

- симметричной паразитной импульсной помехе, имеющей место при коммутации нагрузочного МДП-транзистора. Однако возможно уменьшение
- In: 1972 Fall Joint Computer Conf., AFIPS Cont. Proc. Montvale. N. Y.: AFIPS Press, 1972, p. 681—690.
3. Гибин И. С. Расчет и выбор параметров оптических систем голограммных запоминающих устройств.— Автометрия, 1974, № 6.
  4. Прангишвили И. В., Попов Г. М., Смородинова О. Г., Чудин А. А. Однородные микроэлектронные ассоциативные процессоры.— М.: Сов. радио, 1973.
  5. Jäntsh O., Hundelshausen U. V., Feigt I., Hering W. Detector Matrix for a Holographic Memory.— Sci. Res. and Dev. Reports, 1973, vol. 2, N 1, p. 34—38.
  6. Веклер Г. Пути создания фотополупроводниковых устройств передачи изображения на основе использования режима накопления заряда.— Электроника, 1967, т. 40, № 9.
  7. Наймарк С. И., Радзюкевич В. П., Ротштейн М. Е. Некоторые методы и аппаратные решения, используемые при испытаниях фотоприемных матричных элементов.— Автометрия, 1977, № 2.

Поступила в редакцию 18 февраля 1981 г.

УДК 621.035

И. И. МОХУНЬ, В. К. ПОЛЯНСКИЙ, В. И. ПРОТАСЕВИЧ, В. В. ЯЦЕНКО

(Черновцы — Казань)

### ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА

Из-за наличия фазовых неоднородностей тракты оптических систем обычно обладают волновыми aberrациями, которые существенно снижают отношение сигнал — шум (ОСШ).

В данной работе на примере системы согласованной фильтрации сделана попытка оценить влияние фазовых неоднородностей на ОСШ в корреляционной плоскости и выработать практические рекомендации, касающиеся конструирования оптического тракта.

Рассмотрим оптическую схему типичной когерентной системы обработки информации (рис. 1). Для простоты проанализируем одномерный случай. Объект  $T$  с входной функцией  $f(x)$  освещается плоской волной. В фокальной плоскости объектива  $O_1$  (в идеальном случае) поле описывается преобразованием Фурье от входной функции  $f(x)$ . В этой плоскости записывается голограмма-фильтр  $H$ . В дальнейшем, восстанавливая голограмму-фильтр объектным пучком, исследуем корреляционную функцию, наблюдаемую в плоскости обратного фурье-преобразования  $P_n$ . В этом случае ОСШ не зависит от положения  $f(x)$  в плоскости  $P_x$  (т. е. система пространственно инвариантна) [1].

Если в оптическом тракте пучка имеется фазовая неоднородность  $\Phi$  (транспарант), расположенная вблизи входной плоскости  $P_x$ , то она модулирует входную функцию. Когда расстояние между  $P_x$  и транспарантом велико, то модулируется поле, определяемое дифракцией на объекте  $T$ .

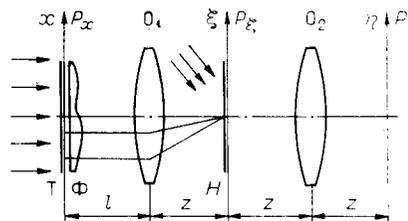


Рис. 1.

В дальнейшем под входной плоскостью  $P_x$  системы будем понимать плоскость, расположенную вблизи фазовой неоднородности, а под входной функцией — распределение поля в этой плоскости.

Ограничимся исследованием класса «тонких» неоднородностей. Фазовую неоднородность будем считать тонкой (приближение, аналогичное приближению тонкой линзы [2]).

Фазовая неоднородность вносит волновую aberrацию  $\varphi(x)$ . Тогда поле в плоскости  $P_\xi$  запишется в виде

$$U(\xi) \sim \int_{-\infty}^{+\infty} f(x - x_i) e^{j(2\pi/\lambda)\varphi(x)} e^{-j(2\pi/\lambda z)x\xi} dx, \quad (1)$$

где  $\xi$  — координата в Фурье-плоскости  $P_\xi$ ,  $z$  — фокусное расстояние объектива  $O_1$ ,  $\lambda$  — длина волны освещающего пучка.  $x_i$  определяет положение

$$\varphi(x) = \varphi(x_i) + \varphi'(x_i)\Delta x + (\varphi''(x_i)/2)\Delta x^2 + R(\theta, x). \quad (2)$$

Здесь  $\Delta x = x - x_i$ ,  $R(\theta, x)$  — остаточный член разложения,  $\theta$  — точка, принадлежащая интервалу  $x_i(x)$ .

Если в некоторой окрестности точки  $x_i$

$$|R(\theta, x)| \leq \lambda/4, \quad (3)$$

то  $\varphi(x)$ , заданная на интервале, соответствующем этой окрестности, представленная первыми тремя членами, в оптическом смысле может считаться неотличимой (критерий Рэлея) от действительной  $\varphi(x)$ . Исследуя  $|R(\theta, x)|$  на экстремум по  $x$  и используя (3), определим соответствующий интервал  $x_{1i}x_{2i}$ .

Пусть входная функция  $f(x)$  определена только на этом интервале. Тогда

$$U(\xi) \sim \int_{x_{1i}}^{x_{2i}} f(x - x_i) e^{j(2\pi/\lambda)\{\varphi(x_i) + \varphi'(x_i)\Delta x + (\varphi''(x_i)/2)\Delta x^2\}} e^{-j(2\pi/\lambda z)x\xi} dx. \quad (4)$$

Рассмотрим фазовые задержки, которые описывает каждый член разложения. Фазовая задержка, характеризующаяся первым членом, является постоянным фазовым сдвигом и поэтому для рассмотрения неактуальна. Изменение фазы, соответствующее второму члену, приводит к поперечному сдвигу Фурье-спектра  $f(x)$  в плоскости  $P_\xi$ .

Третий член — фазовая задержка, аналогичная задержке тонкой линзы с фокусным расстоянием  $1/\varphi''(x)$ , которая приводит к продольному сдвигу Фурье-спектра  $f(x)$  и изменению его масштаба.

Оценим изменение ОСШ, возникающее при сканировании  $f(x)$  во входной плоскости, обусловленное поперечным сдвигом спектра. Из предположений о характере фазовой неоднородности следует, что по мере уменьшения интервала  $x_{1i}x_{2i}$  можно ограничиться в разложении  $\varphi(x)$  двумя членами, положив

$$\Delta\varphi_i = |(\varphi''(x_i)/2)\Delta x^2 + R(\theta, x)| \leq \lambda/4. \quad (5)$$

Окрестность точки  $x_i$ , такую, что выполняется условие (5), назовем оптимальным апертурным отверстием (ОАО). Если входная функция определена на интервале, соответствующем ОАО, то поле в плоскости  $P_\xi$

запишется в виде

$$U(\xi) \sim e^{j(2\pi/\lambda)[\varphi(x_i) - \varphi'(x_i)x_i]} \int_{x_{1i}}^{x_{2i}} f(x - x_i) e^{-j(2\pi/\lambda)x(\xi - \varphi'(x_i)z)} dx. \quad (6)$$

С точностью до постоянного фазового множителя

$$U(\xi) \sim \mathcal{F}\{\xi - \Delta\xi\}, \quad (7)$$

где  $\mathcal{F}\{\xi\} = \mathcal{F}\{f(x)\}$  — фурье-образ входной функции  $f(x)$ ,  $\Delta\xi = z\varphi'(x_i)$ .

Таким образом, если  $f(x)$  задана на интервале, соответствующем ОАО (обозначим его величину  $S_i$ ), то изменение ОСШ при сканировании  $f(x)$  в плоскости  $P_x$  будет обусловлено лишь сдвигом спектра на величину  $\Delta\xi = z\varphi'(x_i)$ .

Известно, что изменение ОСШ, возникающее при поперечном сдвиге фильтра в плоскости  $P_x$ , описывается зависимостью [3]

$$Q_{\min} \sim \text{sinc}^2 \{A(2\pi/\lambda z)\Delta\xi\}, \quad (8)$$

где  $2A$  — входное отверстие системы.

В нашем случае  $A = S/2$ ,  $S = \min\{S_i\}$ . Тогда изменение ОСШ запишется в виде

$$Q_{\min} \sim \text{sinc}^2 \{S(\pi/\lambda)\varphi'(x_i)\}. \quad (9)$$

Для двумерного случая можно показать, что

$$Q_{\min} \sim \text{sinc}^2 \left\{ S_x \frac{\pi}{\lambda} \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=x_i \\ y=y_i}} \right\} \text{sinc}^2 \left\{ S_y \frac{\pi}{\lambda} \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=x_i \\ y=y_i}} \right\}. \quad (10)$$

Приведенные зависимости были проверены экспериментально. В качестве модели фазовой неоднородности использовались стеклянные подложки фотопластинок типа ВР-Л. На рис. 2, *a—в* представлены интерферограммы участков исследуемой неоднородности и соответствующие им ФРТ (функции рассеяния точки) (расстояние между полосами соответствует изменению фазы на  $\pi$ ). Из рис. 2, *в* видно, что для входного отверстия диаметром 3 мм форма ФРТ приближается к идеальной, т. е. отверстие диаметром 3 мм — ОАО. Входные функции, «вписывающиеся» в отверстие с таким диаметром, будут создавать в фокальной плоскости объектива  $O_1$  распределение поля, близкое к фурье-образу  $f(x, y)$ .

При отверстиях больше ОАО (см. рис. 2: *a* —  $\varnothing$  24 мм, *б* —  $\varnothing$  6 мм) ФРТ оказывается более сложной, она составлена как бы из нескольких

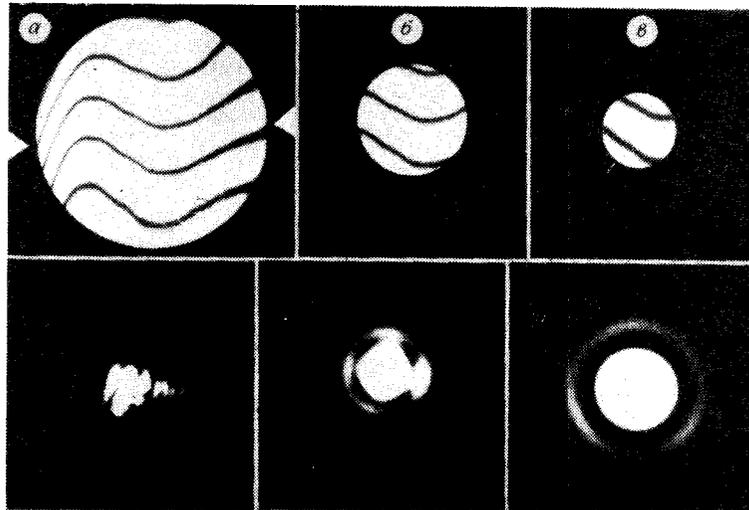


Рис. 2.

взаимно интерферирующих световых пятен, соответствующих ОАО. Сдвиги пятен определяются производной по волновой аберрации в данной точке. Апертурное отверстие как бы синтезировано из нескольких апертур. Структура ФРТ имеет индивидуальный характер. В этом случае поле в плоскости  $P_3$ , создаваемое объектом, определяется как самим объектом, так и модулирующим его участком неоднородности. Дальнейшее увеличение входного отверстия, очевидно, будет сопровождаться статистическим осреднением по ансамблю ОАО, что приводит к «сглаживанию» ФРТ. Поле в пятне рассеяния в пределах входного отверстия становится все более однородным, распределение интенсивности приближается к гауссову.

В качестве тест-объектов использовались квадраты с поперечными размерами меньше ОАО, ОАО, больше ОАО. Квадрат устанавливался в центр входного отверстия. В этом положении записывалась голограмма-фильтр. Затем на стадии восстановления квадрат дискретно скапировался во входной плоскости с некоторым шагом  $d$ . Для этих положений измерялись максимумы корреляционной функции. Нормировка проводилась по максимуму корреляционной функции квадрата, расположенного в исходном положении.

На рис. 3 представлены теоретическая (1) и экспериментальная (2) кривые изменения ОСШ в зависимости от положения квадрата  $1,2 \times 1,2$  мм (меньше ОАО) во входной плоскости коррелятора. Направления скапирования указаны на рис. 2,  $a$  стрелками. Из рисунка видно, что теоретическая оценка хорошо совпадает с экспериментальными результатами. Максимальное падение наблюдается в области ( $x < 6$  мм), где производная от волновой аберрации по абсолютной величине наибольшая.

С целью исследования влияния фазовой задержки, описываемой квадратичным и высших порядков членами разложения  $\varphi(x)$ , проводилась поперечная подстройка фильтра в плоскости  $P_3$ . Соответствующие результаты приведены в таблице. Из таблицы видно, что при подстройке фильтра для объектов, заданных на интервале, меньшем, чем размеры ОАО, удается почти полностью исключить падение ОСШ. Для объектов, сравнимых с ОАО, ОСШ при подстройке можно довести до величины порядка 80–90 %. Это свидетельствует о том, что для объектов, сравнимых с ОАО, основной характер поля в плоскости  $P_3$  мало зависит от положения объекта во входной плоскости и отличается от эталонного незначительными деталями. Иная картина наблюдается для объектов, имеющих поперечные размеры больше, чем ОАО. В этом случае фурье-спектр объекта, искаженный фазовой неоднородностью, приобретает ярко индивидуальную структуру, определяемую в равной степени как объектом, так и модулирующим его участком неоднородности.

Для таких объектов основной вклад в изменение ОСШ вносит фазовая задержка, описываемая квадратичным и более высшего порядка членами разложения  $\varphi(x)$  (эффект «размытия»).

Для квадрата размером  $6 \times 6$  мм падение ОСШ за счет сдвига спект-

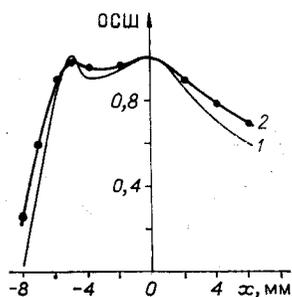


Рис. 3.

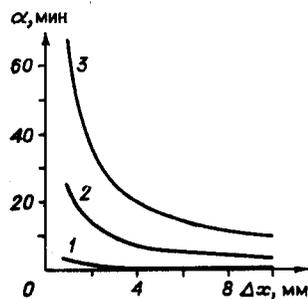


Рис. 4.

1,2×1,2	С поперечной подстройкой (ПП)	0,98	1,02	0,99	1	0,98	0,99	0,99	1,01
3×3	С ПП	0,76	0,76	0,85	1	0,91	0,80	0,86	0,90
6×6	Без ПП	0,05	0,06	0,11	1	0,08	0,03	0,02	—
	С ПП	0,17	0,17	0,31	1	0,19	0,27	0,21	—

ра не превышало 20%, в то время как изменение формы спектра приводило к падению ОСШ на величину более 70 %.

На основании полученных результатов можно дать практические рекомендации, касающиеся качества и юстировки оптических элементов коррелятора. Аберрации, возникающие при неточном изготовлении и юстировке оптических элементов, являются тонкими фазовыми неоднородностями. Поэтому к оценке их влияния на работу коррелятора применим подход, описанный в данной работе.

Задавая минимально допустимое ОСШ и интервал, на котором определяется входная функция, используя (5), (9), (10), можно сделать вывод о допустимой величине волновой аберрации оптических элементов и ее производных.

Рассмотрим, например, влияние аберрации типа кома, возникающей при разъюстировке на малый угол  $\alpha$  фурье-преобразующего объектива  $O_1$ . Пусть входная функция освещается идеальным плоским пучком. Плоскость  $P_x$  находится в непосредственной близости от объектива  $O_1$ . Волновая аберрация запишется [4] как

$$\varphi(x) = (\alpha/4f^2)x^3. \quad (11)$$

Максимальная величина  $\Delta\varphi_i$  будет достигаться в точках, лежащих на краю входного отверстия системы, так как в этих точках вторая производная от волновой аберрации принимает наибольшие значения,  $\frac{d\varphi(x)}{dx}$  достигает максимума в этих же точках. Можно показать, что  $Q_{\min}$ , обусловленное сдвигом фурье-спектра, запишется следующим образом:

$$Q_{\min} = \text{sinc}^2 \{(\pi/\lambda)(\Delta x \alpha/4z^2)\{3A^2 - 3A\Delta x + \Delta x^2\}\}, \quad (12)$$

где  $2A$  — входное отверстие системы,  $\Delta x$  — интервал задания функции.

На рис. 4 приведены зависимости угла разъюстировки фурье-преобразующего объектива (1 —  $f = 100$  мм, 2 — 300 мм, 3 — 500 мм), при котором ОСШ падает на величину не более 20 % ( $\lambda = 0,6328$  мкм,  $A = 30$  мм). Из рис. 4 видно, что даже для  $f = 300$  мм и  $\Delta x = 6$  мм (10% от величины входного отверстия системы) допуски на юстировку достаточно жестки ( $\alpha \leq 5'$ ).

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Влияние фазовых неоднородностей существенно зависит от условий ограничения световых пучков.
2. Это влияние имеет двойной характер: фазовые добавки, обусловленные первой (а) и второй (б) производными от волновой аберрации, вызывают а) смещение изображения точки, спектра Фурье, что при больших отверстиях приводит к размытию изображения, фурье-спектра; б) размытие изображения, спектра Фурье в результате локальной дефокусировки.

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