходит из лазера 14, расширяется коллиматором 13

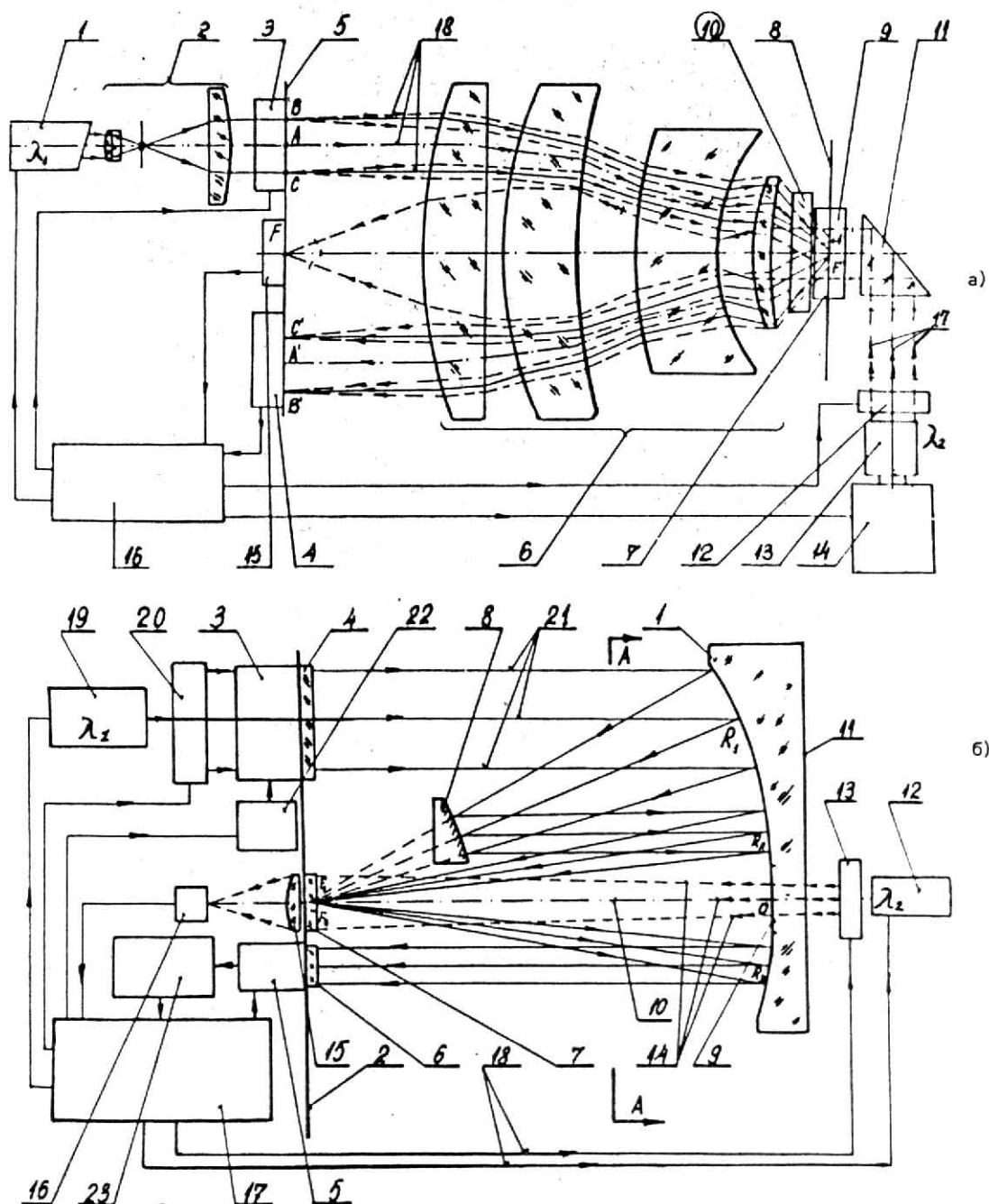


Рис. 9. Оптические схемы для гибридной адаптивной обработки изображений: *а* - линзовая система, *б* - зеркальная схема

и через модулятор 12 направляется в призму 11 и освещает трехэлементный фильтрующий блок 9-7-10. Зеркало 9 отражает лучи пучка 18 с рабочей длины λ_1 и пропускает лучи пучка 17 с управляющей длины λ_2 . Рабочая волна дифрагирует на транспаранте 3 и объектив 6 формирует спектр через адаптивный элемент 10 и прозрачный фильтр 7 на поверхности зеркала 9. Прошедшие через элементы 10 и 7 пространственные частоты отражаются зеркалом 9 в виде наклонных пучков лучей, которые проходят обратно через 7 и второй раз экспонируют АОЗ 10. Объектив 6 формирует обработанное изображение В'А'С' на приемнике 4. Элемент 10 изменяет свою оптическую плотность в области спектральных порядков и селективно пропускает свет с λ_1 к голографическому фильтру 7 и зеркалу 9. АОЗ 10 воздействует на спектр в прямом и обратном ходе лучей и работает нелинейно (рис. 1,б) для высоких интенсивностей в центре спектра. Прошедшие через АОЗ лучи с λ_2 фокусируются объективом 6 на приемнике 15, который связан с управляющим устройством 16 и замыкает оптическую обратную связь для переключения рабочей точки на характеристике АОЗ. Цифровое устройство 16 регулирует режим системы с помощью оптической обратной связи по λ_1 для достижения заданной яркости и информационной способности обработанного изображения В'А'С' на приемнике 4.

Зеркальная схема (рис. 9,б) синтезирована из параболического зеркала 1 с прозрачной зоной 9 около оптической оси 10 системы и информационной плоскости 2, содержащей рабочие поверхности управляемого транспаранта 3 с защитным фильтром 4 и фотоприемника 5 с фильтром 6, а многослойное зеркало адаптивного элемента 7 также лежит в фокальной

плоскости 2 зеркала 1. Для коррекции кривизны поля системы перед вогнутым зеркалом 1 поставлено выпуклое зеркало 8. Установка 12 с перенастраиваемой длины λ_2 излучает световой пучок 14, который расширяется и модулируется устройством 13 и освещает АОЗ 7. Управляющее цифровое устройство 17 обрабатывает и анализирует спектры на АОЗ 7 и изображения на приемнике 5, которые поступают при освещении транспаранта 3 рабочим пучком 21 с λ_1 , регулирует режим работы элемента 7 и замыкает оптическую обратную связь по λ_2 через линию 18. ЗВМ 17 связана с освещающими установками 12 и 19 и контролирует модуляцию пучков 14 и 21, блока 22 для подачи снимков и приемник 5, замыкая оптическую обратную связь по λ_1 . Монитор 23 связан с блоками 17 и 5 для наблюдения текущей картины оператором комплекса обработки изображений.

С помощью лазерного пучка 14 с длиной волны λ_2 , которая отличается от рабочей длины λ_1 , формируется фильтр с высокой оптической плотностью в центре АОЗ 7 для подавления неинформативных ярких областей по полю изображения (рис. 10). Оконтуривание изображения с помощью пассивного адаптивного фильтра показано на рис. 11: для объекта типа спирали Архимеда оптическая система формирует сосредоточенный спектр (рис. 8,б, денситограмма 1) с низкоинтенсивными нулевыми порядками α и в обработанном изображении β контуры объекта расщепляются. На рис. 12 даны результаты обработки полутоновой ивичной картины: электрохромный АОЗ работает нелинейно (рис. 1,а) и подавляет нулевой порядок спектра (рис. 5,б), что приводит к падению освещенности светлых полос в изображении α ; денситограмма поперечного сечения выходного изображе-

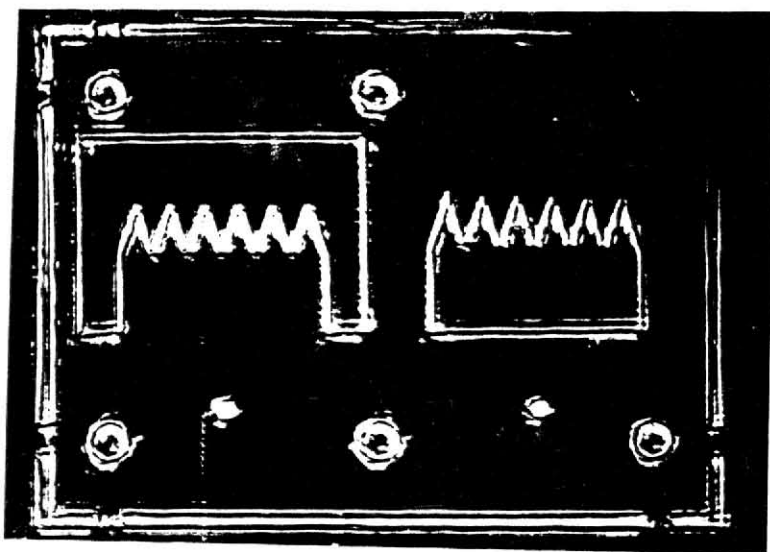
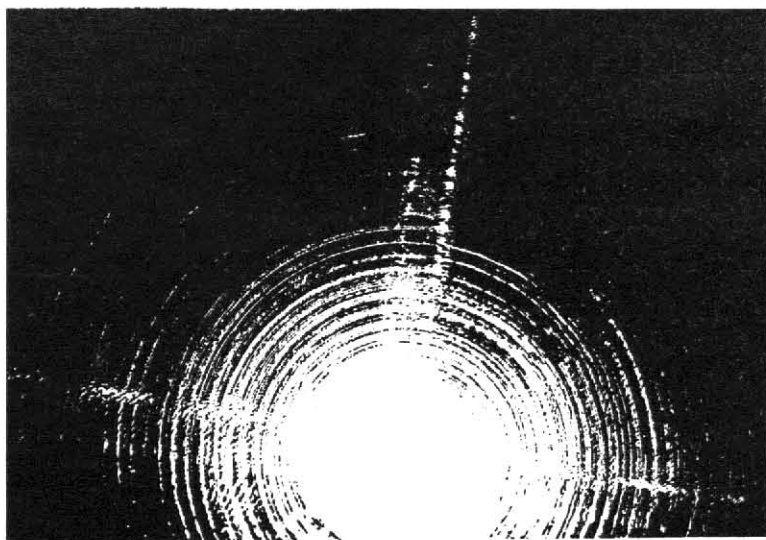


Рис. 10. Подавление неинформативных полей обработанного изображения

а



б

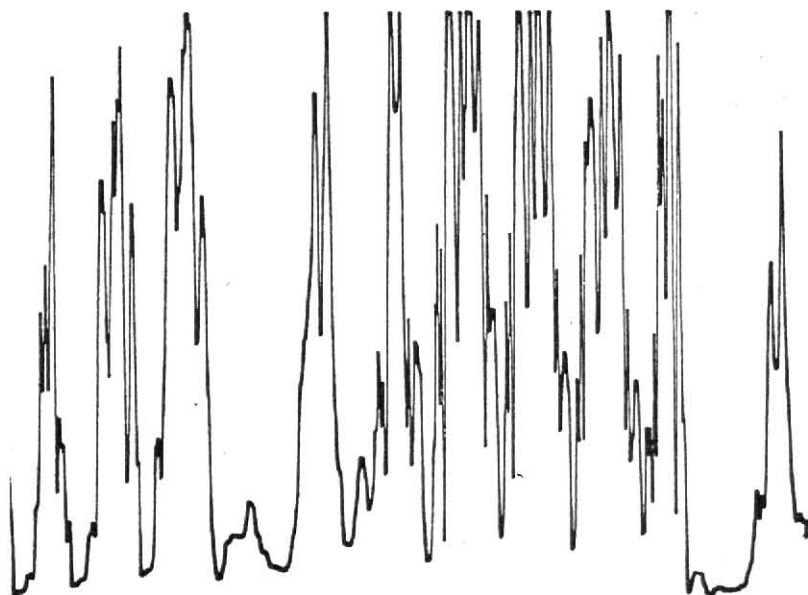


Рис. 11. Оконтуривание изображения адаптивным фильтром: а - спектр объекта с круговой симметрией, б - сечение обработанного изображения с расщепленными контурами

ния б показывает наличие острых пиков на границах "светлое - темное", что очень удобно для бинарной детекции границ объектов в техническом зрении. На рис. 13 показаны скенограммы при адаптивной обработке полутонового объекта типа инженерферогаммы: в начальном периоде записи АОЗ на самопроявляющейся фотозмультисии из-за нелинейности (рис. 1,б) подавляются низкие частоты а, с развитием формирования адаптивного фильтра происходит уменьшение шумового пьедестала б и при завершении

обработки выступают сюжетно важные частоты на адаптивно обработанном изображении в. Полученные результаты при исследовании записи и управления АОЗ в оптической системе позволяют повысить контраст и информативность по всему полю изображения.

Заключение

Нелинейные оптические фильтры, записанные на электрохромном транспаранте

или в самопроявляющихся панхроматических фотослоях, подавляют яркий нулевой порядок и шумы в частотной плоскости обрабатываемой оптической системы и они могут успешно работать с бинарными и полутоновыми изображениями. На их основе созданы шумоподавляющие, контурирующие, сглаживающие, полосовые, двояко-управляемые адаптивные фильтры для пассивной, управляемой и гибридной адаптации оптической системы и т.д. Мы показали, что зеркальные оптические системы

с отражающим фильтрующим блоком работают эффективно при адаптивной обработке объектов.

Однако до сих пор не разработаны общие и достаточно полные критерии для оценки входных и выходных изображений. Качество оптической системы определяется общепринятыми критериями (разрешающей способности, по ЧКХ и т.д.), но роль оператора при оценке выходной картины не должна пренебрегаться.

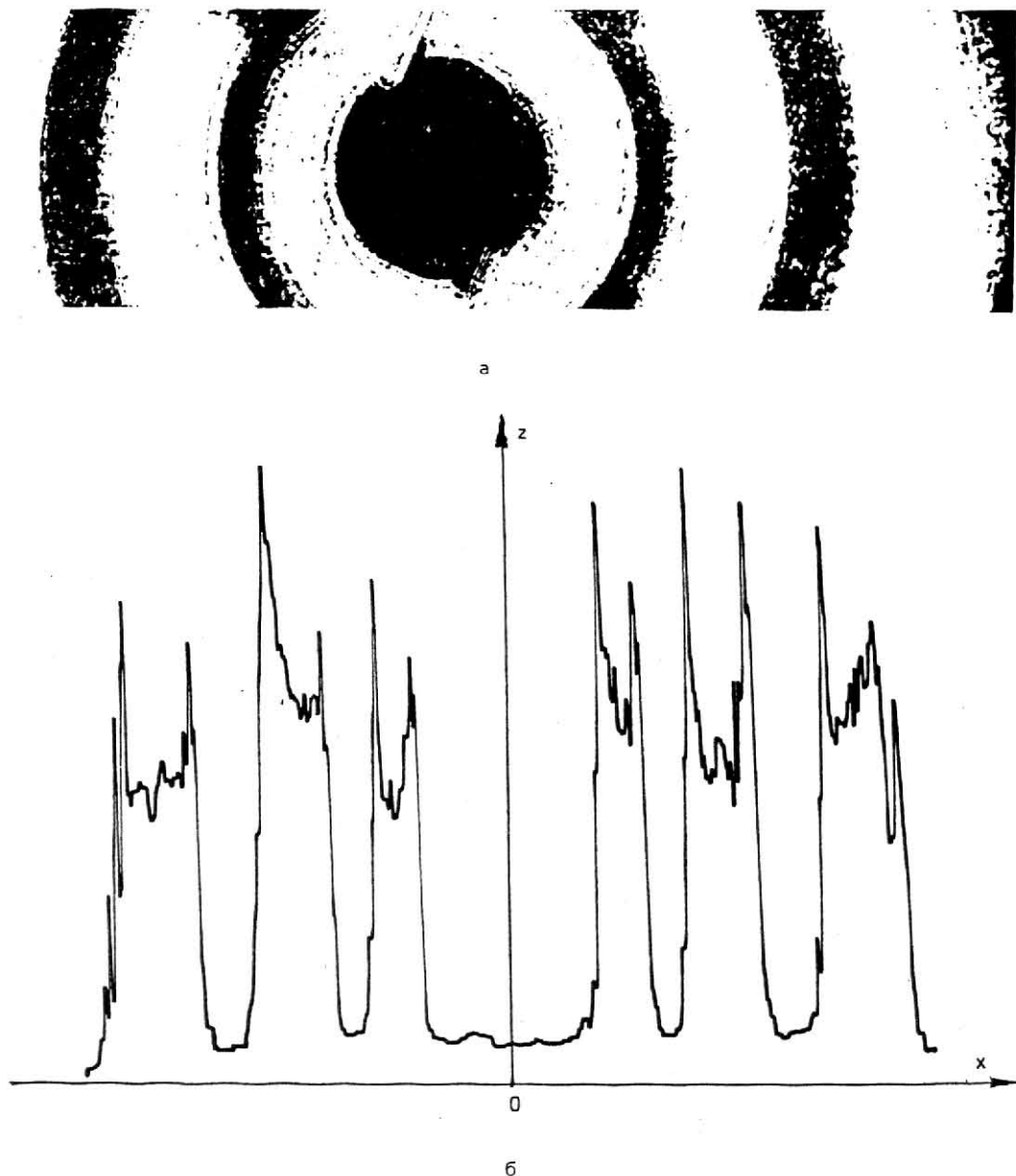


Рис. 12. Обработка полутоновой картины: а - обработанное изображение; б - денситограмма записанного изображения

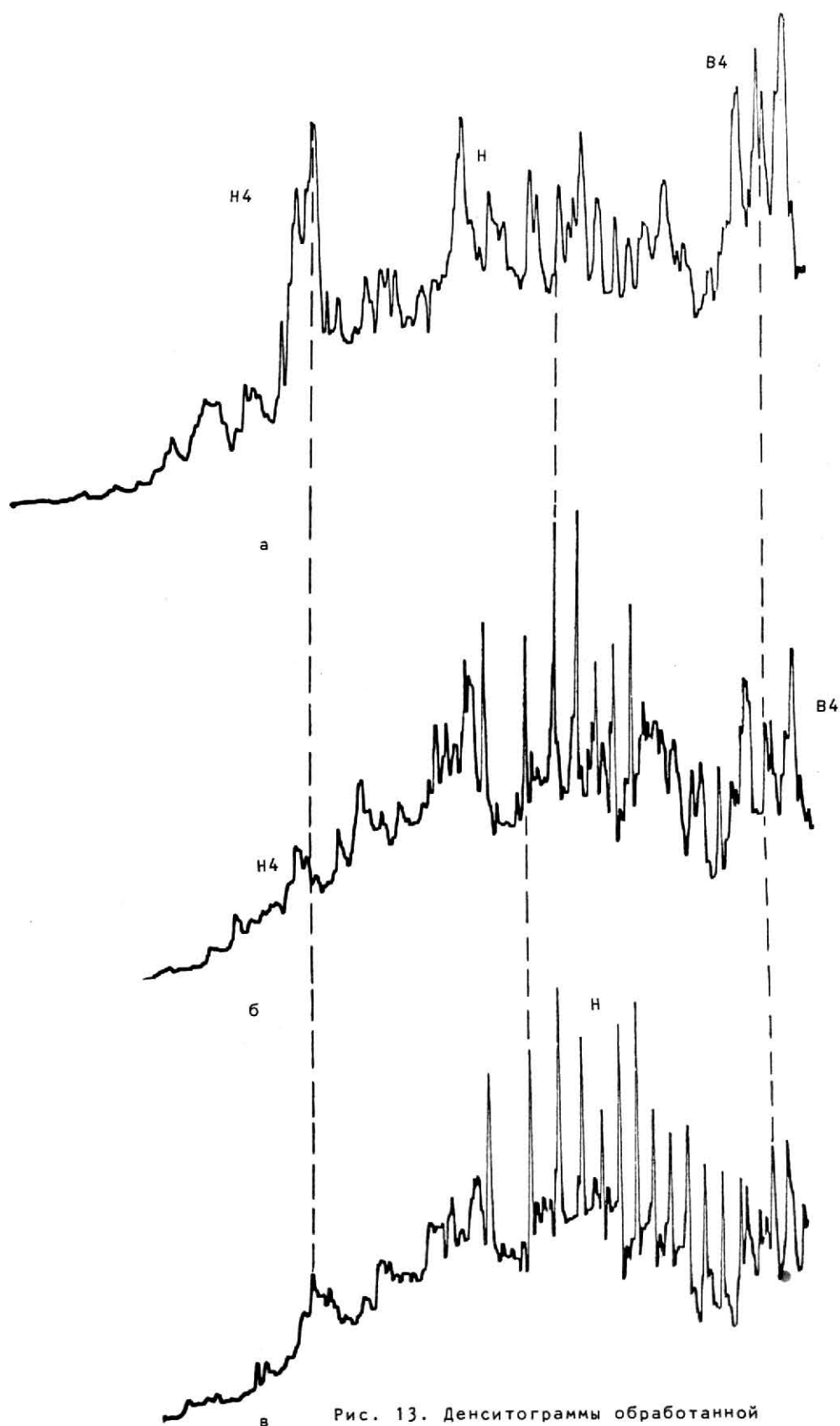


Рис. 13. Денситограммы обработанной интерферограммы: а - подавление низких частот, б - уменьшение шума, в - яркие пики

Л и т е р а т у р а

1. *Cohen J.D.* Appl. Opt., v. 24, N 23, p. 4247-4258, 1985.
2. *Yaroslavskii L.P.* Applied Problems of Digital Optics, Advances in Electronics and Electron Physics / Edit. by P.W. Hawkes, v. 66, p. 1-140, Acad. Press Inc., Orlando, 1986.
3. *Николов И.Д.* Адаптивные методы обработки изображений / Под ред. В.И. Сифорова и Л.П. Ярославского. М.: Наука, 1988, с. 186-222.
4. *Nikolov I.D. et al.* Opt. Quantum Electron., v. 21, N 3, 1989, p. 183-189.
5. *Nikolov I.D.* Appl. Optika'89, v. 11, p. 320-322, Prage, DUM Techniky, 1989, p. 320-322.
6. *Nikolov I.D.* Abstracts of the IV-th National Conference "OPTICS'89", May, 18-20 1989, Varna, p. 70-71.
7. *Николов И.Д.* Оптични методи и системи за запис и обработка на информация, София, СУ "Климент Охридски" (в печати).