

3. Полученные результаты позволяют определить влияние тонких фазовых неоднородностей на работу коррелятора и установить допуски на aberrации оптических элементов.

4. Экспериментально найденное оптимальное апертурное отверстие может быть использовано как критерий структуры тонкой фазовой неоднородности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику.— М.: Мир, 1970, гл. II, с. 36—39.
2. Юу Ф. Т. С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию.— М.: Сов. радио, 1979, ч. II, гл. 6, с. 95—99.
3. Ligt A. V. The Effects of Small Displacement of Spatial Filters.— Appl. Opt., 1967, vol. 6, p. 1221—1225.
4. Кривовяз Л. М., Пуряев Д. Т., Знаменская М. А. Практика оптической измерительной лаборатории.— М.: Машиностроение, 1974, гл. IV, § 5, с. 102—106.

Поступила в редакцию 24 июня 1980 г.

УДК 538.241.13 : 681.332

А. З. ДУН, С. Ю. МЕРКИН, Е. С. НЕЖЕВЕНКО, А. Н. ОШАРИН,  
О. И. ПОТАТУРКИН, В. И. ФЕЛЬДБУШ, Г. П. ЩЕРБАКОВ

(Ленинград — Новосибирск)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА В РЕЖИМЕ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Одним из основных элементов оптико-электронных систем (ОЭС) обработки изображений являются пространственно-временные модуляторы света (ПВМС). Первоначально ПВМС разрабатывались как устройства ввода некогерентных изображений в когерентно-оптические процессоры, однако позднее стало ясно, что они являются также мощным средством обработки изображений. Тем не менее до сих пор эти элементы в основном рассматриваются в отрыве от ОЭС, в которых они должны функционировать, и, в частности, от систем распознавания изображений, где применение их для предобработки (линейная фильтрация, нелинейные преобразования) с целью повышения качества распознавания было бы весьма эффективно [1]. В то же время использование ПВМС в этом режиме имеет свою специфику, так как требования к обработке изображений с точки зрения визуального восприятия и повышения эффективности автоматической системы распознавания изображений существенно различны.

Известны работы, в которых с целью предобработки изображений рассматривались такие электрооптические модуляторы, как дифференциальный ПРОМ [2] и оконтуривающий ПРОМ (ПРИЗ) [3, 4]. Однако в настоящее время наилучшими техническими характеристиками (разрешение, однородность поля, контраст), по нашему мнению, обладает фотоэлектрооптический ПВМС, исследованный до сих пор лишь в режиме обработки изображений с точки зрения визуального восприятия [5, 6].

В настоящей статье исследована работа фотоэлектрооптического ПВМС как элемента ОЭС в режиме оперативного ввода и предварительной обработки распознаваемых изображений и проведен анализ реализуемых при этом вариантов оконтуривания. Применение такого модулятора в совокупности с голографическим коррелятором интенсивности, на основе которого создается ОЭС, позволит реализовать квазиоптимальные алгоритмы распознавания, устраняя при этом наиболее существенный недостаток таких систем — отсутствие знакопеременной обработки — и

сохраняя все их преимущества: высокое разрешение при параллельной и многоканальной обработке, инвариантность к сдвигу оптических элементов, отсутствие влияния фазовых шумов и т. п. [7].

Принцип обработки изображений на ПВМС заключается в проецировании на его фоточувствительный слой последовательно двух изображений, представляющих собой результат свертки распознаваемого изображения с различными импульсными откликами. Причем режим работы ПВМС выбран так, чтобы при считывании формировалась разность этих изображений. В частности, в данной работе рассматриваются различные режимы вычитания сфокусированного изображения (импульсный отклик в виде  $\delta$ -функции) из расфокусированного (импульсный отклик в виде  $(1/\pi r_0^2) \text{circ}(\sqrt{x^2 + y^2}/r_0)$ ), что аналогично фотографической обработке по методу «перезкой маски» [8]. На ПВМС такую операцию можно осуществлять двумя способами:

1. Подача питающего напряжения — экспозиция расфокусированного изображения  $f_1(x, y)$  (по интенсивности) — закорачивание контактов на кристалле и фотослое — экспозиция сфокусированного изображения  $f(x, y)$  (по интенсивности) — считывание выходного амплитудного распределения  $g(x, y)$ , которое при малом по сравнению с полуволновым напряжении на кристалле пропорционально разности потенциалов на кристалле:

$$g(x, y) = \begin{cases} f_1(x, y) - f(x, y), & f_1(x, y) > f(x, y); \\ 0, & f_1(x, y) \leq f(x, y). \end{cases} \quad (1)$$

2. Подача питающего напряжения — экспозиция расфокусированного изображения  $f_1(x, y)$  — подача напряжения другой полярности — экспозиция сфокусированного изображения  $f(x, y)$  — закорачивание контактов на кристалле и фотослое — считывание выходного амплитудного распределения  $g(x, y)$ , которое при малом по сравнению с полуволновым напряжении на кристалле при любых соотношениях входных интенсивностей пропорционально

$$g(x, y) = f_1(x, y) - f(x, y), \quad (2)$$

причем изменению знака  $g(x, y)$  соответствует изменение фазы волнового фронта на  $\pi$ .

Расфокусировка распознаваемого изображения осуществляется в линейной системе с нормированным изотропным импульсным откликом

$$h(r) = (1/\pi r_0^2) \text{circ}(r/r_0), \quad (3)$$

откуда следует, что

$$f_1(x, y) = (1/\pi r_0^2) \text{circ}(\sqrt{x^2 + y^2}/r_0) * f(x, y). \quad (4)$$

Нормировка импульсного отклика необходима для сохранения масштабов по интенсивности сфокусированного и расфокусированного изображений;  $r_0$  — параметр дефокусировки.

Без ограничения общности выберем в качестве распознаваемого изображения одномерную щель

$$f(x, y) = \text{rect}(x/2d). \quad (5)$$

Дело в том, что изотропность импульсного отклика позволяет привести изображение любой конфигурации с характерными размерами  $d$ , превышающими параметр дефокусировки  $r_0$ , к набору одномерных щелей с различным пропусканием по интенсивности. Путем несложных вычислений получаем из (3)—(5)

$$f_1(x, y) = \begin{cases} 1, & |x| \leq d - r_0; \\ 1/2 + (d - |x|) \sqrt{r_0^2 - (d - |x|)^2} / \pi r_0^2 + (1/\pi) \arcsin((d - |x|)/r_0), & d - r_0 < |x| \leq d + r_0; \\ 0, & |x| > d + r_0. \end{cases} \quad (6)$$

На ПВМС данное изображение регистрируется в виде пространственного распределения разности потенциалов на кристалле  $U_{\kappa}$ . Этот процесс показан на диаграммах рис. 1, а, где  $U_{\phi}$  — разность потенциалов на фоторезисте, а изображение  $f_1(x, y)$  для удобства задано в линейной аппроксимации. Первоначальное деление питающего напряжения  $U_0$  происходит в соответствии с электрофизическими характеристиками кристалла и фотослоя. Видно, что изображение регистрируется на постоянной составляющей, что существенно уменьшает контраст. Поэтому считывание на ПВМС, как правило, проводится при закороченных контактах на кристалле и фотослое. В этом случае постоянная составляющая, как показано на первой диаграмме рис. 1, б, исчезает.

Рассмотрим последовательно оба способа вычитания и соответствующие им варианты оконтуривания на ПВМС. Эти процессы проиллюстрированы на диаграммах рис. 1, б и в, за исключением двух общих первых процедур, приведенных на диаграммах рис. 1, а. Отметим, что процедуры считывания не иллюстрируются, поскольку, как уже отмечалось выше, выходное амплитудное распределение  $g(x, y)$  пропорционально разности потенциалов на кристалле  $U_{\kappa}$ .

1. При вычитании на закороченных контактах на кристалле и фотослое получаем с учетом (1), (6)

$$g(x, y) = \begin{cases} 1/2 - (|x| - d) \sqrt{r_0^2 - (|x| - d)^2} / \pi r_0^2 - (1/\pi) \arcsin((|x| - d)/r_0), & d \leq |x| \leq d + r_0; \\ 0, & |x| < d, |x| > d + r_0. \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, ширина контура исходного изображения  $f(x, y)$  равна параметру дефокусировки  $r_0$ , а интенсивность пропорциональна  $|g(x, y)|^2$  и меняется от 0 до 0,25 максимального значения интенсивности  $I_1$ , которое получается при считывании без оконтуривания изображения  $f_1(x, y)$  (см. первую и вторую диаграммы на рис. 1, б). Данный контур имеет резкую внутреннюю и распылчатую внешнюю границы и ограничивает исходное изображение снаружи.

Нетрудно показать, что при перемене порядка экспонирования, т. е. первоначальной регистрации сфокусированного изображения, и вычитании расфокусированного изображения получаем аналогично (7)

$$g(x, y) = \begin{cases} 1/2 - (d - |x|) \sqrt{r_0^2 - (d - |x|)^2} / \pi r_0^2 - (1/\pi) \arcsin((d - |x|)/r_0), & d - r_0 \leq |x| \leq d; \\ 0, & |x| < d - r_0, |x| > d, \end{cases} \quad (8)$$

т. е. контур ограничивает исходное изображение изнутри и имеет те же характеристики, что и в предыдущем случае. Его вид приведен на третьей диаграмме рис. 1, б.

2. При вычитании на другой полярности питающего напряжения получаем с учетом (2), (6)

$$g(x, y) = \begin{cases} 1/2 - (|x| - d) \sqrt{r_0^2 - (|x| - d)^2} / \pi r_0^2 - (1/\pi) \arcsin((|x| - d)/r_0), & d < |x| \leq d + r_0; \\ -1/2 + (d - |x|) \sqrt{r_0^2 - (d - |x|)^2} / \pi r_0^2 + (1/\pi) \arcsin((d - |x|)/r_0), & d - r_0 \leq |x| < d; \\ 0, & |x| < d - r_0, |x| > d + r_0; \\ \text{не определено,} & |x| = d. \end{cases} \quad (9)$$

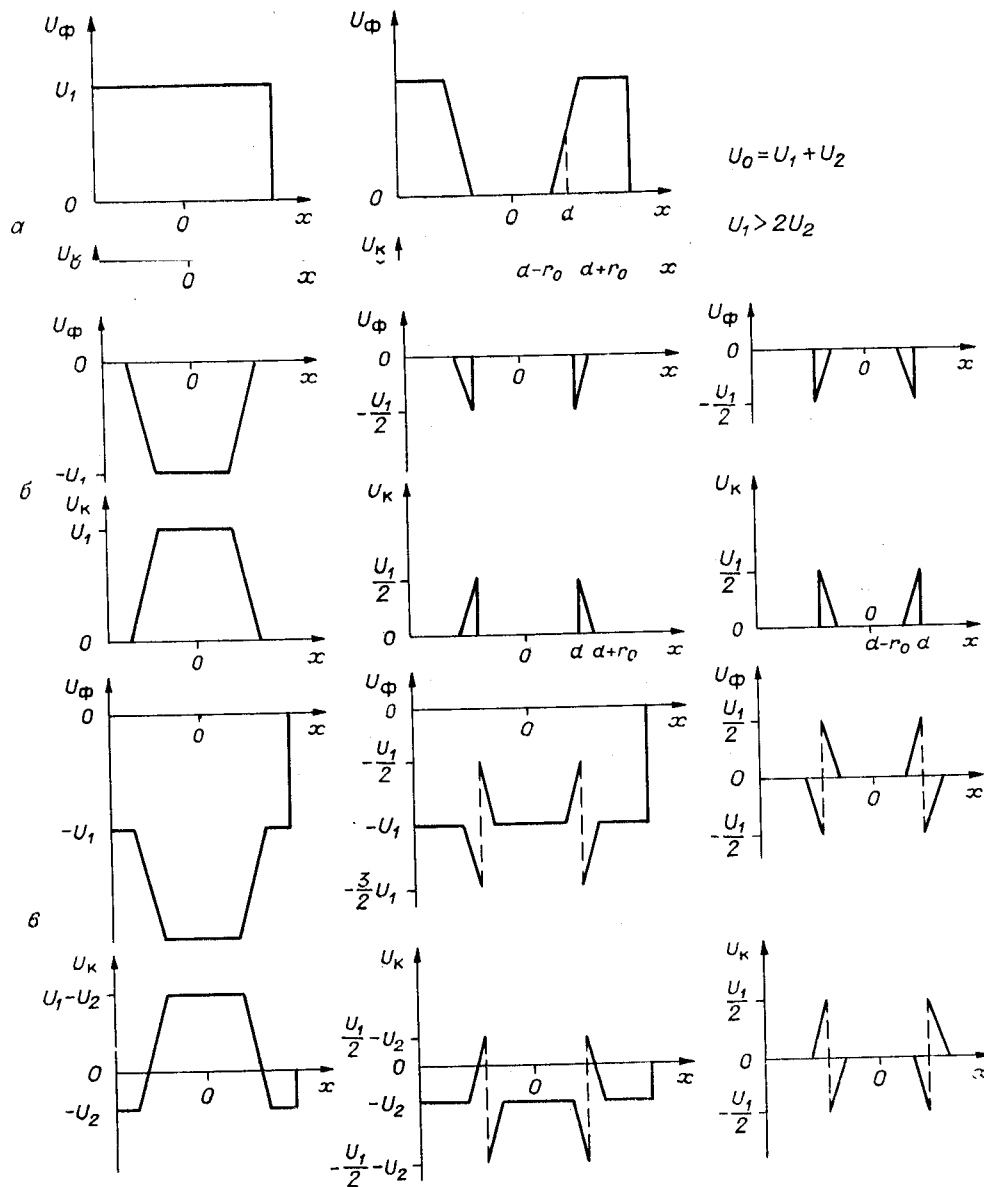


Рис. 1.

Выражение (9) описывает знакопеременный контур с шириной, равной удвоенному параметру дефокусировки  $r_0$ , и центром на границе исходного изображения. Поскольку дальнейшая обработка должна проводиться в голографическом корреляторе интенсивности, данное распределение квадратируется, однако контур при этом остается двойным. Дело в том, что практически изображения обрабатываются с конечным разрешением, а потому отсутствуют идеально резкие края на границе контуров. Поэтому реальное выходное распределение в отличие от (9)

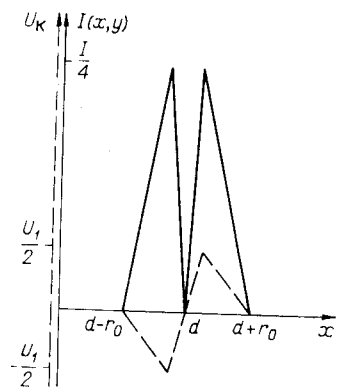


Рис. 2.

является расфокусированным с параметром, равным элементу разрешения, и принимает нулевое значение вдоль границы исходного изображения. При этом интенсивность двойного контура, как и в предыдущем случае, меняется от 0 до  $0,25 I_1$ .

Вид распределения интенсивности  $I(x, y)$  на одной границе исходного изображения в линейной аппроксимации приведен на рис. 2, где штриховой линией показано распределение разности потенциалов на кристалле  $U_k$ , пропорциональное выходному амплитудному распределению  $g(x, y)$ .

Экспериментально оконтуривание изображений согласно двум рассмотренным выше способам осуществлялось в оптической системе, схема которой приведена на

рис. 3, где 1 — осветитель; 2 — светофильтр; 3 — плоскость расфокусированного изображения  $f_1(x, y)$ ; 4 — плоскость исходного изображения  $f(x, y)$ ; 5, 6 — телескопическая система, проецирующая входную плоскость в плоскость фоторезиста; 7 — ПВМС; 8, 12 — телескопическая система, проецирующая ближнюю к фоторезисту поверхность кристалла в выходную плоскость 13; 9 — светоделительный клин; 10 — анализатор; 11 — зеркало; 14 — поляризатор; 15 — светофильтры; 16 — осветитель. В системе использовались ПВМС с разрешением 30 лпс./мм, контрастом 40:1 и чувствительностью (при контрасте 40:1)  $10^{-5}$  Дж/см<sup>2</sup>; объектив 5 — «Тессар» с фокусным расстоянием  $f=150$  мм и относительным отверстием  $n=1:4,5$ ; объектив 6 — «И-51» с  $f=210$  мм и  $n=1:4,5$ ; объектив 8 — «0-2» с  $f=600$  мм и  $n=1:10$ ; объектив 12 — «И-37» с  $f=300$  мм и  $n=1:4,5$ ; светофильтр 2 — СС5; светофильтры 15 — КС10, СЗС26, стандартные осветители и поляризаторы. Коммутация питающего напряжения и света осуществлялась с помощью аналоговых таймеров.

В процессе эксперимента обрабатываемые изображения предварительно помещались в плоскость 4, записывались на ПВМС, считывались и регистрировались в плоскости 13. При оконтуривании эти же изображения помещались в плоскость 3, записывались на ПВМС, помещались в плоскость 4, вычитались при закорачивании контактов на кристалле и фотослое или на другой полярности питающего напряжения, считывались и регистрировались в плоскости 13.

Обрабатываемые изображения, зарегистрированные на ПВМС, приводятся соответственно на рис. 4, а и 5, а. Строка геометрических фигур оконтуривалась двумя способами. В первом случае, как и следует из проведенного выше анализа, на каждой границе исходного изображения появляются одинарные контуры (в совокупности два светлых контура на темном фоне), а во втором случае — двойные контуры, причем из-за

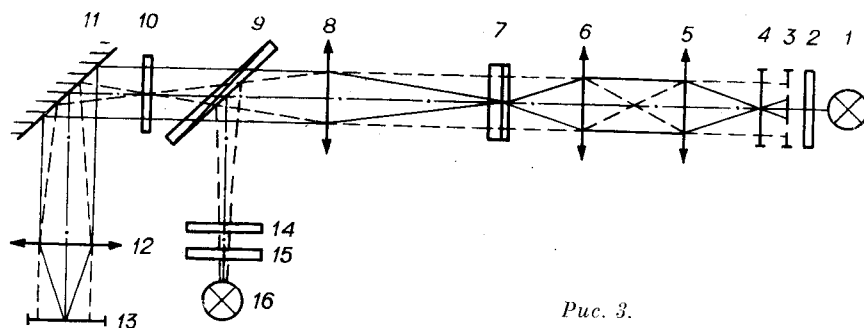


Рис. 3.



5. Grenot M., Pergale I., Donjon I., Marie G. New Electro-Optic Light Valve Device for Image Storage and Processing.— Appl. Phys. Lett., 1972, vol. 21, p. 83.
6. Дун А. З. и др. Фотоэлектрооптический преобразователь на основе охлаждаемого кристалла  $KD_2PO_4$  и селенового фотослоя.— Электрон. техника. Сер. 4. Электронно-вакуумные и газоразрядные приборы, 1978, вып. 7, с. 71.
7. Нежевенко Е. С., Потатуркин О. И., Хоцкин В. И. Распознавание изображений в дифракционных корреляторах интенсивности.— В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии. Л.: изд. ЛИЯФ, 1980, с. 74.
8. Frieser H. Photographic Information Recording.— L.— N.Y., Focal Press. Ltd., 1975.

Поступила в редакцию 4 октября 1981 г.

УДК 534.2

Л. Д. ГИК  
(Новосибирск)

### ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ФАЗОВЫХ И АМПЛИТУДНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ В АКУСТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ

Во всех практических случаях получения неоптических голограмм неизбежны фазовые и амплитудные погрешности. Их причиной являются ошибки расположения точек приема и излучения, влияние контакта датчика со средой, искажающие факторы аппаратуры, дискретность квантования при вводе в ЭВМ и другие факторы. Дать общие оценки действия этих погрешностей на все возможные случаи голографирования едва ли возможно, так как в некоторых частных ситуациях зависимости принимают весьма специфическую форму. Примером может быть случай расположения объекта на малом расстоянии от голограммы в сравнении с ее собственными размерами. Ниже делается попытка, абстрагируясь от влияния второстепенных факторов во имя простоты и наглядности конечного результата, произвести оценку для наиболее типичных случаев практики.

Рассмотрим схему голографирования, показанную на рис. 1. Источник зондирующего сигнала гармонической формы  $I$  и группа из  $N$  приемников расположены в плоскости наблюдения  $\Gamma$ . Примем, что объект  $O$  расположен под источником на расстоянии от  $\Gamma$ , значительно превышающем удаление приемника от источника. Примем также, что удаления различных точек объекта от плоскости  $\Gamma$  имеют один порядок. Тогда результат восстановления голографического изображения можно приближенно представить не в виде интеграла Кирхгофа от зарегистрированного поля\*, а в виде суммы

$$F_i = \sum_i^N U_i^{(i)}. \quad (1)$$

Здесь символом  $U_i^{(i)}$  обозначен сигнал, зарегистрированный  $i$ -м приемником и приведенный по фазе к точке  $A_i$  (введена временная поправка на запаздывание при движении зондирующего сигнала по траектории  $IA_i\Pi_i$ ).

Будем считать, что при отсутствии амплитудных и фазовых ошибок изображение восстанавливается правильно. Под этим подразумеваются два условия. Во-первых, если на объекте имеется отражающий участок  $A_i$ , посылающий на приемники  $\Pi_i$  сигнал, превышающий некоторый порог

\* Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография.— М.: Мир, 1973.