

2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СХЕМ КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

В основе большинства систем когерентной оптической обработки лежит свойство линз осуществлять преобразование Фурье. К числу основных схем относятся спектроанализаторы и корреляторы различного типа. Ниже кратко рассмотрены некоторые из них.

2.1. Анализатор спектра двумерных оптических сигналов

Схема простейшего оптического анализатора спектра приведена на рис.2.1. Как было показано выше, выходной сигнал такой системы равен преобразованию Фурье входного сигнала:

$$u_2(x_2, y_2) = K \int_{-\Gamma}^{\Gamma} \int_{-\Gamma}^{\Gamma} u_1(x_1, y_1) e^{-2\pi j / \lambda f (x_1 x_2 + y_1 y_2)} dx_1 dy_1 = K U_1(x, h).$$

Знак ядра, соответствующий преобразованию Фурье, обеспечивается правильным выбором направления осей координат в выходной плоскости системы. При этом пространственные частоты входного сигнала ξ, η отображаются в масштабе: $\xi = x_2 / \lambda f$; $\eta = y_2 / \lambda f$.

2.2. Многоканальный когерентный анализатор спектра одномерных сигналов

Используя двумерность оптического сигнала и астигматические линзы, можно создавать многоканальные системы параллельной обработки одномерных пространственных сигналов, в которые с помощью соответствующих устройств

ввода могут быть преобразованы электрические сигналы, одномерные по своей природе.

Схема многоканального анализатора спектра показана на рис. 2.2. Линза L_1 -цилиндрическая, а линза L_2 -сферическая с равными фокусными расстояниями f .

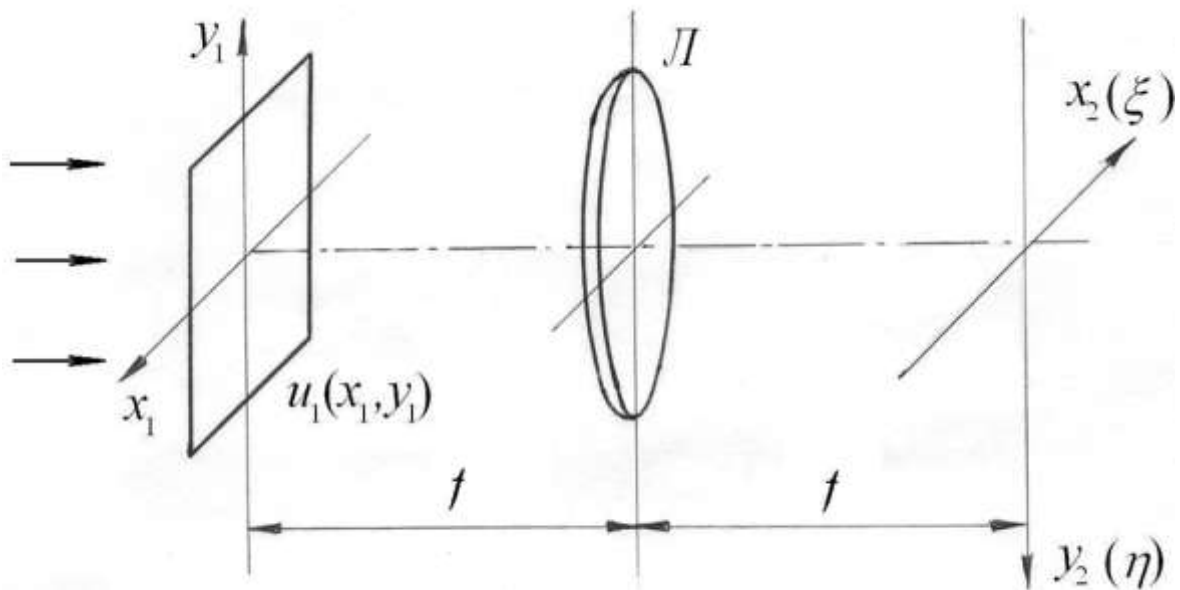


Рис.2.1. Когерентный оптический анализатор спектра

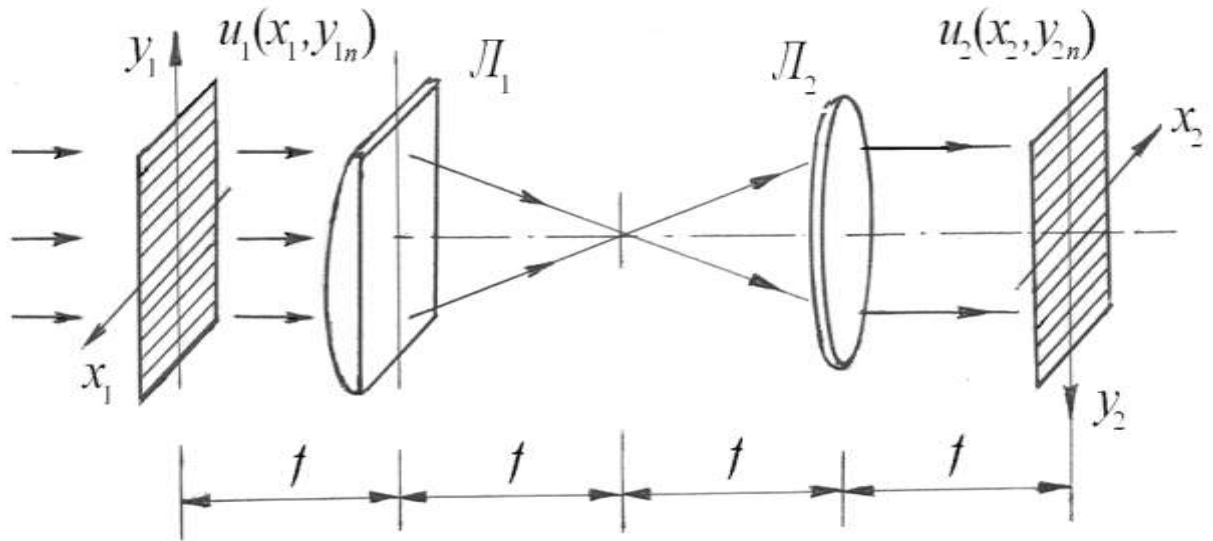


Рис.2.2. Многоканальный когерентный анализатор спектра

Входные сигналы в такой системе распределены вдоль оси x в каналах, расположенных рядом во входной плоскости; y_n - положение канала с номером n по оси y . Учитывая свойство цилиндрической линзы L_1 воздействовать на распределение света только по координате y , нетрудно показать, что данная схема осуществляет преобразование Фурье по координате x и формирование изображения каналов по координате y . Её выходной сигнал равен (см. также (1.23)):

$$\begin{aligned}
 u_2(x_2, y_{2n}) &= K \check{Y}^{(2pj/lf)x_2^2} \int_{-\Gamma}^{\Gamma} u_1(x_1, y_{1n}) e^{-(2pj/lf)x_1 x_2} dx_1 = \\
 &= K \check{Y}^{(2pj/lf)x_2^2} U_1(x, y_{2n}), \quad x = x_2 / lf.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Как и в других схемах, фазовый множитель, стоящий перед знаком интеграла не влияет на выходной сигнал, если его регистрация осуществляется обычным квадратичным фотодетектором.

2.3. Система когерентной пространственной фильтрации

Возможность пространственной фильтрации двумерных оптических сигналов была показана при рассмотрении пространственно-инвариантных систем. Схема устройства, осуществляющего такую фильтрацию, приведена на рис.2.3.

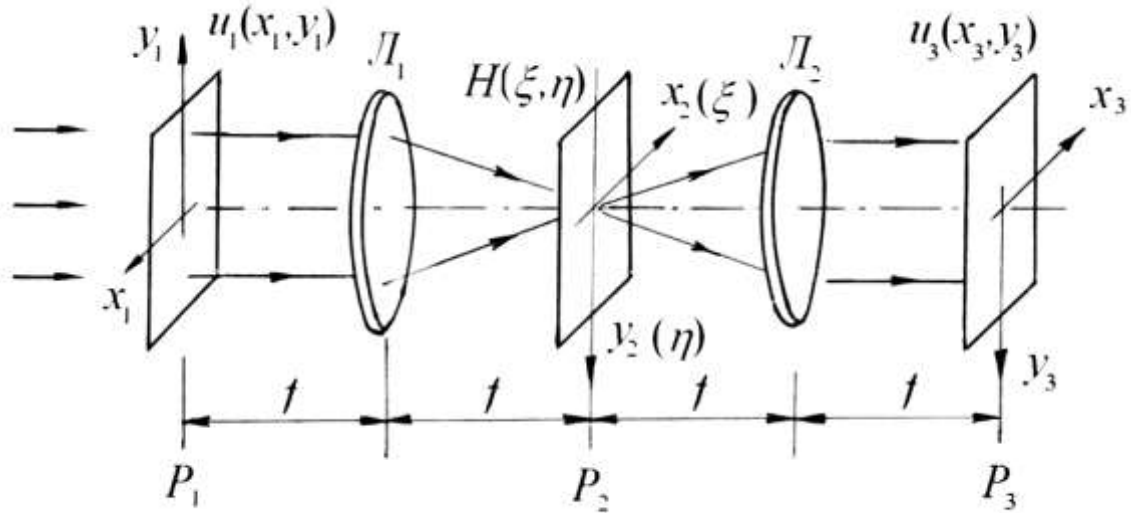


Рис.2.3. Система когерентной пространственной фильтрации

В плоскости P_2 расположен транспарант с коэффициентом пропускания $H(\xi, \eta) = F[h(x, y)]$, где $h(x, y)$ - импульсный отклик фильтра. Оптический сигнал справа за транспарантом равен:

$$u_{2r}(x_2, y_2) = KU_1(x, h)H(x, h).$$

При соответствующем выборе направления осей координат, вторая линза осуществляет обратное преобразование Фурье. В результате выходной сигнал системы будет:

$$\begin{aligned} u_3(x_3, y_3) &\sim K \overset{\Gamma}{\underset{-\Gamma}{\mathcal{F}^{-1}}}[U_1(x, h)H(x, h)] = \\ &= K \overset{\Gamma}{\underset{-\Gamma}{\mathcal{F}}}_{\mathcal{T}} \int_{-\Gamma}^{\Gamma} u_1(x_1, y_1) h(x_3 - x_1, y_3 - y_1) dx_1 dy_1 = K \overset{\Gamma}{\underset{-\Gamma}{\mathcal{F}}}_1(x_3, y_3) \int h(x_3, y_3). \end{aligned}$$

Пространственный фильтр в частотной плоскости системы может состоять из каких-либо диафрагм или поглощающих амплитудных фильтров. Возможно построение и функций пропускания произвольного вида. В последнем случае амплитудную и фазовую часть фильтра обычно делают отдельными, и фильтр

состоит из двух транспарантов, расположенных рядом на пути распространения света. Создание таких фильтров, особенно фазового с произвольной функцией фазовой задержки, является сложной технологической задачей. Преодолеть эту трудность удаётся с помощью голографических фильтров Вандер Люгта (см. п.2.8).

2.4. Многоканальная система пространственной фильтрации

Многоканальная система пространственной фильтрации может быть построена аналогично многоканальному анализатору спектра. Достаточно взять два последовательных каскада такого типа, а в плоскости пространственных частот поместить многоканальный фильтр. Следует, однако, иметь в виду, что для правильной работы второго каскада, осуществляющего обратное преобразование Фурье, необходимо скомпенсировать квадратичный фазовый множитель по координате x_2 , возникающий в плоскости пространственных частот на выходе первого анализатора спектра (см. (2.1)). Это может быть осуществлено с помощью отрицательной цилиндрической линзы с фокусным расстоянием $-f$, помещённой рядом с фильтром (рис.2.4).

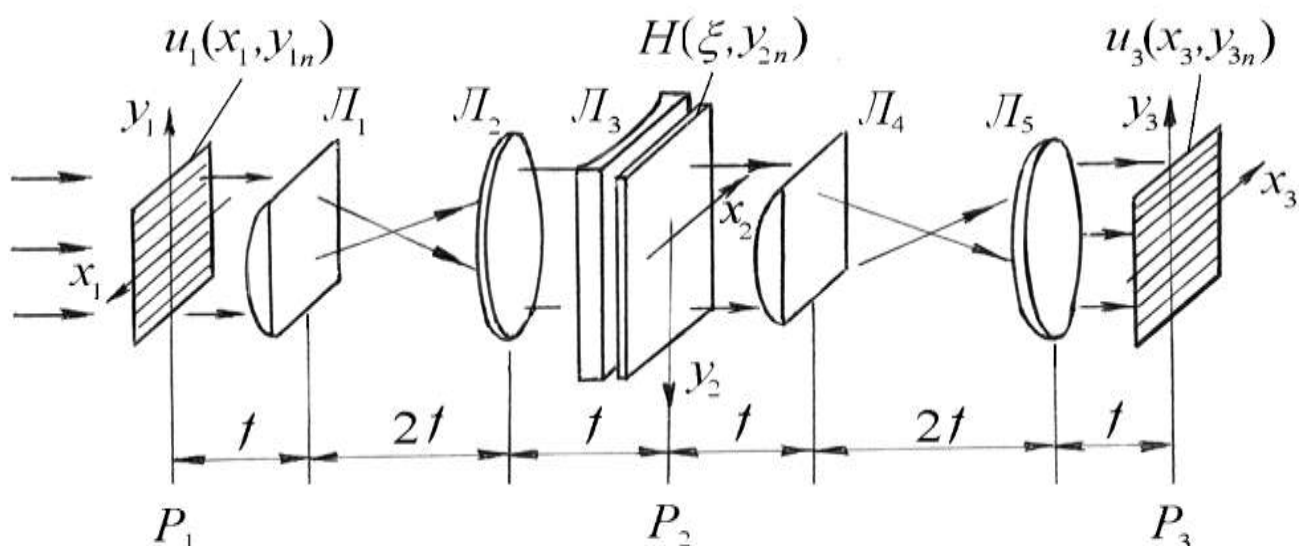


Рис.2.4. Многоканальная система пространственной фильтрации

Многоканальная система пространственной фильтрации осуществляет независимую фильтрацию N сигналов по координате x с помощью многоканального фильтра $H(\xi, y_{2n})$ и формирует на выходе одновременно N независимых свёрток входных сигналов с импульсными откликами фильтра.

2.5. Синтез фильтров в предметной плоскости

Наряду с синтезом фильтров в частотной плоскости, для осуществления операции фильтрации может быть использовано движение сигнала в предметной плоскости (рис.2.5).

Форма выходного сигнала такой системы определяется свёрткой входного сигнала и опорной функции, перемещающейся во входной плоскости вдоль оси x , причём аргументом свёртки является сдвиг опорной функции x_0 :

$$u_2(x_2, x_0) = K \int_{-\Gamma}^{\Gamma} u_1(x_1) h(x_0 - x_1) e^{-2\pi j/l f} x_1 x_2 dx_1 \Big|_{x_2=0} =$$

$$= u_2(x_0) = K \int_{-\Gamma}^{\Gamma} u_1(x_1) h(x_0 - x_1) dx_1 = K \int_{-\Gamma}^{\Gamma} u_1(x_1) \Delta h(x_1).$$

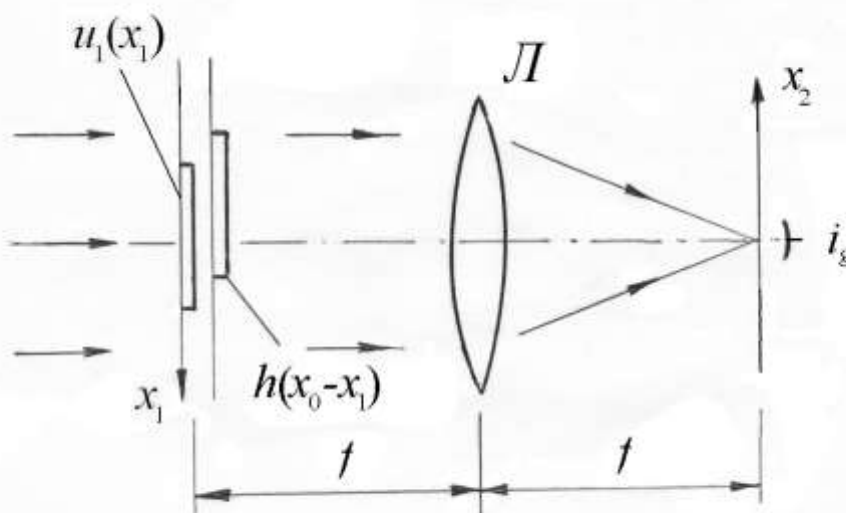


Рис.2.5. Система пространственной фильтрации с синтезом фильтра в предметной плоскости

Достоинством этой схемы является её простота. Необходимость движения сигнала для получения свёртки или корреляции естественным образом реализуется в системах обработки одномерных сигналов с акустооптическим вводом. Для обработки двумерных сигналов данную схему использовать затруднительно, так как это требует сканирования опорной функции по двум координатам.

2.6. Согласованная фильтрация

Одно из применений оптических схем пространственной фильтрации - получение корреляционной функции двух сигналов.

Если в схеме с частотной плоскостью установить фильтр, имеющий вид $H(\xi, \eta) = V^*(\xi, \eta)$, то по теореме свёртки выходной сигнал системы будет равен кросскорреляции входного и опорного сигналов:

$$u_2(x_3, y_3) \sim \mathcal{F}^{-1} [U(x, h) V^*(x, h)] = \int_{-\Gamma}^{\Gamma} \int_{-\Gamma}^{\Gamma} u(x, y) v^*(x - x_3, y - y_3) dx dy.$$

Нетрудно показать, что сигнал на выходе коррелятора будет иметь наибольшее значение, если фильтр согласован с сигналом, т.е. $V(\xi, \eta) = U(\xi, \eta)$. Для всех других сигналов, при равной энергии, корреляционный пик будет меньше, что и используется в практических приложениях, например, при распознавании образов, выделении сигнала на фоне шума и других.

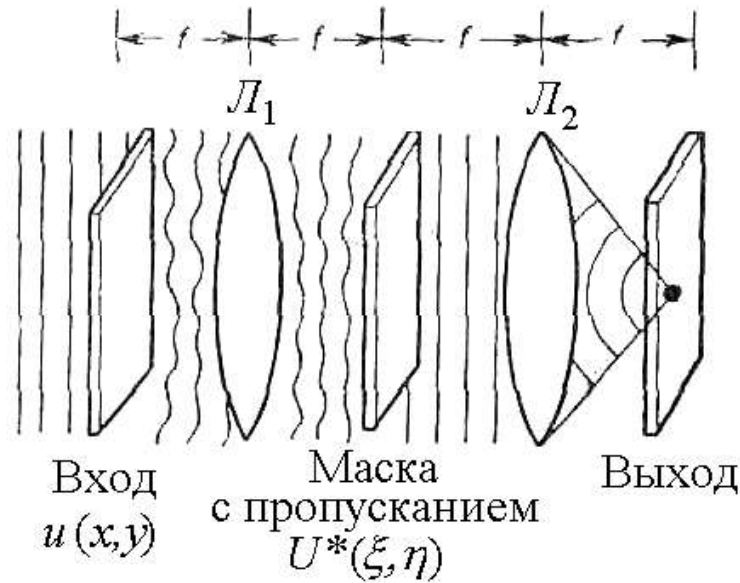


Рис.2.6. Схема согласованной пространственной фильтрации

Сущность операции согласованной фильтрации можно понять из рис.2.6. Пусть фильтр системы согласован с сигналом $u(x,y)$. При этом его коэффициент пропускания равен $U^*(\xi,\eta)$. Если на вход схемы поступает сигнал $u(x,y)$, то распределение поля перед фильтром пропорционально его спектру $U(\xi,\eta)$, а сигнал после фильтра - произведению $U(\xi,\eta)U^*(\xi,\eta)$. Эта последняя величина действительна; иными словами фильтр точно компенсирует кривизну падающего на него волнового фронта $U(\xi,\eta)$. Таким образом, поле, прошедшее через фильтр, представляет собой плоскую волну, которая фокусируется в яркую точку в фокусе линзы L_2 . Если на вход поступает сигнал, отличный от $u(x,y)$, то кривизна волнового фронта в общем случае не компенсируется фильтром, и прошедший через систему свет уже не будет собираться в яркую точку в фокусе последней линзы. Таким образом, предположение о присутствии на входе сигнала $u(x,y)$ можно проверить, измеряя интенсивность света в фокусе последней преобразующей линзы.

2.7. Голографический метод записи комплексных пространственных распределений

Голографический метод позволяет сравнительно просто, с использованием чисто амплитудных транспарантов, осуществлять запись двумерных комплексных распределений, каковыми являются оптические сигналы. Этот метод нашел применение для регистрации и восстановления волновых полей (голография) и для записи комплексных пространственных фильтров. Принцип голографической записи поясним на примере простой схемы, показанной на рис.2.7.

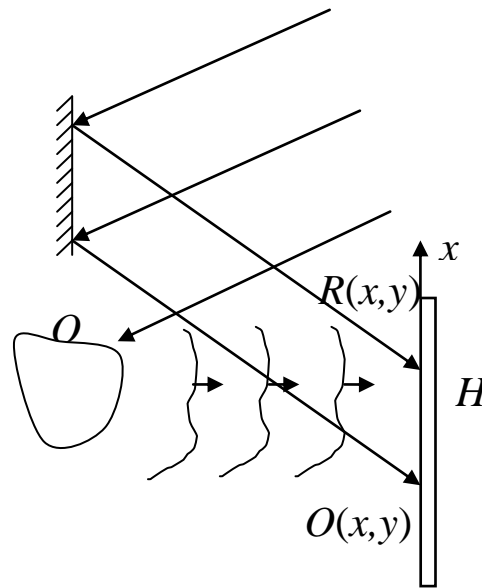


Рис.2.7. Схема записи голограммы

Пусть световая волна, отраженная от объекта O при его освещении когерентным источником света, создает в плоскости регистрации голограммы H световое поле $O(x,y)$. Если на регистрирующий материал одновременно с объектной световой волной направить когерентную ей опорную волну вида $R(x,y)$, то в плоскости регистрации образуется картина интерференции этих волн с распределением интенсивности:

$$I(x,y) = |O(x,y) + R(x,y)|^2 = |O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R.$$

Проекспонированный фоточувствительный материал обрабатывается таким образом, что его коэффициент пропускания после обработки прямо пропорционален энергии экспозиции, а следовательно, и распределению интенсивности света:

$$t(x,y) \sim |O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R.$$

Если голограмму точно установить на место, где она записывалась, и осветить опорным пучком как показано на рис 2.8, то амплитуда света за голограммой будет равна:

$$R(x,y)t(x,y) \sim R|O|^2 + R|R|^2 + O|R|^2 + O^*RR. \quad (2.1)$$

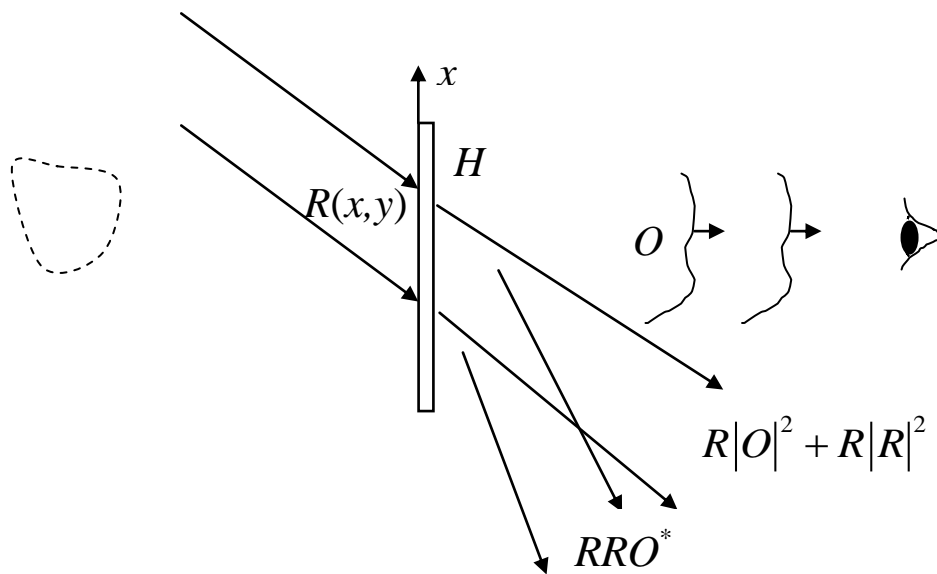


Рис.2.8. Схема восстановления волнового фронта

Для простоты будем считать, что в качестве опорного светового пучка используется плоская световая волна, имеющая достаточно большой угол наклона по отношению к направлению распространения объектной волны. Тогда четыре слагаемые выражения (2.1) будут соответствовать следующим световым волнам, распространяющимся за голограммой:

1. $R|O|^2$ описывает световую волну, распространяющуюся по направлению, близкому к направлению распространения опорного пучка (если пренебречь амплитудной модуляцией опорной волны множителем $|O|^2$, то $R|O|^2 \sim R$).

2. $R |R|^2 \sim R$, поскольку $|R| = const$. Таким образом, второе слагаемое также дает волну, распространяющуюся в направлении опорного пучка.

3. $O |R|^2 \sim O$, т. о. это слагаемое образует световое поле, равное световому полю объекта. Если за голограммой поместить наблюдателя, то он увидит через голограмму мнимое изображение объекта. При выборе достаточно большим угла наклона опорного пучка, световые пучки, соответствующие слагаемым 1 и 2, не мешают наблюдению мнимого изображения.

4. $RR O^*$. Нетрудно показать, что световой пучок, соответствующий этому слагаемому, при рассматриваемой геометрии записи и восстановлении голограммы отклонен от объектного пучка больше, чем опорный пучок и также не мешает наблюдению мнимого изображения.

Учитывая, что мешающие сигналы, распространяющиеся за голограммой в направлениях, отличных от полезного сигнала, могут быть отфильтрованы, то голограмму можно рассматривать, как транспарант с комплексным коэффициентом пропускания (вида OR^*).

2.8. Фильтры Вандер Люгта

Вандер Люгт предложил голографический способ изготовления пространственного фильтра, в котором чисто амплитудный транспарант работает так же, как и фильтр с произвольным комплексным коэффициентом пропускания. Фильтр Вандер Люгта записывается голографическим способом в фурье-плоскости оптической системы пространственной фильтрации с помощью наклонного опорного пучка света (рис.2.9).

Пусть требуемый импульсный отклик фильтра равен $h(x,y)$. На стадии записи фильтра транспарант с пропусканием, равным импульсному отклику фильтра, помещается во входную плоскость системы. Оптический сигнал в фурье-плоскости равен фурье-образу этого отклика:

$$u_{2h}(x_2, y_2) = KH(\xi, \eta), \quad \xi = x_2 / \lambda f; \quad \eta = y_2 / \lambda f.$$

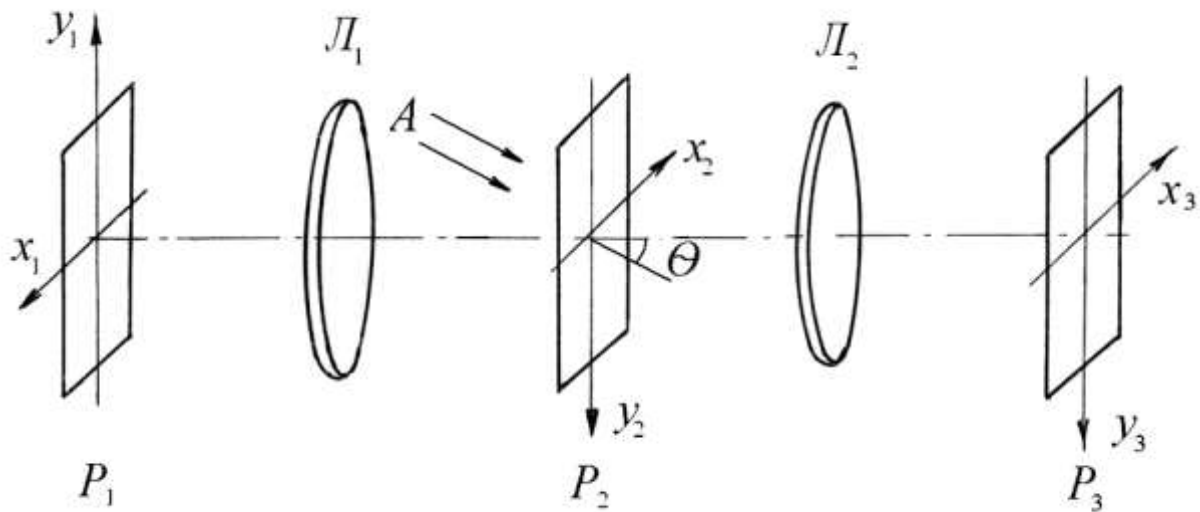


Рис.2.9. Голографический коррелятор Вандер Люгта

Световое поле наклонного опорного пучка может быть представлено в виде:

$$u_{2r}(x_2, y_2) = A e^{-j2pa y_2}, \quad \text{где } a = \frac{\sin q}{l}, \quad q - \text{ угол падения.}$$

Можно считать, что коэффициент пропускания голограммы по амплитуде после её проявления пропорционален интенсивности записываемого света:

$$t_H(x_2, y_2) \sim |u_{2h} + u_{2r}|^2 = A^2 + |K|^2 |H(x, h)|^2 + \\ + AK * H * (x, h) e^{-j2pa y_2} + AKH(x, h) e^{j2pa y_2}.$$

На стадии обработки во входной плоскости системы располагается сигнал $u(x_1, y_1)$, а в фурье-плоскости - голографический фильтр с коэффициентом пропускания $t_H(x_2, y_2)$. При этом световой сигнал за голограммой будет равен произведению пространственного спектра сигнала на коэффициент пропускания голограммы:

$$u_2(x_2, y_2) \sim KA^2U(x, h) + K |K|^2 |H(x, h)|^2 U(x, h) + \\ + A |K|^2 U(x, h) H * (x, h) e^{-j2pa y_2} + AK^2U(x, h) H(x, h) e^{j2pa y_2}.$$

После обратного фурье-преобразования, осуществляемого линзой L_2 , получаем выходной сигнал:

$$\begin{aligned}
 u_3(x_3, y_3) \sim & KA^2 u(x_3, y_3) + \\
 & + K |K|^2 h(x_3, y_3) * h(x_3, y_3) \text{ Д } u(x_3, y_3) + \\
 & + A |K|^2 u(x_3, y_3) * h(x_3, y_3) \text{ Д } d(x_3, y_3 - a l f) + \\
 & + AK^2 u(x_3, y_3) \text{ Д } h(x_3, y_3) \text{ Д } d(x_3, y_3 + a l f),
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

где * - знак корреляции, Д - знак свёртки.

Этому сигналу соответствует картина в выходной плоскости, показанная на рис.2.10. Видно, что распределения светового поля, соответствующие третьему и четвёртому слагаемым выражения (2.2), смещены в стороны от оптической оси.

Если угол опорного пучка $q > \frac{3W_h}{2f} + \frac{W_u}{f}$, где W_h - максимальная ширина

функции h в направлении y , а W_u - то же для функции u , то "слагаемые" на выходе не перекрываются, и можно без помех регистрировать сигнал коррелятора.

2.9. Коррелятор с одновременным преобразованием

В корреляторе с одновременным преобразованием (рис.2.11), входные транспаранты, имеющие во входной плоскости размеры, не превосходящие величины a , располагаются на расстоянии $2a$. Сигнал на входе системы можно записать в виде:

$$u_1(x_1, y_1) = v_1(x_1, y_1 - a) + v_2(x_1, y_1 + a).$$

Сигнал в фокальной плоскости линзы L_1 равен фурье-образу от входного сигнала:

$$U_2(x, h) \sim V_1(x, h)e^{-j2pha} + V_2(x, h)e^{j2pha}.$$

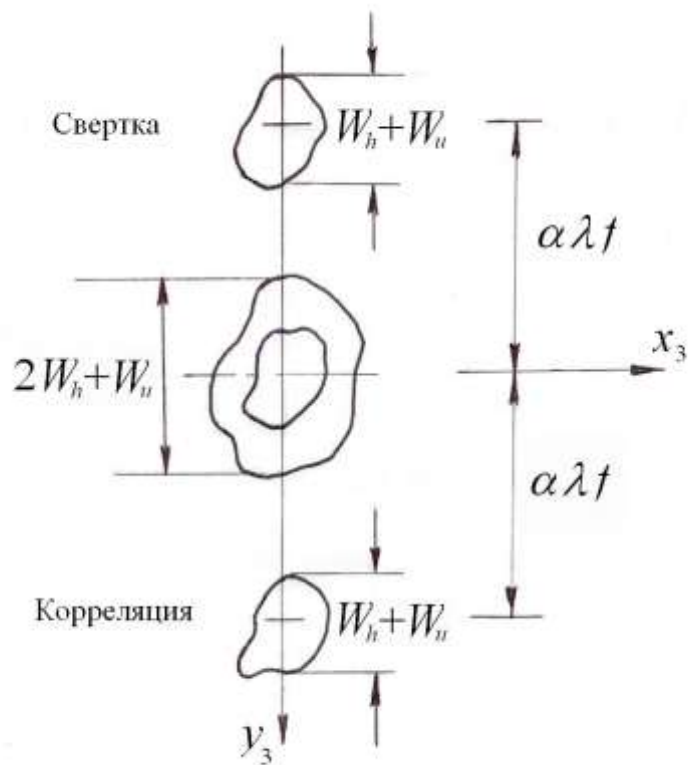


Рис.2.10. Распределение света в выходной плоскости коррелятора Вандер Люгта

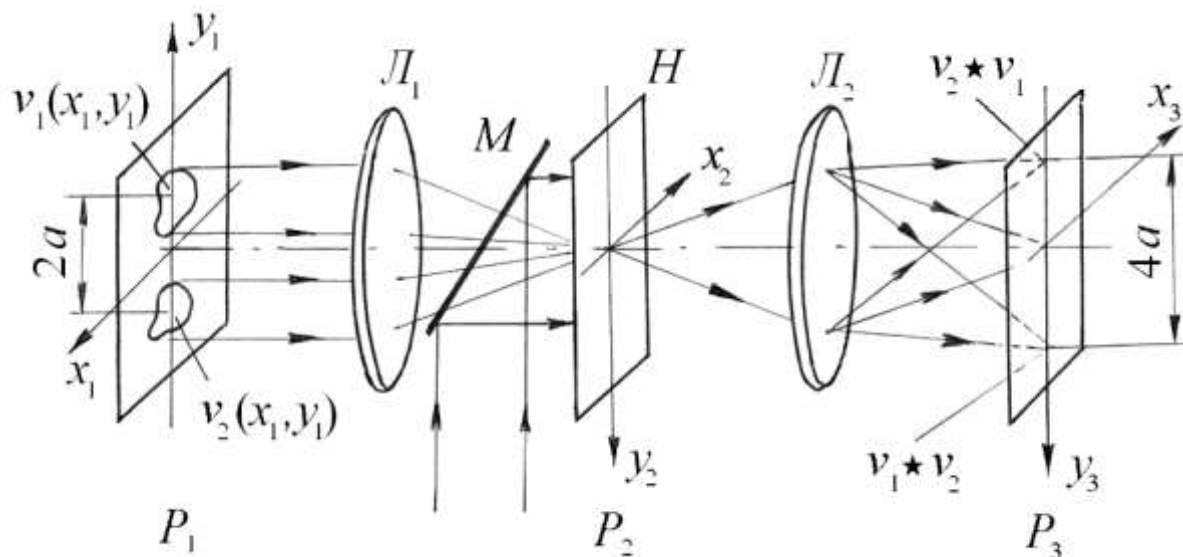


Рис.2.11. Коррелятор с одновременным преобразованием

Квадрат модуля этого распределения записывается на регистрирующей среде в виде голограммы, коэффициент пропускания по амплитуде которой равен:

$$t_H \sim |V_1|^2 + |V_2|^2 + V_1 V_2^* e^{-j4pha} + V_1^* V_2 e^{j4pha}.$$

Голограмма с такой записью освещается плоской световой волной, причем, возможно, с другой длиной волны, чем при записи. После обратного фурье-преобразования, осуществляемого линзой L_2 , сигнал в выходной плоскости будет равен (см. свойства преобразования Фурье):

$$u_3(x_3, y_3) \sim v_1 * v_1 + v_2 * v_2 + v_1 * v_2 \text{ Д } d(x_3, y_3 - 2a) + \\ + v_2 * v_1 \text{ Д } d(x_3, y_3 + 2a).$$

Коррелятор с одновременным преобразованием удобен тем, что для него не требуется заранее изготавливать пространственный фильтр. Это позволяет использовать его для сравнения образов, появляющихся одновременно.

Коррелятор Вандер Люгта и коррелятор с одновременным преобразованием находят применение для решения задач распознавания образов. Наряду с классическими корреляторами, основанными на принципе согласованной фильтрации, были предложены модернизированные варианты устройств, позволяющие улучшить качество распознавания [6,7]. В корреляторе Вандер Люгта для этой цели использовались чисто фазовые фильтры, бинарные чисто фазовые фильтры, фильтры, инвариантные к изменению некоторых параметров образов и другие. В корреляторе с одновременным преобразованием применялась чисто фазовая модуляция во входной плоскости и компьютерная обработка совместного спектра в частотной плоскости перед его обратным преобразованием Фурье.