

МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКИХ АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

УДК 681.7.013.82

А. Н. КОРОЛЕВ

(Ленинград)

ПСЕВДОКОГЕРЕНТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ НЕКОГЕРЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Развитие когерентной оптики и голографии привело к созданию ряда методов преобразования изображений, основанных на выполнении операций с комплексными величинами. Когерентная оптика, оперирующая амплитудой световой волны, позволила реализовать методы восстановления искаженных изображений, корреляционного анализа и распознавания образов.

Однако несмотря на свои достоинства когерентная оптика обладает и существенными недостатками. К ним прежде всего следует отнести когерентные шумы, искажающие изображение. Борьба с шумами приводит к высоким требованиям к качеству и чистоте используемых оптических элементов. С амплитудным характером взаимодействия в когерентной системе связано ограничение класса используемых объектов. Ввод информации в когерентной оптике осуществляется, как правило, с помощью прозрачных транспарантов, причем для компенсации фазовых искажений их приходится помещать в иммерсионную кювету. Наконец, следует отметить высокие требования к точности юстировки оптических элементов и точности установки фильтрующих амплитудных или амплитудно-фазовых транспарантов.

Как известно, некогерентная система не имеет указанных недостатков; она характеризуется избыточной, многоканальной природой, что делает ее устойчивой к шумам, типичным для когерентной системы, нечувствительна к фазовым характеристикам объектов и может оперировать различными входными объектами, в том числе самосветящимися и рассеивающими, неприемлемыми для когерентной системы. В такой системе требования к точности установки апертурных диафрагм, трансформирующих закон изменения освещенности на выходе, значительно ниже.

В то же время некогерентная система в своей обычной форме оперирует интенсивностью излучения, обладает действительным неотрицательным импульсным откликом и может осуществлять только преобразования действительных неотрицательных величин. Это не позволяет выполнять в ней такие линейные преобразования, как обратная свертка, фильтрация, дифференцирование и другие, требующие двухполярных импульсных откликов.

Настоящая работа посвящена обсуждению некоторых возможностей синтеза двухполярного импульсного отклика в некогерентных системах с целью преобразования изображений.

Любая физическая система, оперирующая двухполярными сигналами, является когерентной в широком смысле по отношению к системе с однополярными сигналами. Так, электрическая система, использующая положительные и отрицательные сигналы, в принципе когерентна. Векторная природа поляризации тоже может служить основой для реализации двухполярных величин. С учетом этого далее рассматриваются методы преобразования некогерентных изображений, названные нами псевдокогерентными.

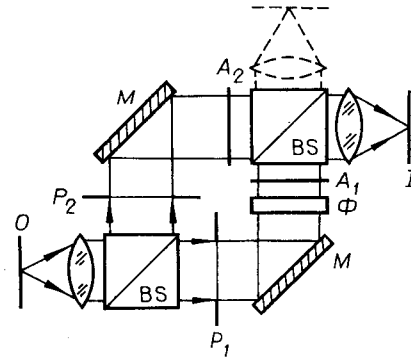


Рис. 1.

Характеристики некогерентной системы. Объект в некогерентной системе может быть самосветящимся или освещаться пространственно-некогерентным светом. Здесь и далее положим, что освещение объекта квазимонохроматическое.

Обозначим функцию амплитудного пропускания в плоскости зрачка $P(u, v)$, где u, v — координаты, нормированные на произведение длины волны и фокусного расстояния.

Для простоты рассмотрим одномерный случай.

Известно, что связь между объектом $O(x)$ и изображением $I(x)$ определяется соотношением

$$I(x) = O(x) * F(x).$$

Здесь * — операция свертки.

Функция рассеяния точки (ФРТ) для интенсивности

$$F(x) = |p(x)|^2,$$

где $p(x)$ — амплитудная ФРТ, соответствующая преобразованию Фурье функции амплитудного пропускания зрачка $P(u)$.

В частотной области

$$\hat{I}(u) = \hat{O}(u)T(u),$$

где $\hat{I}(u)$ и $\hat{O}(u)$ — преобразования Фурье $I(x)$ и $O(x)$ соответственно; $T(u)$ — оптическая передаточная функция (ОПФ), определяемая автокорреляцией функции $P(u)$:

$$T(u) = P(u) \otimes P(u). \quad (1)$$

Принцип синтеза ОПФ. Положительная природа функции рассеяния $F(x)$ в некогерентной системе накладывает ограничения на характер ОПФ — симметричной функции, модуль которой — функция передачи модуляции (ФПМ) — на любой частоте всегда меньше, чем его величина на нулевой частоте, равная 1. Для преодоления этих ограничений было предложено использовать в системе два зрачка с амплитудным пропусканием $P_1(u)$ и $P_2(u)$ с последующим преобразованием выходной интенсивности света в оптические, электрические или цифровые сигналы, которые могут быть биполярными [1—3].

В [1] рассматриваются два метода синтеза ОПФ. В первом из них синтез ОПФ проводится без взаимодействия зрачков. Результирующая ОПФ представляет собой взвешенную разность двух обычных, к примеру $[P_1(u) \otimes P_1(u)] - [P_2(u) \otimes P_2(u)]$. Во втором методе синтезированная ОПФ характеризуется функцией кросс-корреляции зрачков $P_1(u) \otimes P_2(u)$ или $P_2(u) \otimes P_1(u)$.

На рис. 1 приведена схема синтеза ОПФ в некогерентной системе при использовании двух зрачков [1]. Пространство между линзами опти-

ческой системы с помощью интерферометра Маха — Цендера разбито на две ветви, каждая из которых имеет транспарант, определяющий функцию пропускания зрачка $P(u)$, и ослабитель светового потока. В одной из ветвей установлено фазосдвигающее устройство. Если одна из ветвей перекрыта, то получается обычная однозрачковая некогерентная система. Очевидно, что эффективная зрачковая функция в двухзрачковой системе будет иметь вид

$$P(u) = A_1 P_1(u) \exp(i\varphi) + A_2 P_2(u),$$

где A_1 и A_2 — пропускание ослабителей в обоих каналах, φ — величина фазового сдвига.

ОПФ такой системы в соответствии с выражением (1)

$$T(u) = A_1^2 [P_1(u) \otimes P_1(u)] + A_2^2 [P_2(u) \otimes P_2(u)] + A_1 A_2 \{ [P_1(u) \otimes P_2(u)] \times \exp(i\varphi) + [P_2(u) \otimes P_1(u)] \exp(-i\varphi) \}. \quad (2)$$

Результирующую ФРТ можно записать в виде

$$F(x) = A_1^2 |p_1(x)|^2 + A_2^2 |p_2(x)|^2 + A_1 A_2 [p_1(x) p_2^*(x) \exp(i\varphi) + p_1^*(x) p_2(x) \exp(-i\varphi)]. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) полностью определяют оптические свойства такой системы. Очевидно, что, изменяя значения A_1 , A_2 и φ при разных $P_1(u)$ и $P_2(u)$, можно существенно изменять ее характеристики. Исследуем все реализуемые импульсные отклики в зависимости от значений параметров A_1 , A_2 и φ . Для этого представим $F(x)$ в виде $F(x; A_1, A_2, \varphi)$.

При $A_2 = 0$ и $A_1 = 0$ из уравнения (3) можно соответственно получить

$$F_1(x) = F(x; 1, 0, 0) = |p_1(x)|^2, \quad (4)$$

$$F_2(x) = F(x; 0, 1, 0) = |p_2(x)|^2. \quad (5)$$

В этом случае каналы 1 и 2 независимо друг от друга формируют изображение объекта; взаимодействие зрачков отсутствует. Результирующая функция рассеяния

$$F_s(x) = \gamma_1 F_1(x) + \gamma_2 F_2(x), \quad (6)$$

где γ_1 и γ_2 — весовые коэффициенты. Так как $F_1(x)$ и $F_2(x)$ положительны, то при вычитании γ_1 и γ_2 имеют противоположные знаки.

Синтез ОПФ при взаимодействии зрачков предусматривает два состояния системы с соответствующими зрачковыми функциями:

$$P_a(u) = A_1 P_1(u) \exp(i\varphi_0) + A_2 P_2(u), \quad (7)$$

$$P_b(u) = A_1 P_1(u) \exp(i\varphi_0 + \pi) + A_2 P_2(u), \quad (8)$$

отличающимися сдвигом фазы на π в одном из зрачков. Результирующая функция рассеяния

$$F_s(x) = F_a(x) - F_b(x). \quad (9)$$

В соответствии с выражениями (7)–(9) получим из уравнения (3) действительную и мнимую части $F_s(x)$ в виде

$$F_{\text{д}}(x) = \frac{1}{4} [F(x; 1, 1, 0) - F(x; 1, 1, \pi)] = \frac{1}{2} [p_1(x) p_2^*(x) + p_1^*(x) p_2(x)] = |p_1(x) p_2(x)| \cos[\Theta_1(x) - \Theta_2(x)], \quad (10)$$

$$F_{\text{м}}(x) = \frac{1}{4} \left[F\left(x; 1, 1, -\frac{\pi}{2}\right) - F\left(x; 1, 1, \frac{\pi}{2}\right) \right] = \frac{i}{2} [p_1(x) p_2^*(x) - p_1^*(x) p_2(x)] = |p_1(x) p_2(x)| \sin[\Theta_1(x) - \Theta_2(x)] \quad (11)$$

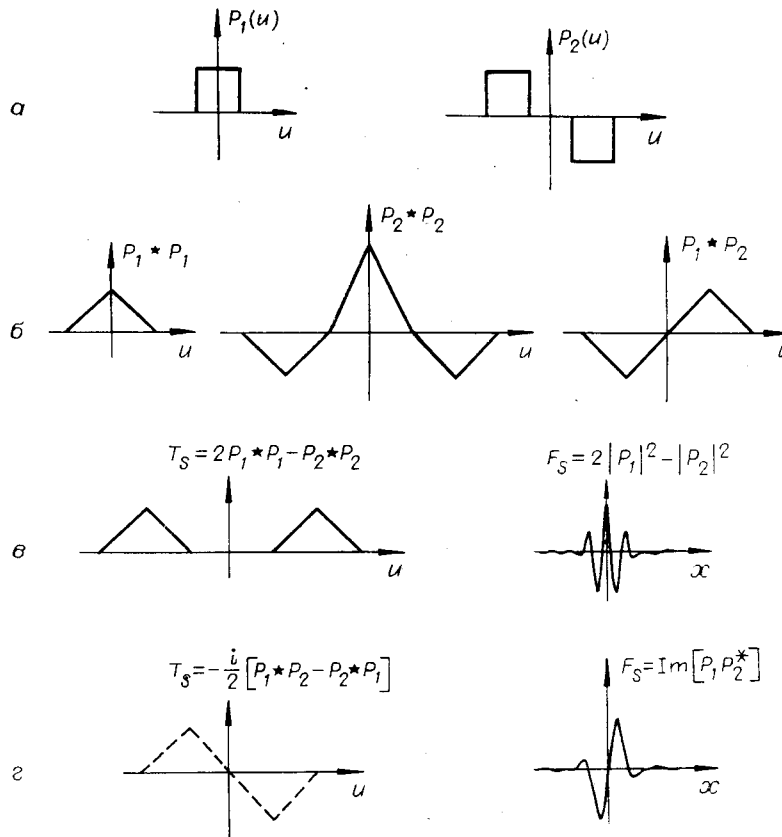


Рис. 2.

$(\Theta(x))$ — аргумент амплитудного импульсного отклика с модулем $|p(x)|$.
Покажем, что

$$F_s(x) = 4 \cos \varphi_0 |p_1(x)p_2(x)| \cos [\Theta_1(x) - \Theta_2(x)] - 4 \sin \varphi_0 \times \\ \times |p_1(x)p_2(x)| \sin [\Theta_1(x) - \Theta_2(x)] = \alpha F_d(x) + \beta F_m(x).$$

Здесь $\alpha = 4 \cos \varphi_0$, $\beta = -4 \sin \varphi_0$. Видно, что, варьируя фазу φ_0 , можно изменять относительные веса F_d и F_m .

ОПФ, соответствующие импульсным откликам (4), (5), (10) и (11), запишем в виде

$$T_1(u) = P_1(u) \otimes P_1(u), \\ T_2(u) = P_2(u) \otimes P_2(u), \\ T_d(u) = (1/2)[P_1(u) \otimes P_2(u) + P_2(u) \otimes P_1(u)], \\ T_m(u) = (-i/2)[P_1(u) \otimes P_2(u) - P_2(u) \otimes P_1(u)].$$

На рис. 2 приведены примеры синтеза двухполярных импульсных откликов при использовании зрачков с действительными зрачковыми функциями: *a* — функции амплитудного пропускания зрачков $P_1(u)$ и $P_2(u)$, *б* — ОПФ оптической системы, определяемые автокорреляцией зрачковых функций. Здесь же приведена функция кросс-корреляции $P_1(u) \otimes P_2(u)$, соответствующая режиму взаимодействия зрачков. На рис. 2, *в* и *г* показаны результаты синтеза в обоих режимах. Результат, полученный путем вычитания двух изображений без взаимодействия зрачков, соответствует высокочастотной фильтрации и имеет ОПФ и

ФРТ. При взаимодействии зрачков результат вычитания соответствует операции дифференцирования; ОПФ и ФРТ в этом случае асимметричны.

Из приведенного примера видно, что, используя двухзрачковый синтез, можно получить различные формы ОПФ и двухполярные импульсные отклики, не реализуемые в обычной некогерентной системе.

Получение результирующей ОПФ. Синтез ОПФ в некогерентной системе может быть выполнен различными методами. Метод прямого вычитания предусматривает реализацию двухполярной ФРТ путем вычитания одной однополярной функции из другой.

Другой метод предусматривает синтез двухполярной ФРТ в некогерентной системе с использованием однополярных функций и пространственной [2] или временной [3] несущей.

Практическая реализация синтеза ОПФ предполагает, как правило, поэлементное считывание изображений. Метод одновременного вычитания требует синхронного сканирования в обоих каналах, метод последовательного вычитания — использования буферной памяти. Формирование пространственной или временной несущей при синтезе ОПФ может проводиться электронными методами с последующей демодуляцией видеосигнала [2—4] и методами поляризационного вычитания [5, 6]. Скапирование изображений при синтезе ОПФ в некогерентной системе является естественным с точки зрения его использования в гибридных системах обработки информации. Однако возможна чисто оптическая реализация синтеза ОПФ без применения фотоэлектрических преобразователей [7].

В режиме синтеза без взаимодействия зрачков вполне применимы обычные оптические системы. Режим взаимодействия зрачков требует использования интерференционных систем, например интерферометра Маха — Цендера [1] или Майкельсона [3].

Искажения при синтезе. В работе [1] рассмотрены условия минимизации шумов для случая синтеза без взаимодействия зрачков. В соответствии с выражением (6) синтезированный импульсный отклик $F_s(x)$ формируется из двух положительных компонентов $F_1(x)$ и $F_2(x)$. Будем считать для простоты $\gamma_1 = 1$, $\gamma_2 = -1$.

Распределение интенсивности в синтезированном изображении можно представить в виде

$$I_s(x) = I_+(x) - I_-(x),$$

где

$$I_+(x) = O(x) * F_1(x),$$

$$I_-(x) = O(x) * F_2(x).$$

В качестве критерия минимизации шумов возьмем энергию шумов E_n , предположив, что имеет место детектирование изображения и шум приемника пропорционален падающей интенсивности светового потока (случай дробового шума), т. е.

$$E_n \approx \int_{-\infty}^{+\infty} I_+(x) dx + \int_{-\infty}^{+\infty} I_-(x) dx.$$

Используя преобразование Фурье, получим

$$E_n \approx \int_u \widehat{O}(u) [T_1(u) + T_2(u)] du.$$

Если $F_s(x) = F_1(x) - F_2(x)$ и $F_1(x) \geq 0$, $F_2(x) \geq 0$, то, минимизируя $[T_1(u) + T_2(u)]$, найдем наименьший уровень шумов. Условие минимума выполняется при

$$F_1(x) = (1/2)[F_s(x) + |F_s(x)|], \tag{12}$$

$$F_2(x) = (1/2)[-F_s(x) + |F_s(x)|],$$

т. е. $F_1(x)$, $F_2(x)$ — соответственно положительная и отрицательная части $F_s(x)$.

Можно показать, что отношение сигнал/шум в окончательном изображении зависит от величины

$$m(x) = |F_1(x) - F_2(x)| / (F_1(x) + F_2(x)). \quad (13)$$

Очевидно, что $0 \leq m(x) \leq 1$ и $m(x) = 1$, если $F_1(x)$ и $F_2(x)$ соответствуют выражениям (12).

Подобный анализ искажений можно провести для синтеза в режиме взаимодействия зрачков.

Преобразование изображений. Рассмотрим в качестве примера задачу восстановления изображения. Пусть в процессе регистрации изображения имеют место пространственно-инвариантные искажения, определяемые ОПФ системы $T(u)$ и ФРТ $F(x)$.

Известно, что для восстановления изображения может быть использован инверсный пространственно-частотный фильтр с характеристикой

$$Q_n(u) = T^*(u) / |T(u)|^2 \quad (14)$$

или с учетом шумов винеровский фильтр

$$Q_n(u) = T^*(u) / (|T(u)|^2 + \varepsilon(u)), \quad (15)$$

где $\varepsilon(u)$ — отношение шум/сигнал в изображении в зависимости от пространственной частоты.

В когерентной оптической системе пространственный фильтр устанавливается в плоскости Фурье-спектра, и на выходе системы получается восстановленное изображение. Преобразование изображения в этом случае происходит в частотной области.

Выполнив обратное преобразование Фурье для частотной характеристики фильтра, получим восстанавливающую функцию рассеяния (ВФР)

$$F_s(x) = \overline{\mathcal{F}}[Q(u)]$$

($\overline{\mathcal{F}}$ — преобразование Фурье).

С помощью ВФР можно выполнить преобразование изображения в предметной плоскости. Восстановленная функция рассеяния будет определяться при этом модулем интеграла свертки

$$F'(x) = \left| \int F(x') F_s(x - x') dx' \right|. \quad (16)$$

Задача состоит, таким образом, в синтезе импульсного отклика $F_s(x)$, адекватного ВФР.

ВФР является двухполярной функцией. В режиме без взаимодействия зрачков синтез ОПФ сводится к реализации двух положительных ФРТ, соответствующих положительной и отрицательной частям ВФР.

В [8] составные части ВФР получены с помощью голограмм, устанавливаемых последовательно в зрачке некогерентной оптической системы. Указанные голограммы рассчитаны на ЭВМ для соответствующих ФРТ. Результат воздействия «положительной» и «отрицательной» зрачковых функций для случая дефокусировки представлен на рис. 3. Восстановленная функция рассеяния получается в результате вычитания изображений.

В [9] описан метод некогерентной фильтрации, основанный на использовании двухщелевой диафрагмы в зрачке оптической системы. Изменение зрачковой функции осуществляется путем введения фазовой пластинки в один из элементов зрачка. Показана возможность реализации высокочастотной фильтрации и дифференцирования в некогерентной системе путем последовательной регистрации изображений с различными зрачковыми функциями и их вычитания.

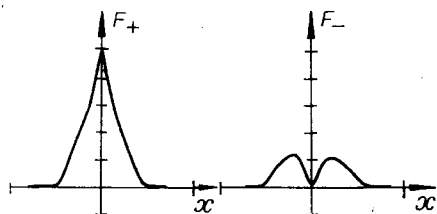


Рис. 3.

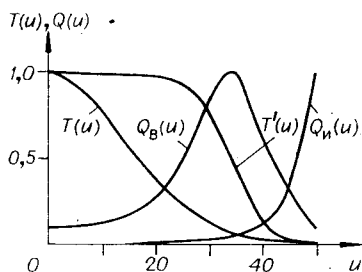


Рис. 5.

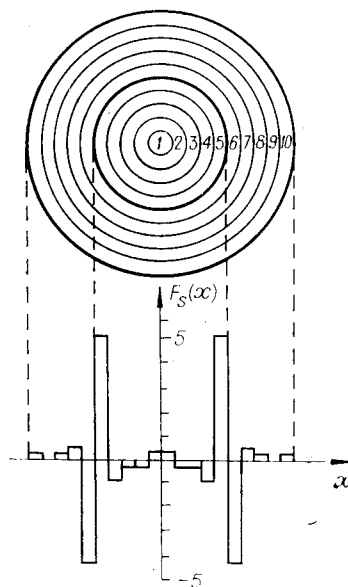


Рис. 4.

При сканировании изображения пространственно-инвариантные преобразования могут быть выполнены методом прямой свертки с ВФР, которая реализуется в виде двух сканирующих апертур, одна из которых соответствует положительной части ВФР, другая — отрицательной. При этом используется двухканальная система регистрации с вычитанием электрических сигналов [10—12]. Очевидно, что эта процедура эквивалентна режиму синтеза ОПФ без взаимодействия зрчков в некогерентной системе, причем изменение характеристик синтезируемой двухполярной ФРТ осуществляется путем изменения формы сканирующих апертур. По этому принципу работает некогерентный аналоговый процессор для преобразования изображений [10]. С его помощью выполнены эксперименты по восстановлению смазанных и дефокусированных изображений.

В [13—15] восстановление смаза и дефокусировки выполнено методом машинного моделирования процедуры прямой свертки искаженного изображения с двухполярной ВФР. Форма ВФР для восстановления дефокусировки, рассчитанной по формуле (15) при $\epsilon(u) = \text{const} = 0,002$, представлена на рис. 4. Величина исходной ФРТ показана сплошной линией и штриховой [15].

В [12] для повышения контраста методом двухканального сканирования применялась ВФР в виде двух диафрагм разного диаметра. Подход к решению задачи напоминает известный в фотографии метод «перезкой маски», используемый для коррекции изображения.

В [10] для коррекции изображения с гауссовской функцией рассеяния методом прямой свертки использовалась диафрагма диаметром 1,25 мм в «положительном» канале и диаметром 2,5 мм — в «отрицательном». Получены различные результаты коррекции при изменении пропускания диафрагмы в «отрицательном» канале.

Для оценки некоторых характеристик ВФР нами выполнено машинное моделирование процедуры псевдокогерентного восстановления гауссовской функции рассеяния. На рис. 5 показана ОПФ оптической системы ($T(u) = \exp[-(u/20)^2]$), заданная аналитически функцией Гаусса. Здесь же приведены характеристики инверсного ($Q_n(u)$) и винеровского ($Q_v(u)$) фильтров для данной ОПФ, рассчитанные по формулам (14) и

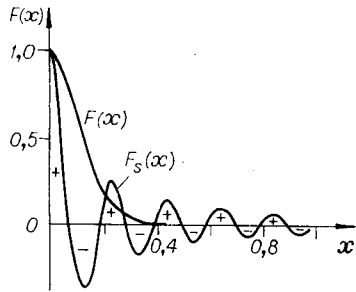


Рис. 6.

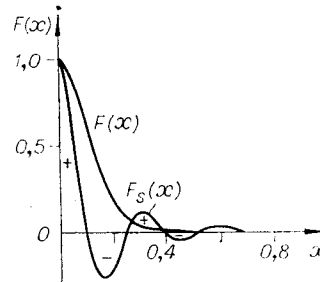


Рис. 7.

(15) соответственно, а также восстановленная ОПФ для винеровской фильтрации ($T'(u) = T(u)Q_v(u)$). На рис. 6 приведены функция рассеяния $F(x)$, соответствующая $T(u)$, и ВФР для инверсного фильтра ($F_{sн}(x) = \int u J_0(2\pi x u) Q_{н}(u) du$), на рис. 7 — $F(x)$ и ВФР для винеровского фильтра ($F_{sb}(x) = \int u J_0(2\pi x u) Q_v(u) du$). ВФР $F_s(x)$ и частотные характеристики фильтров $Q(u)$ связаны между собой преобразованием Гангеля, поскольку являются центрально-симметричными функциями.

Выполненный нами расчет показывает, что ВФР, использованная в виде двух диафрагм различных диаметров для восстановления гауссовской функции рассеяния в [10], является грубым приближением к требуемой ВФР. Значение параметра $m(x)$, определяемое выражением (13), в этом случае меньше 1, что приводит к дополнительным шумам при восстановлении. В то же время аналитический метод определения ВФР обеспечивает значение $m(x) = 1$, а следовательно, максимальное значение отношения сигнал/шум в восстановленном изображении.

Известно, что форма и размер сканирующей апертуры обуславливают характер искажения изображения при считывании. Принято считать, что допустимый размер сканирующей апертуры при считывании не должен превышать 0,2 от полуширины ФРТ. Расчет показывает, что использование сканирующей апертуры, соответствующей характеристикам ВФР, позволяет получить энергетический выигрыш при считывании изображения, так как пропускание такой апертуры в 10–20 раз превышает пропускание обычной диафрагмы. Этот аспект может иметь практическое значение для считывания изображений в условиях дефицита энергии излучения.

Интересный метод восстановления изображения, искаженного сильным смазом, описан в [7]. Метод предполагает выполнение в некогерентной системе операции дифференцирования в направлении смаза и получение на выходе двух восстановленных изображений, разнесенных по величине исходного смаза. Очевидно, что в данном случае величина сдвига при искажении должна превышать размер изображения. Принцип восстановления, реализованный в [7], показан на рис. 8. Восстановленная функция рассеяния получается в результате свертки исходной ФРТ, соответствующей смазу, и дифференцирующей ВФР по формуле (16). Особенностью метода является реализация в некогерентной системе двухполярной ВФР при вычитании двух изображений чисто оптическим методом без сканирования.

Схема экспериментальной установки для некогерентного восстановления смазанного изображения, представленная на рис. 9, содержит обычную систему фильтрации, отличающуюся тем, что в ее частотной плоскости помещена призма Волластона W . На входе и выходе системы установлены скрещенные поляризаторы P_1 и P_2 . Поляризаторы ориентированы таким образом, что их направления поляризации расположе-

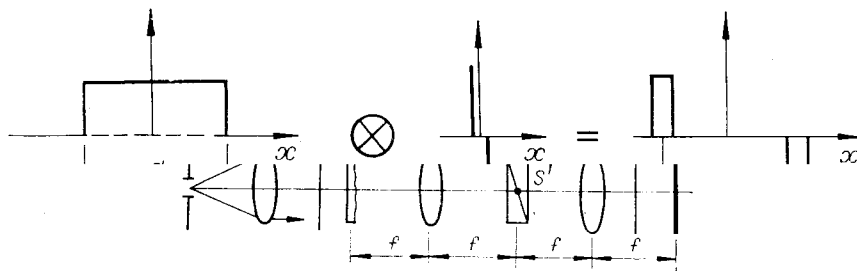


Рис. 9.

ны под углом 45° к направлениям поляризации в призме Волластона. Действие призмы Волластона сводится к расщеплению падающих лучей, что делает эту систему эквивалентной интерферометру сдвига со сложением световых полей в противофазе.

Освещение является в принципе некогерентным, однако для получения интерференционного эффекта в плоскости изображения объект освещается с помощью коллиматора, в фокальной плоскости которого установлена щелевая диафрагма S . При этом степень когерентности в плоскости объекта можно определить исходя из теоремы Ван-Циттера — Цернике по формуле

$$|\gamma_{12}| = |\sin(\pi/\lambda)\alpha f\beta / (\pi/\lambda)\alpha f\beta|,$$

где α — угловое расщепление лучей, создаваемое призмой Волластона; f — фокусное расстояние коллиматора; β — угловой размер щелевой диафрагмы, приведенный к плоскости объекта.

Достаточным является значение $\gamma_{12} = 0,9$, соответствующее в данном случае $\text{sinc}(\pi/4)$. Отсюда $(\pi/\lambda)\alpha f\beta = \pi/4$ и, следовательно, $\beta = \lambda/(4\alpha f)$. Это означает, что при линейном расщеплении в плоскости изображения $0,1$ мм угловая ширина щели должна составлять ~ 5 угл. мин.

В рамках изложенной выше теории псевдокогерентного преобразования некогерентных изображений описанный метод можно рассматривать как реализацию синтеза без взаимодействия зрачков с оптическим вычитанием изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lohmann A. W., Rhodes W. T.— Appl. Opt., 1978, vol. 17, p. 1141.
2. Lohmann.— Appl. Opt., 1977, vol. 16, p. 261.
3. Rhodes W. T.— Appl. Opt., 1977, vol. 16, p. 265.
4. Dashiell S. R., Lohmann A. W., Michaelson J. D.— Opt. Comm., 1973, vol. 8, p. 105.
5. Belvaux J., Lowenthal S., Saimi T.— Opt. Comm., 1972, vol. 5, p. 143.
6. Dashiell S. R., Lohmann A. W.— Opt. Comm., 1973, vol. 8, p. 100.
7. Celaya L., Mallick S.— Appl. Opt., 1978, vol. 17, p. 2191.
8. Chavel P., Lowenthal S.— J. Opt. Soc. Am., 1976, vol. 66, p. 14.
9. Görlitz D., Lanzl F.— Opt. Comm., 1977, vol. 20, p. 68.
10. Swindell W.— Appl. Opt., 1970, vol. 9, p. 2459.
11. Shack R. V.— Pattern Recognition, 1970, vol. 2, p. 123.
12. Schreiber W. F.— Pattern Recognition, 1970, vol. 2, p. 117.
13. Honda T., Tsujiuchi J.— Optica Acta, 1975, vol. 22, p. 537.
14. Honda T., Kumagaja K., Tsujiuchi J.— Optica Acta, 1977, vol. 24, p. 23.
15. Honda T., Tsujiuchi J.— Opt. Comm., 1977, vol. 22, p. 37.

Поступила в редакцию 20 апреля 1979 г.