

5. ПРИМЕНЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ, ГИБРИДНЫЕ ОПТИКО-ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ

В настоящее время уделяется большое внимание созданию автоматических устройств распознавания образов, способных заменить человека при решении многих технических задач. Под распознаванием обычно понимается следующий процесс. Имеется m объектов распознавания, которые разделены на M классов, отличающихся по некоторым признакам. При предъявлении системе распознавания объекта из множества m надо отнести его к одному из M классов. Автоматические системы распознавания обычно работают в некотором пространстве признаков, имеющем размерность N . В N -мерном пространстве признаков каждому объекту соответствует точка, а каждому классу некоторая область. Размерность пространства N может быть весьма велика. Например, при представлении сигнала с полосой 100 МГц длительностью 100 мкс требуется 10000 независимых отсчётов, т.е. 10000 признаков. Изображение из 100×100 разрешимых точек полностью описывается также 10000 признаками.

Обычно для распознавания достаточно сложных образов используются цифровые ЭВМ. На стадии обучения машины в пространстве признаков строятся границы между классами. Само распознавание осуществляется сравнением координат точки, характеризующей распознаваемый объект - её признаков - с положением границ между классами. Процесс распознавания на ЭВМ связан с решением $M(M-1)$ граничных неравенств в N -мерном пространстве признаков и в общем случае требует значительных затрат машинного времени. Например, при $M=5$ и $N=500$, распознавание одного объекта на ЭВМ с производительностью 2.5×10^6 операций в секунду требует времени ~ 1 с и квадратично растёт с увеличением числа признаков [11].

Существует, однако, довольно обширный класс задач, в которых оптимальным алгоритмом распознавания является корреляционное сравнение

предъявляемого образа с эталонным, характеризующим определённый класс. Такой алгоритм может быть реализован в оптических корреляторах, имеющих значительно большую скорость вычисления интегральных операций. Примерами таких задач являются распознавание или обнаружение сигналов на фоне аддитивного шума, поиск фрагментов в большом изображении, содержащем шум, и др.

Другим перспективным применением оптики при решении задач распознавания является выделение признаков. Обычно исходное пространство признаков имеет неоправданно большую размерность, в то время как для распознавания важны только те признаки, которые существенны для разделения классов. С помощью специальных математических процедур или на основе интуиции исследователя переходят к пространству информативных признаков меньшей размерности, в котором и осуществляют распознавание [12]. Это позволяет увеличить скорость распознавания. Часто характерные отличия между классами содержатся в признаках, извлекаемых из фурье-спектров исходного описания образов. В этом случае исходное представление образа вначале подвергается преобразованию Фурье, которое может быть выполнено с помощью оптической системы, а само распознавание осуществляется в ЭВМ по признакам, выделенным из спектров образов на выходе оптического процессора. Применение оптической системы на стадии предварительной обработки в этой так называемой гибридной оптико-цифровой системе позволяет увеличить её общее быстродействие по сравнению с чисто цифровой системой распознавания.

Применение оптических процессоров перспективно и в других случаях предварительной обработки, например, для фильтрации шумов, оконтуривания изображений и др. Рассмотрим несколько примеров оптических и оптико-цифровых устройств распознавания.

5.1. Корреляционное распознавание информации в когерентно-оптических системах

Чисто оптические устройства распознавания строятся на базе оптических корреляторов, в которых реализуется алгоритм сравнения предъявляемого и эталонных образов по максимуму корреляционной функции. Блок-схема такой системы распознавания показана на рис.5.1 [13].

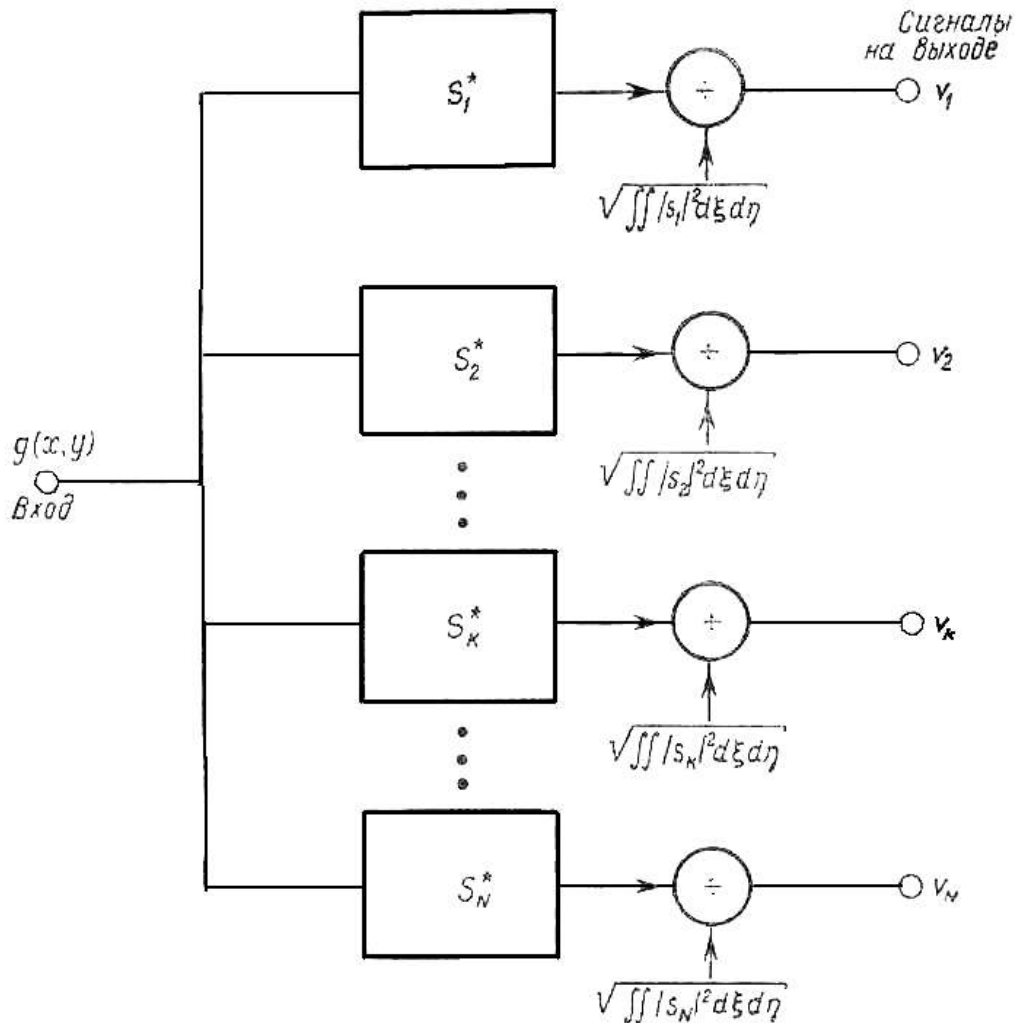


Рис.5.1. Распознавание сигналов с помощью набора согласованных фильтров

Входной сигнал системы $g(x,y)$ может содержать некоторые образы из набора $s_1(x,y), s_2(x,y), \dots, s_N(x,y)$; с помощью системы требуется определить присутствие заданного образа в сигнале. Входной сигнал одновременно (или последовательно) подается на N согласованных фильтров с передаточными функциями $S_1^*, S_2^*, \dots, S_N^*$. Отклик каждого фильтра нормируется путем деления на корень квадратный из полной энергии, приходящей от образа, с которым фильтр согласован. Эта нормировка, которая может быть выполнена с помощью электронной схемы после получения сигналов на выходе фильтров, необходима, чтобы выходные сигналы системы зависели не от энергии, а от формы сигналов на входе. На выходе системы сравниваются квадраты модулей сигналов $|v_1|^2, |v_2|^2, \dots, |v_N|^2$. Покажем, что сигнал

$|v_k|^2$ будет наибольшим из N откликов, если во входном сигнале присутствует образ $g(x,y)=s_k(x,y)$.

Максимум сигнала $|v_k|^2$ на выходе правильно согласованного фильтра равен

$$|v_k|^2 = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_k|^2 d\xi d\eta \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_k|^2 d\xi d\eta} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_k|^2 d\xi d\eta.$$

С другой стороны, отклик $|v_n|^2$ ($n \neq k$) неправильно согласованного фильтра равен

$$|v_n|^2 = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_k S_n^* d\xi d\eta \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_n|^2 d\xi d\eta}.$$

Воспользовавшись неравенством Шварца, можно написать

$$\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_k S_n^* d\xi d\eta \right|^2 \leq \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_k|^2 d\xi d\eta \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_n|^2 d\xi d\eta.$$

Отсюда следует, что

$$|v_n|^2 \leq \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_k|^2 d\xi d\eta = |v_k|^2;$$

равенство имеет место только при условии, что $s_n(x,y) = \kappa s_k(x,y)$.

Из полученного результата следует, что согласованный фильтр дает возможность установить, какой образ из возможного набора образов действительно присутствует в системе.

На рис.5.2 представлена схема когерентно-оптического коррелятора для распознавания буквенно-цифровой информации. На входе системы используется преобразователь некогерентного изображения в когерентное, чтобы можно было

осуществлять ввод распознаваемых изображений в некогерентном свете. Он состоит из проекционной системы 1 и оптически управляемого пространственного модулятора света 2. В плоскости пространственных частот используется набор сменных фильтров 3, перемещаемых механически или сканируемых с помощью дефлектора. Запись голографических фильтров ГФ осуществляется на фототермопластическом носителе ТПН с помощью дополнительной когерентно-оптической системы 4.

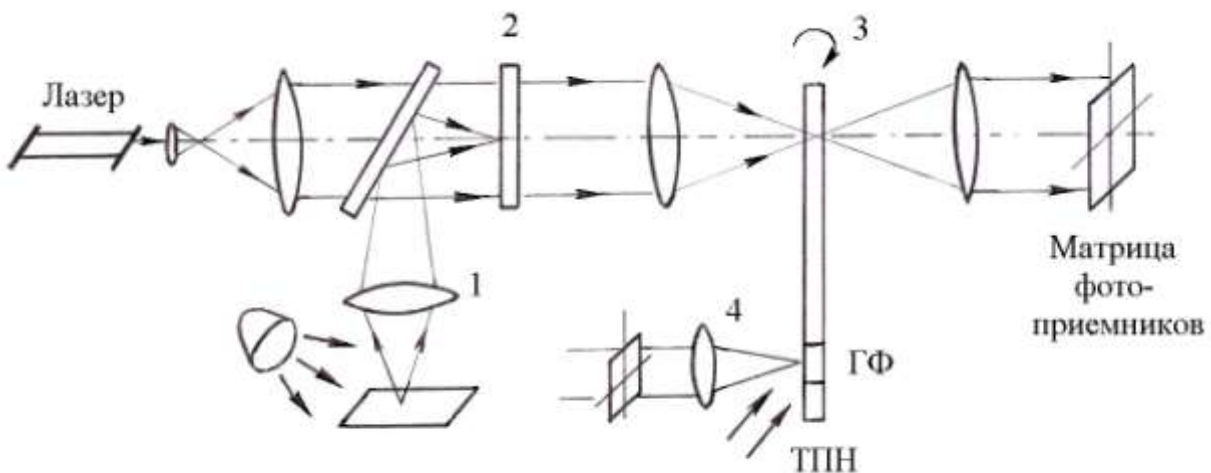


Рис.5.2. Коррелятор для распознавания буквенно-цифровой информации

На рис.5.3 приведена схема другого когерентно-оптического коррелятора, имеющего несколько параллельных каналов по числу распознаваемых классов. В схеме используется мультипликатор входных изображений 1, набор рядом расположенных фильтров 2 и устройств регистрации 3. В качестве мультипликатора изображений может быть применена голограмма набора плоских волн, имеющих различный наклон.

Другим вариантом многоканальной системы является коррелятор с голографическими фильтрами, записанными на один участок фоточувствительной среды с разными наклонами опорных пучков. При распознавании восстанавливается

тот опорный пучок, с которым записывался фильтр, согласованный с предъявляемым сигналом.

Кроме обычных фильтров Вандер Люгта в корреляторах могут использоваться голограммы, синтезированные на ЭВМ. Распределение пропускания такой голограммы вычисляется на ЭВМ, а затем изготавливается сам фильтр путём фотографирования этого распределения с экрана дисплея или графопостроителя или каким-либо другим способом, в зависимости от применяемого пространственного модулятора света.

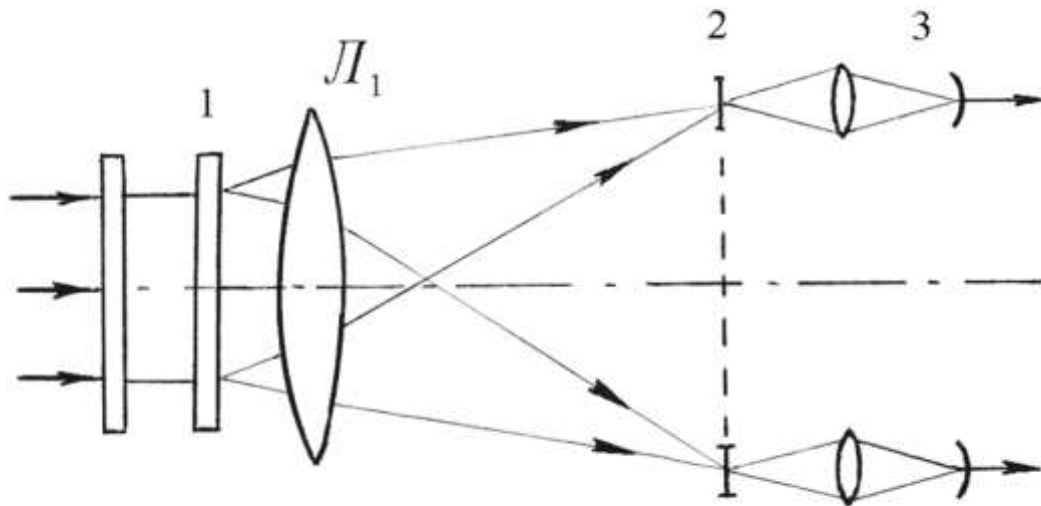


Рис.5.3. Многоканальный коррелятор для распознавания изображений

5.2. Оптико-цифровая система для распознавания текстур

Применение оптической системы для выделения признаков в гибридной оптико-цифровой системе было продемонстрировано при решении задачи распознавания текстур [14].

При распознавании текстур (например, кусочков ткани с разным рисунком) корреляционный алгоритм не является эффективным. При его использовании разные участки текстуры дают иногда меньшую амплитуду корреляции, чем разные

текстуры. В то же время, если сравнивать текстуры по распределениям пространственных частот, то можно заметить, что они заметно отличаются (рис.5.4). Поэтому было предложено распознавать текстуры по признакам, вычисляемым из их фурье-спектров.

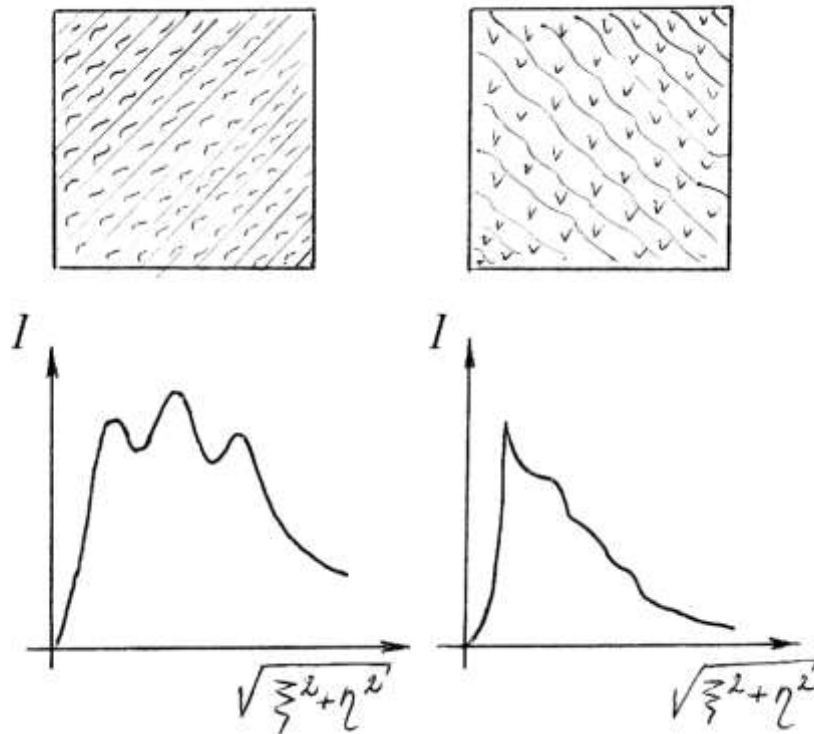


Рис.5.4. Распределение пространственных частот от различных текстур

Экспериментально исследовалась гибридная система, показанная на рис.5.5. С помощью когерентной оптической системы формировался пространственный спектр слайда текстуры, помещённой в кювету с иммерсией во входной плоскости. Увеличенное распределение спектра с помощью телевизионной системы считывалось в ЭВМ. ЭВМ программным способом формировала в плоскости пространственных частот кольцевую маску, которая выделяла 32 признака, зависящих от модуля пространственной частоты (рис.5.6). Затем для распознавания использовались машинные алгоритмы. Исследования показали, что качество распознавания в рассмотренной оптико-цифровой системе было не хуже, чем в чисто цифровой (при большем потенциальном быстродействии гибридной системы).

Тема5. Применение когерентных оптических устройств для распознавания образов, гибридные оптико-цифровые системы

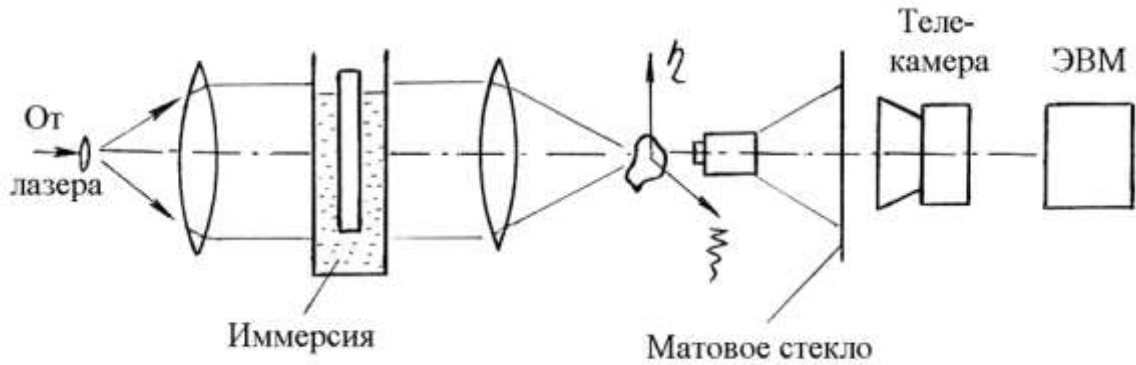


Рис.5.5. Гибридная оптико-цифровая система распознавания по признакам, выделяемым из фурье-спектров

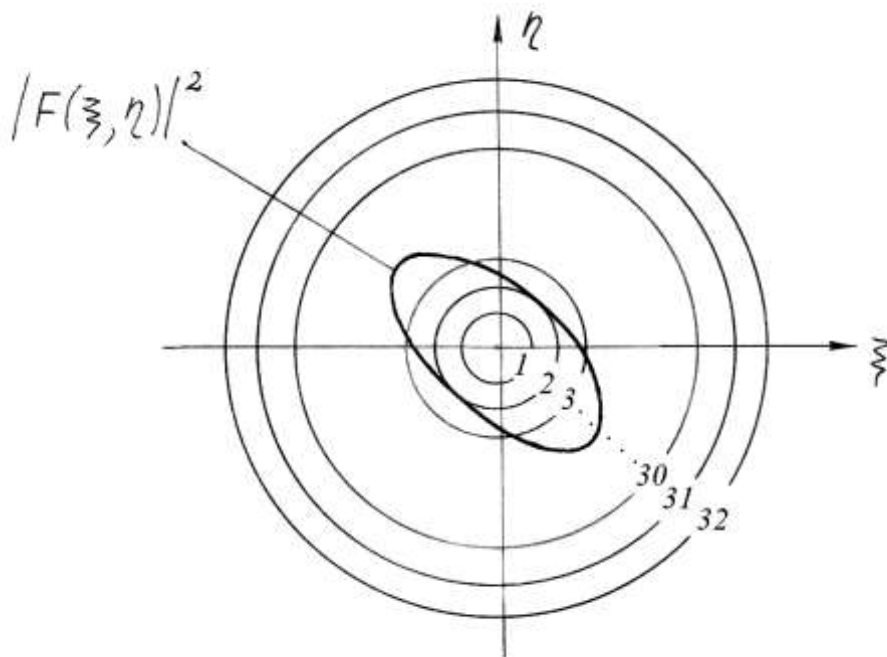


Рис.5.6. Кольцевая маска в плоскости пространственных частот, синтезируемая ЭВМ для выделения признаков фурье-спектров

Другими примерами применения рассмотренной гибридной системы являются распознавание характерных деталей на аэрофотоснимках и распознавание пневмокониоза у шахтёров по рентгеновским снимкам. Следует заметить, что в задачах, где играет роль распределение пространственных частот не только по модулю, но и по направлению, в ЭВМ синтезировалась не кольцевая, а секторно-кольцевая маска (рис 5.7).

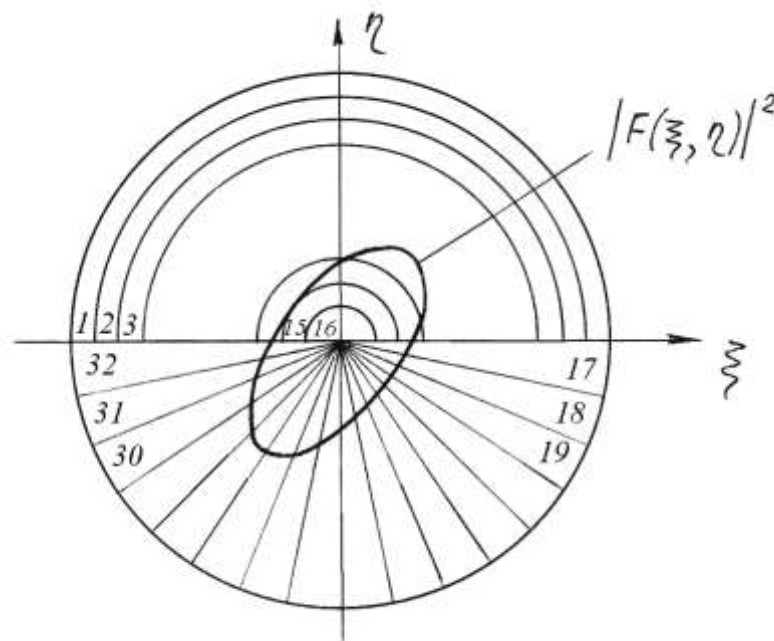


Рис.5.7. Секторно-кольцевая маска для выделения признаков, зависящих от модуля и направления фурье-спектров

5.3. Структура гибридной оптико-цифровой системы

Системы, в которых обработка информации частично выполняется в электронных узлах, а частично - оптически, называются гибридными. В них достигается оптимальное соотношение высокой скорости оптической обработки с высокой точностью и гибкостью электронных вычислительных устройств. В общем случае структура гибридной оптико-цифровой системы может быть сложнее, чем в рассмотренных выше устройствах. Примерная схема такой системы показана

Тема5. Применение когерентных оптических устройств для распознавания образов, гибридные оптико-цифровые системы

на рис.5.8. Она состоит из оптического и электронного процессоров, входного и выходного интерфейсов и интерфейса управления оптическим процессором.

Программируемый электронный процессор осуществляет общее управление. Входной интерфейс может содержать не только устройство ввода, но и систему электронной предобработки входных сигналов оптической системы. Например, для получения преобразования Меллина, инвариантного к масштабу, входное изображение подвергается геометрическим предискажениям с помощью логарифмических усилителей в каналах развёртки телевизионной системы ввода.

Выходной интерфейс может содержать электронные спецпроцессоры предварительной обработки сигналов, регистрируемых фотодетектором, что позволяет сжимать выходную информацию с целью ускорения её дальнейшей обработки в центральном электронном процессоре.

Интерфейс управления оптическим процессором служит для регулировки и настройки оптически-механических элементов, перемещения фильтров, диафрагм, зеркал и т. п. Одной из важнейших возможностей гибридных систем является электронное управление импульсным откликом оптической системы с помощью оперативной записи фильтров, синтезированных на ЭВМ.

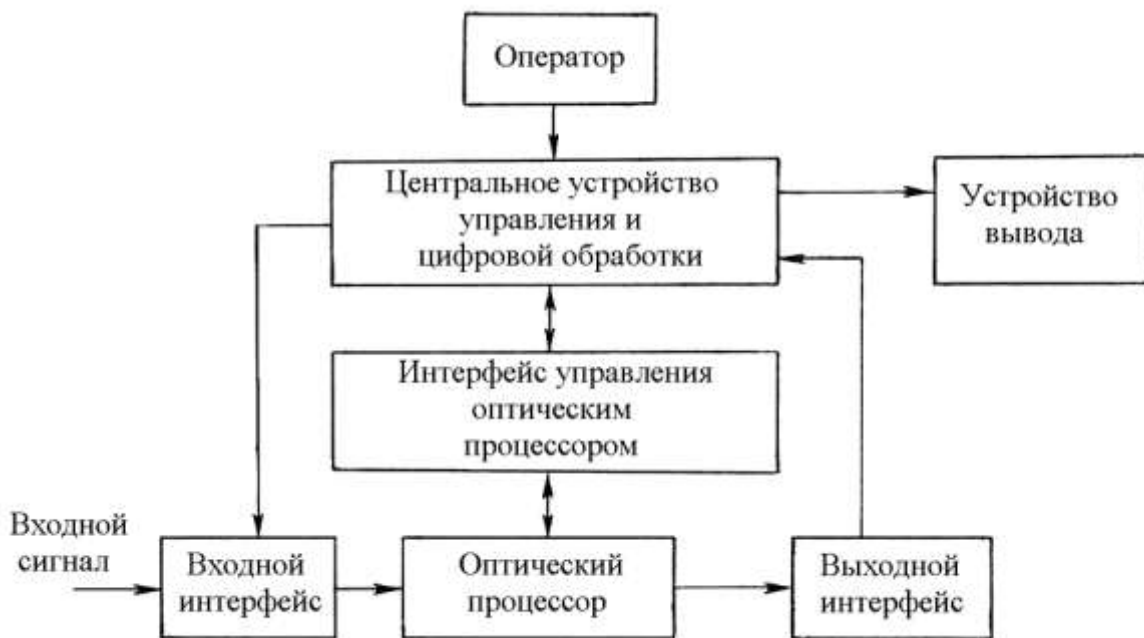


Рис.5.8. Вариант общей структурной схемы гибридной оптико-цифровой системы

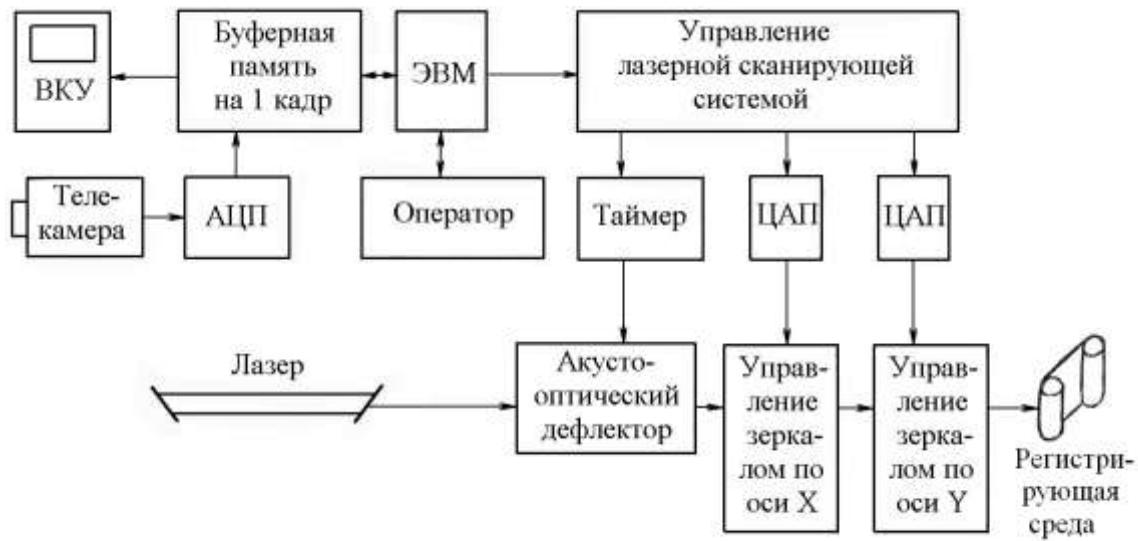


Рис.5.9. Схема управления импульсным откликом оптического процессора гибридной системы

Вариант такого интерфейса показан на рис.5.9. В данном случае фильтры записываются с помощью лазерной сканирующей системы под управлением ЭВМ. Расчёт коэффициента пропускания фильтра может осуществляться по требуемому импульсному отклику, вводимому в ЭВМ с помощью телекамеры.

5.4. Распознавание образов с переменным масштабом и ориентацией

В качестве примера применения гибридных систем рассмотрим решение задачи распознавания изображений, инвариантного к масштабу и повороту. Инвариантность к этим операциям может быть достигнута в оптике с помощью различных технических приёмов. Изменение масштаба может быть скомпенсировано регулировкой увеличения системы, формирующей входной сигнал оптического процессора. При получении фурье-образа можно менять эквивалентное фокусное расстояние. Для компенсации поворота можно разворачивать изображение с помощью призмы Дове или вращать согласованный фильтр или сам

объект, или систему регистрации. Использование механических способов настройки оптических процессоров, однако, приводит к снижению точности и скорости обработки. Снижается и надёжность таких устройств.

Другой метод - это создание многоканальных систем при использовании набора фильтров, согласованных с разным положением или масштабом объекта. В таких системах применяется тот или иной способ мультипликации входного образа (см., например, рис.5.3). Недостатком этих устройств является большое число требуемых фильтров, так как допустимое изменение ориентации при приемлемом снижении корреляции в выходном отклике одного фильтра может составлять величину ~ 1 град, а масштаба - $\sim 0,01$.

Третий метод - применение гибридных систем. Одним из примеров подходящей гибридной системы является использование секторно-кольцевого фотоприёмника при анализе фурье-спектров (см. рис.5.7). Очевидно, что сигнал с секторной части фотоприёмника не зависит от масштаба объекта и его фурье-образа, а сигнал с кольцевой части не зависит от поворота распознаваемого объекта.

Четвёртый метод состоит в использовании преобразования Меллина исходного изображения. Это такое преобразование, модуль которого не зависит от изменения масштаба образа так же, как модуль фурье-образа не зависит от смещения. Рассмотрим, какой вид имеет преобразование Меллина и оптические способы его получения.

Под оператором изменения масштаба понимается оператор M , удовлетворяющий соотношению $Mg(x,y)=g(ax,by)$. Можно найти собственные функции этого оператора, т.е. функции, удовлетворяющие следующему уравнению: $M\{\psi(x,y)\}=\lambda\psi(x,y)$, где λ -собственные значения. Эти функции обладают свойством не изменяться (с точностью до комплексного множителя) под действием оператора масштаба. Если разложить по ним функцию $g(x,y)$, то при некоторых условиях такое разложение будет инвариантно к масштабу. Покажем это.

Легко убедиться, что $\psi(x,y)=x^r y^s$, где r и s - комплексные числа:

$$M(x^r y^s)=(ax)^r (by)^s=(a^r b^s)x^r y^s.$$

Можно потребовать, чтобы модуль собственных значений был равен единице. Это выполняется, если r и s являются чисто мнимыми:

$$j2\pi f_x=r, j2\pi f_y=s, \text{ где } f_x \text{ и } f_y - \text{ действительные числа.}$$

Тогда $\left| a^{j2\pi f_x} b^{j2\pi f_y} \right| = 1$. Таким образом, $\psi(x,y)=x^{j2\pi f_x} y^{j2\pi f_y}$.

Можно показать, что такие собственные функции образуют полный ортогональный набор с соотношением ортогональности

$$\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{xy} x^{j2\pi f_x} y^{j2\pi f_y} x^{-j2\pi f'_x} y^{-j2\pi f'_y} dx dy = \delta(f_x - f'_x, f_y - f'_y).$$

По полному набору можно разложить любую функцию в виде линейной комбинации

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(f_x, f_y) x^{j2\pi f_y} y^{j2\pi f_x} df_x df_y.$$

Решая это уравнение относительно $G(f_x, f_y)$ с использованием соотношения ортогональности, получаем

$$G(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) x^{-j2\pi f_x - 1} y^{-j2\pi f_y - 1} dx dy.$$

Это соотношение и есть двумерное преобразование Меллина. Инвариантность его модуля к преобразованию масштаба легко проверить прямой подстановкой.

Для получения преобразования Меллина можно использовать преобразование Фурье. Если сделать замену переменных $x = e^{\xi}$, $y = e^{\eta}$, то получим

$$G(f_x, f_y) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} g(e^{\xi}, e^{\eta}) e^{-j2\pi(f_x \xi + f_y \eta)} d\xi d\eta,$$

т.е. меллин-образ есть преобразование Фурье от функции, подвергнутой геометрическим искажениям $g(e^{\xi}, e^{\eta})$.

В оптической системе получение энергетического меллин-спектра, не зависящего от масштаба, было предложено выполнить с использованием пространственного модулятора света типа трубки "ТИТУС", в которой входное изображение записывается электронным пучком [14]. В гибридной системе использовались логарифмические усилители в устройствах развёртки по x и y - координатам, в результате исходное изображение записывалось во входной плоскости оптической системы в виде $g(e^{\xi}, e^{\eta})$, а распределение интенсивности в задней фокальной плоскости представляло собой энергетический меллин-спектр, инвариантный к масштабу. Следует заметить, что этот спектр уже не инвариантен к сдвигу образа во входной плоскости.

Используя тот факт, что меллин-спектр инвариантен к независимому изменению масштаба по двум координатам, а масштаб образа, как правило, меняется по обеим координатам одинаково, Касасент и Псалтис [15] предложили использовать лишнюю степень свободы двумерного меллин-спектра для создания гибридной системы, инвариантной к масштабу и повороту. Схема этого устройства представлена на рис.5.10.

Входной образ $f(x, y)$ считывается с помощью телекамеры. Преобразованием сигналов в каналах развёртки осуществляется переход от декартовых координат к полярным с последующим преобразованием радиальной координаты изображения $f(r, \theta)$ по логарифмическому закону $f(e^r, \theta)$. В результате двумерного преобразования Фурье, осуществляемого с помощью линзы, на выходе получается преобразование Меллина по радиальной координате и преобразование Фурье по угловой. Поскольку изменение размера образа соответствует изменению масштаба по радиальной координате, а поворот - сдвигу вдоль угловой, модуль выходного сигнала такой гибридной системы будет инвариантен к масштабу и повороту входного изображения.

Тема5. Применение когерентных оптических устройств для распознавания образов, гибридные оптико-цифровые системы

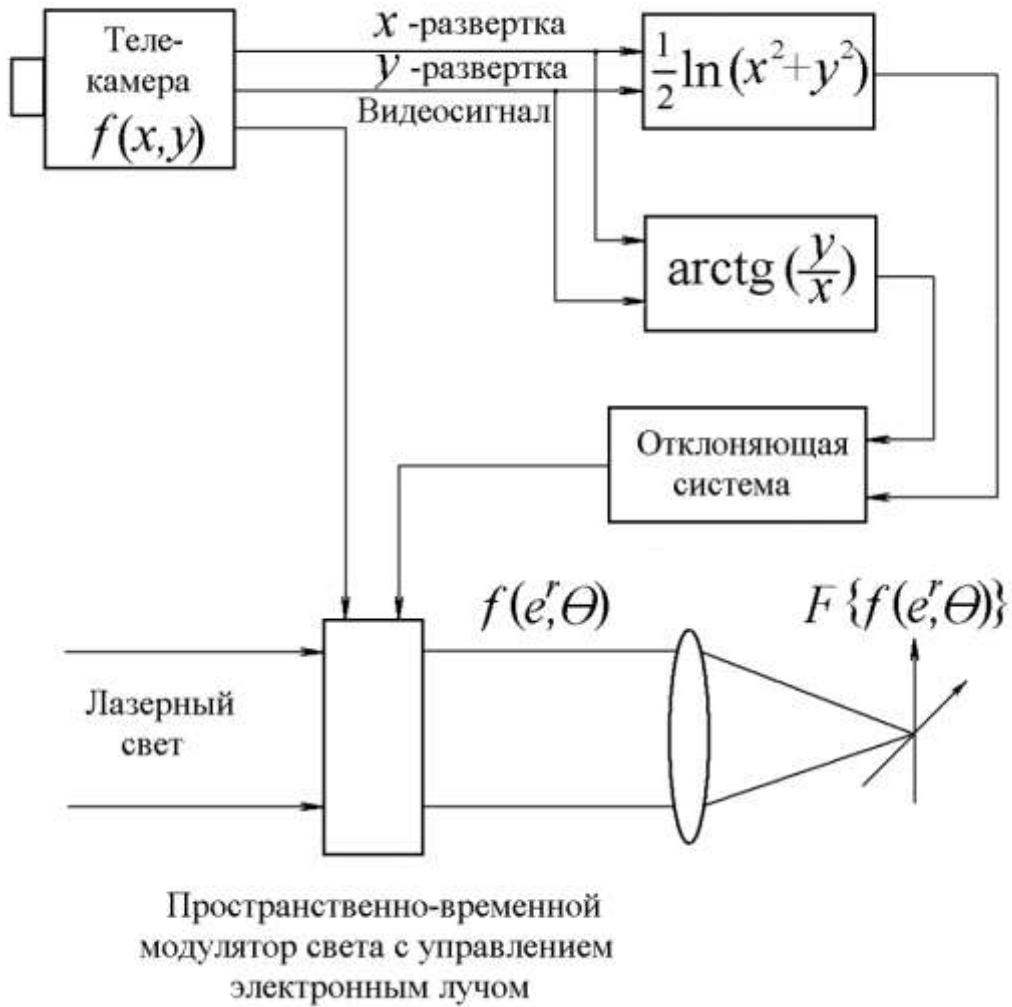


Рис.5.10. Гибридная система распознавания, инвариантная к масштабу и повороту