

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
(СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЯ, ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ)**

УДК 621.391.193

В. П. КОРОНКЕВИЧ, Е. С. НЕЖЕВЕНКО, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ
(Новосибирск)

**НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ
КЛАССИФИКАТОРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ (ОБЗОР)***

Классификация изображений является одной из сложных и актуальных задач контрольно-измерительной техники сегодняшнего дня. Ее решение проводится как в направлении поиска регулярных процедур классификации, так и в направлении создания технических реализаций этих процедур на основе использования тех или иных физических принципов и элементов. Достижения в указанных направлениях пока скромны. В то же время имеется серьезная необходимость в автоматизации процессов анализа химических спектров, биологических микрообъектов, аэрофотоснимков, снимков звездного неба и т. п. Естественно, что потребности практики приводят к необходимости применения более эффективных (с точки зрения быстродействия, точности, технической реализации и т. п.) приемов классификации.

В настоящей работе отмечены основные операции, выполняемые при классификации изображений, и рассмотрены некоторые возможности их технической реализации, основанные на оптических и оптико-электронных методах обработки. Интерес к оптическим и оптико-электронным методам обусловлен главным образом тем, что входными сигналами классификаторов часто являются сигналы оптического диапазона, получаемые либо непосредственно от излучающих протяженных объектов, либо путем освещения диапозитивов или снимков с изображениями. В настоящей работе использованы материалы, опубликованные в СССР и за рубежом.

ОПЕРАЦИИ КЛАССИФИКАЦИИ

Анализ процедур классификации, предложенных в последнее время и систематизированных в [1—3], позволяет выделить следующие их основные операции.

Операция сравнения изображений $f(x, y)$ и $\varphi(x, y)$, заключающаяся в определении меры их подобия (схожести). При этом под одним из них понимается предъявляемое изображение, под вторым — некоторое фиксированное, условно принятое за эталонное. Кроме того, функциями

* По материалам доклада, прочитанного авторами на IX Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в Новосибирске в сентябре 1968 года.

$f(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ могут описываться результаты одного и того же функционального преобразования (например, преобразования Фурье) над некоторыми исходными изображениями соответственно $f_1(x, y)$ и $\varphi_1(x, y)$. В этом случае говорят, что сравнение $f(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ производится в пространстве признаков в отличие от предыдущей ситуации, где сравнение производится в пространстве наблюдений.

В виду простоты наибольшее распространение получили меры подобия в виде скалярного произведения изображений и их взаимных корреляционных функций. Если $f(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ — непрерывные действительные функции, описывающие распределение амплитуды (интенсивности) света в плоскости (x, y) , то под скалярным произведением понимается выражение

$$k = \int_{\Omega} f(x, y) \varphi(x, y) dx dy, \quad (1)$$

где Ω — область, на которой заданы подынтегральные функции. Согласно этому выражению, мера подобия определяется путем перемножения значений функций $f(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ в точках (x, y) с последующим суммированием получаемых значений по всей области Ω . Значения взаимной корреляционной функции

$$k(\tau_1, \tau_2) = \int_{\Omega} f(x - \tau_1, y - \tau_2) \varphi(x, y) dx dy \quad (2)$$

определяются при фиксированных x, y аналогично (1) с той лишь разницей, что вычисления повторяются для каждого сдвига.

Операции нормировки воспринимаемого сигнала. Необходимость в выполнении таких операций вытекает из того, что из-за ряда неконтролируемых факторов воспринимаемый сигнал содержит помехи, наиболее существенные из которых обусловлены фоном, смещением, изменением масштаба и произвольной ориентацией изображений в плоскости (x, y) , а также изменением их средней яркости и контрастности. Поэтому нормировка входного сигнала предусматривает исключение или уменьшение влияния этих помех. Ее осуществление затрудняется тем, что параметры помех изменяются во времени или от изображения к изображению случайным образом.

Один из способов нормировки по сдвигу, углу поворота и масштабу состоит в поиске в текущий момент такого положения изображения, при котором мера подобия (1) окажется максимальной. Ясно также, что максимум меры подобия будет однозначным тогда, когда влияния изменений средней яркости и контрастности будут исключены. Нетрудно убедиться, что это условие будет соблюдено, если в качестве меры подобия изображений $f(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ принять безразмерный коэффициент корреляции

$$k = \frac{\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} f(x, y) \varphi(x, y) dx dy - \sqrt{\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} [f(x, y) - \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} f(x, y) dx dy]^2 dx dy \times - \frac{1}{\Omega^2} \int_{\Omega} f(x, y) dx dy \int_{\Omega} \varphi(x, y) dx dy}}{\times \sqrt{\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} [\varphi(x, y) - \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \varphi(x, y) dx dy]^2 dx dy}}. \quad (3)$$

При этом предполагаем, что при изменениях средней яркости и контрастности, измеряемых параметрами a и b , зависимость между $f(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ является линейной, т. е. $f(x, y) = a\varphi(x, y) + b$.

Имеются и другие возможности нормировки сигнала. Так, с помощью интегрального преобразования Фурье можно от исходного изображения перейти к спектру мощностей, не зависящему от сдвигов изображений во входной плоскости (x, y) .

Оправдывающим мотивом перехода в частотную плоскость является и то, что в этой области удобнее производить желаемую фильтрацию пространственных частот. Подобная необходимость может возникнуть в связи с потребностями повышения контраста, подчеркивания контуров, ослабления зернистости изображений и т. п.

Операция обучения реализуется в классификаторах в тех случаях, когда описание поверхности, разделяющей для простоты два класса (A и B) изображений, неизвестно. Исходным для формирования такого описания является выборка (конечная, состоятельная) изображений, принадлежность которых к классам A и B заранее известна. Процедуры обучения носят часто итерационный характер. В их основе лежит метод стохастической аппроксимации [3]. Согласно этому методу, описание разделяющей поверхности может быть получено из рекуррентного соотношения

$$\varphi[n] = \varphi[n-1] + \gamma[n] F'(y[n] - k) f[n]; \quad (4)$$

где $\varphi[n]$, $\varphi[n-1]$ — описания поверхности (координаты x, y опущены) соответственно на n -й и $(n-1)$ -й итерациях; $f[n]$ — изображение выборки, предъявленное на n -й итерации; $y[n]$ — требуемый результат классификации на n -й итерации; k — значение скалярного произведения изображений $f[n]$ и $\varphi[n-1]$, определяемое по (1); знак и абсолютное значение скалярного произведения определяют результат текущей классификации на n -й итерации (например, положительные значения — класс A , отрицательные — класс B); $F'(y[n] - k)$ — производная от критерия, на основании которого производится минимизация ошибки классификации; $\gamma[n]$ — коэффициенты, в частности, ими могут быть либо постоянная, либо гармонический ряд чисел. Доказано [3], что при некоторых ограничениях на значения коэффициентов $\gamma[n]$ итерационная процедура (4) сходится.

Известна также более простая процедура обучения, которая сводится к механическому запоминанию изображений обучающей выборки, а также информации о принадлежности этих изображений классам A и B . Классификация при этом производится путем отдельного вычисления мер подобия предъявленного изображения к совокупности изображений, принадлежащих соответственно классам A и B и хранящихся в памяти классификатора. Изображение относится к тому классу, мера подобия (близости) к которому является максимальной.

Таким образом, основными операциями процедуры классификации изображений являются операции сравнения, нормировки и обучения, выполняемые над пространственными (двумерными) сигналами. Характер этих операций с математической точки зрения несложен, однако их техническая реализация затруднялась ввиду отсутствия элементов (сред), допускающих восприятие, требуемую обработку и регистрацию пространственных сигналов. Это обстоятельство явилось главной причиной того, что решение задач классификации изображений производилось преимущественно с помощью ЭВМ, несмотря на общеизвестные трудности их использования. В последнее время положение несколько изменилось. Стали известными элементы оптики и электроники, которые хорошо

приспособлены для выполнения уже упомянутых функциональных преобразований. Кроме того, разработаны простые и весьма экономичные способы регистрации распределений амплитуд и фаз сигналов оптического диапазона, что облегчает задачу создания устройств хранения эталонных изображений, число которых может достигать десятков и сотен тысяч. Некоторые из таких элементов и способов рассматриваются в следующей части работы.

СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ОПЕРАЦИИ КЛАССИФИКАЦИИ

Устройства для определения меры подобия. На рис. 1 изображено устройство, основным элементом которого является специальный электронно-оптический преобразователь (ЭОП). По данным [4], ЭОП пред-

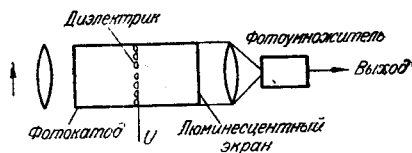


Рис. 1.

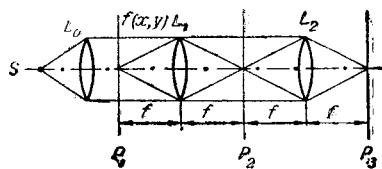


Рис. 2.

ставляет собой трубку с накоплением заряда (фотокаатод — сурьмяно-цезиевый; люминофор — сульфид цинка). Кроме того, устройство включает: входную и выходную оптические системы и фотоумножитель. Входная оптическая система предназначена для проектирования изображения на фотокаатод трубки, выходная — собирает свет люминесцентного экрана на входе фотоумножителя.

В устройстве предусмотрена возможность задания одного из изображений в виде потенциального рельефа на диэлектрике сетки. Для этого изображение проектируется на фотокаатод, а трубка с помощью напряжения, общего для всей подложки сетки, ставится в режим записи. Изменением напряжения подложки сетки рельеф фиксируется и может храниться некоторое время без существенного разрушения. Если теперь на вход устройства будет подано второе изображение, которое в виде электронного аналога пройдет через сетку с потенциальным рельефом, то интенсивность свечения точки (x, y) люминесцентного экрана при определенных условиях будет пропорциональна значению $f(x, y)\varphi(x, y)$. Выходная оптическая система собирает световой поток со всей поверхности экрана. Этот поток преобразуется фотоумножителем в уровень напряжения, пропорциональный скалярному произведению изображений (1).

Оптический вариант устройства для нахождения взаимной корреляционной функции изображений показан на рис. 2 [5]. В состав устройства входят: точечный когерентный источник света S , коллиматор L_0 , линзы L_1 и L_2 . На схеме также указаны входная и выходная плоскости P_1 и P_3 , а также плоскость фильтра P_2 . Расстояние между плоскостями и линзами L_1, L_2 равно f — фокусному расстоянию линз.

Представим теперь, что коэффициент амплитудного пропускания фильтра пропорционален $\Phi^*(p, q) e^{-ipb}$, т. е. произведению комплексно-сопряженной амплитуды спектра изображения $\varphi(x, y)$ и фазового множителя e^{-ipb} , где p, q — пространственные частоты (в рад/мм),

а b — постоянный коэффициент. Пусть $F(p, q)$ — комплексная амплитуда спектра изображения $f(x, y)$, получаемая в плоскости P_2 с помощью системы $P_1—L_1—P_2$ (о преобразовании Фурье см. ниже). Тогда на выходе фильтра распределение амплитуды и фазы когерентной световой волны может быть описано выражением

$$\Phi^*(p, q) F(p, q) e^{-ipb}. \quad (5)$$

Если теперь учесть, что работа системы $P_2—L_2—P_3$ эквивалентна преобразованию Фурье функции пространственных частот (5), то распределение амплитуды световой волны в плоскости P_3 имеет вид

$$k(\tau_1, \tau_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^*(p, q) F(p, q) e^{-ipb} e^{i(p\tau_1 + q\tau_2)} dp dq. \quad (6)$$

Выражение (6) эквивалентно выражению (2). Из него следует, что максимальное значение амплитуды света в плоскости P_3 будет наблюдаться в точке с координатами $x=b, y=0$. Эта амплитуда пропорциональна коэффициенту корреляции сравниваемых изображений.

Фильтры с пропусканием

$$e(p, q) \sim \Phi^*(p, q) e^{-ipb} \quad (7)$$

получили название комплексно-сопряженных. Методика их изготовления предусматривает регистрацию на фотопленке или фотопластинке картины интерференции волны $\Phi(p, q)$ и опорной плоской волны Re^{-ipb} , где b — параметр, характеризующий взаимное расположение источника опорной волны амплитуды R и изображения $\varphi(x, y)$ в момент изготовления фильтра. По существу, фильтр с пропусканием, пропорциональным (с точностью до слагаемого) выражению (7), является голограммой изображения $\varphi(x, y)$ [5, 6].

Согласно теории согласованной фильтрации, передаточная характеристика фильтра, описываемая (7), является оптимальной (в смысле максимизации отношения пикового значения сигнала к среднеквадратичному значению шума) лишь в случае, когда изображение $f(x, y)$ воспринимается с аддитивным «белым» шумом [7]. Если же шум «окрашен», то необходимо отыскивать другие выражения для передаточной характеристики. Так, известно, что при аддитивном окрашенном нормальном шуме с нулевым математическим ожиданием передаточная характеристика учитывает спектр мощности шума $S(p, q)$:

$$l_s(p, q) \sim \frac{l(p, q)}{S(p, q)}.$$

Общим достоинством описанных устройств сравнения является то, что все действия, необходимые для осуществления операции сравнения, выполняются практически мгновенно и одновременно для всего входного сигнала. Нельзя также не признать, что по отношению к объему действий, которые при этом выполняются, техническая реализация устройств сравнительно проста. Кроме того, в оптическом варианте имеется возможность голографической регистрации большого числа эталонных изображений на фотопластинке (фотопленке) и достижения оптимальной фильтрации. Тем не менее эти возможности реализации операций сравнения следует пока рассматривать лишь как иллюстративные, поскольку на пути их практического использования лежат существенные трудности. Так, например, уже упоминалось, что меры подобия (1), (2) зависят, в частности, от изменения средней яркости и контрастности изображений. Поэтому с целью обеспечения их независимости от

упомянутых влияний вычисление меры подобия следует производить не в виде (1) или (2), а в соответствии с выражением (3). Трудной технической задачей является также создание постоянных запоминающих устройств для хранения эталонных изображений, допускающих многократное и быстродействующее считывание информации. Решение этой задачи станет возможным при использовании дефлекторов (устройств отклонения) оптического излучения. В настоящий период изучены некоторые физические эффекты (электрооптические, ультразвуковые и др.), которые могут быть положены в основу работы таких устройств [8]. Исследования в этом направлении уже проводятся [9]. Кроме того, необходимо оценить потенциальные возможности устройств сравнения с точки зрения точности вычисления мер подобия, разрешающей способности, простоты технической реализации и т. п. Среди сравниваемых вариантов должны быть рассмотрены варианты вычисления мер подобия в некогерентном свете [10, 11].

Устройства нормировки. При реализации отдельных операций нормировки сигнала в предметной области могут оказаться эффективными электронно-оптические преобразователи. В такого рода элементах выходное оптическое изображение повторяет по форме и размерам входное, однако их положение в какой-либо системе координат в общем случае не совпадает и, более того, может быть легко управляемым с помощью отклоняющей системы. Это свойство ЭОП использовано в одном из описанных в литературе вариантов читающего автомата [12]. Считываемый знак текста проектируется на фотокатод ЭОП и с помощью его отклоняющей системы сдвигается в горизонтальном и вертикальном направлениях до тех пор, пока не будет совмещен с эталонным изображением. Этот момент фиксируется по значению скалярного произведения (1), которое при полном совпадении изображений будет максимальным. Поскольку вычисление меры подобия производится оптическими методами, быстродействие читающего автомата (10 знаков в секунду) ограничивается лишь инерционностью использованного ЭОП (10^{-4} сек). Если принять во внимание, что известны ЭОП с инерционностью 10^{-6} — 10^{-7} сек, то быстродействие классифицирующих устройств может быть существенным образом увеличено.

Пока неизвестны возможности использования ЭОП при нормировке сигнала по масштабу и ориентации изображений. В то же время подобные применения для техники классифицирующих устройств представляют существенный интерес.

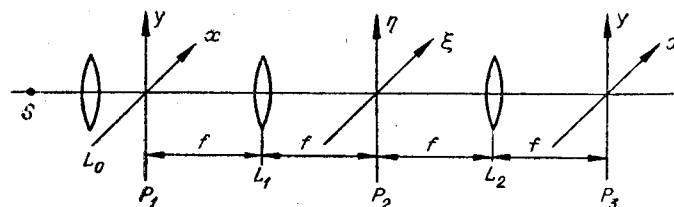


Рис. 3.

Имеются реальные возможности нормировки пространственных оптических сигналов и в частотной области. Переход от изображения к его спектру осуществляется с помощью Фурье-преобразователя, схематически показанного на рис. 3. Здесь S — точечный источник когерентного света; L_0 — коллиматор; P_1 — плоскость входного изображения $f(x, y)$; L_1 — сферическая линза; P_2 — частотная плоскость с координат-

ной системой (ξ, η) . Показано, что распределение комплексной амплитуды света в плоскости P_2 описывается выражением

$$F(p, q) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(\xi x + \eta y) \frac{2\pi}{\lambda f}} dx dy, \quad (8)$$

где ξ, η — координаты (в мм) частотной составляющей (p, q) , представленной в спектре амплитудой $F(p, q)$, а λ — длина волны. При этом $p = \frac{2\pi}{\lambda f} \xi$, $q = \frac{2\pi}{\lambda f} \eta$ [6].

Соотношение (8) справедливо при условиях, что линза L_1 свободна от aberrаций, плоскость P_1 совмещена с передней фокальной плоскостью линзы L_1 и размеры изображений $f(x, y)$ малы по сравнению с фокусным расстоянием [13].

По выполняемой функции система $P_2 - L_2 - P_3$ полностью идентична системе $P_1 - L_1 - P_2$ и используется для восстановления исходного изображения из спектра. Идентичность функциональных преобразований систем $P_1 - L_1 - P_2$ и $P_2 - L_2 - P_3$ приводит к тому, что в плоскости P_3 восстанавливается не $f(x, y)$, а $f(-x, -y)$, т. е. «перевернутое» изображение. С учетом этого можно условно говорить, что система $P_1 - L_1 - P_2$ реализует прямое преобразование Фурье, а система $P_2 - L_2 - P_3$ — обратное.

Инвариантность спектра мощности к сдвигам изображений в плоскости P_1 обуславливает широкое использование звеньев Фурье преобразований в классифицирующих устройствах. При этом необходимо учесть, что спектр мощности простым и естественным образом находится с помощью элементов со светочувствительным покрытием (фотопленок, фотопластинок, фотокатодов и т. п.), помещаемых на выходе Фурье-преобразователей. В качестве примера использования спектра мощности можно указать классификатор, описанный в [14]. Классификация производится на основании пяти признаков, инвариантных не только к сдвигу, но и к ориентации изображений. Последнее достигается путем интегрирования спектра мощности вдоль пяти концентрических щелей (конечной ширины и возрастающего размера), содержащихся на шаблонах. При этом спектр предварительно регистрируется на фотоматериале с последующим изготовлением позитива. Интегрирование реализуется с помощью фотоэлемента, выходное напряжение которого пропорционально суммарной интенсивности света на выходе позитива вдоль той или иной щели. Описанный прием имеет тот недостаток, что при его реализации возникает необходимость изготовления позитива спектра фотографическим путем. Однако он может найти практическое применение при использовании светочувствительных материалов (например, типа фотохромных), допускающих регистрацию световых изображений без фотопереработки и последующее их «стирание».

Устройства обучения. Одним из основных элементов устройств обучения является интегратор, позволяющий реверсивно и пропорционально изменять свое состояние в зависимости от знака и абсолютного значения управляющего сигнала. Интегратор, кроме того, должен удовлетворять требованиям длительного хранения накопленной информации, удобства ее записи и хранения, повышенного быстродействия и точности работы и т. п. В настоящее время наибольшее распространение получили подобные интеграторы для одиночных сигналов (напряжений, токов). Имеются в виду переменные резисторы, химотроны, реверсивные счетчики, накопители на магнитных сердечниках и т. д. Однако гораздо меньше изучено возможностей для создания интеграторов пространственных сигналов, требования к которым аналогичны требованиям к интеграторам

одиночных сигналов. Разница состоит лишь в том, что интеграторы пространственных сигналов должны допускать одновременное реверсивное и пропорциональное изменение своего состояния для всех точек задания сигнала. В режиме реверсивного пространственного интегрирования испытан, пожалуй, единственный элемент. Этот элемент уже частично рассматривался, поскольку он входил в состав устройства для нахождения скалярного произведения изображений. Элемент представляет

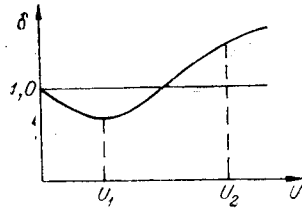


Рис. 4.

собой ЭОП со специальной сеткой. При работе ЭОП в режиме интегратора пространственных сигналов используется свойство рабочей площади сетки (с диэлектрическим покрытием) увеличивать или уменьшать потенциал в зависимости от плотности падающего потока электронов и потенциала подложки этой сетки. Изменение потенциала в i -й точке производится в соответствии с

$$\Delta \varphi(x_i, y_i) = (\delta - 1) f(x_i, y_i), \quad (9)$$

где δ — коэффициент вторичной эмиссии диэлектрика, зависящий от напряжения подложки сетки и определяемый из графика рис. 4, а $f(x_i, y_i)$ — плотность электронного потока, пропорциональная освещенности фотокатода в i -й точке. Приращение потенциала сетки будет положительным или отрицательным в зависимости от того, какое из напряжений U_1 ($\delta < 1$) или U_2 ($\delta > 1$) подано в текущий момент.

Процесс обучения в устройстве (см. рис. 1), в состав которого входит рассматриваемый ЭОП, протекает следующим образом. Вначале путем равномерного освещения фотокатода и подачи напряжения U_2 формируется равномерный опорный потенциал на диэлектрике сетки. При отключении этого напряжения опорный потенциал сетки сохраняется. Затем на фотокатод ЭОП проецируется одно из изображений обучающей выборки и в зависимости от того, соответствует или не соответствует выходной сигнал фотоэлектронного умножителя требуемому, на сетку подается U_2 или U_1 , в результате чего происходит увеличение или уменьшение потенциала диэлектрика сетки на величину (9). Сформированный после первой итерации потенциальный рельеф проверяется на выполнение требуемой классификации путем предъявления второго изображения обучающей выборки. При этом процесс корректировки рельефа на второй итерации аналогичен описанному. После предъявления n -го обучающего изображения потенциальный рельеф сетки будет описываться выражением (4) при условии, что $\gamma[n] = \gamma_0$, $F'(y[n] - k) = \text{sign}(y[n] - k)$. Обучение может быть продолжено, если устройство при повторном предъявлении изображений обучающей выборки допускает ошибки при их классификации. Рельеф, сформированный в результате обучения, сохраняется на сетке и является исходным при классификации изображений, принадлежащих классам A и B . Эксперименты по обучению этого устройства классифицировать изображения на два класса дали положительные результаты [4]. При этом экспозиция изображений была выбрана такой, что динамический диапазон интегратора составлял 25 весовых единиц. В этом диапазоне характеристика работы интегратора близка к линейной. К сожалению, не приводятся данные о длительности хранения потенциального рельефа.

Имеются краткие сообщения о возможности реверсивного интегрирования оптических пространственных сигналов с помощью фотохромных пленок и кристаллов, которые темнеют при облучении светом одной длины волны и светлеют при облучении светом другой [15].

Интересные возможности реализации операций обучения появились в связи с развитием голографии. Действительно, голограммы обладают свойством выделения из группы изображений лишь тех, которые на них записаны. Это свойство голограмм, рассматриваемое с возможностью большого накопления голографических изображений на светочувствительном материале, позволило Габору предложить устройство, принцип работы которого состоит в следующем [16]. Точечный источник света S с помощью системы зеркал преобразуется в мнимые точечные источники S'' и S' (рис. 5). Параллельный пучок света, создаваемый на выходе линзы L_0 точечным источником S' , проходит через пластинку Π_1 с отвер-

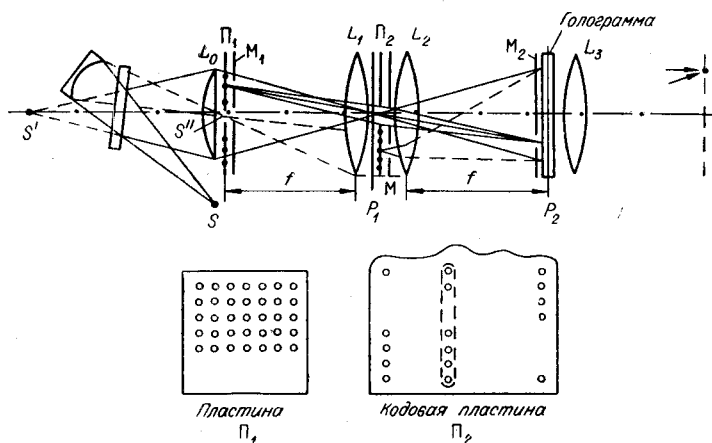


Рис. 5.

стиями. Тем самым на выходе пластины Π_1 получается множество точечных источников. Однако при регистрации каждого из изображений обучающей выборки используется лишь четыре из них, выбранных произвольным образом. Это реализуется с помощью маски M_1 , содержащей в своей плоскости четыре отверстия. Пучки от этих отверстий, прошедшие через линзу L_1 , используются для освещения диапозитивов изображений, помещаемых в плоскость P_1 .

Опорный параллельный пучок, создаваемый с помощью источника S'' на выходе линзы L_1 , проходит через пластину Π_2 , создающую, как и Π_1 , множество точечных источников, и кодовую маску M , определяющую двоичный код класса регистрируемого в данный момент изображения.

В задней фокальной плоскости линзы L_2 происходит наложение четырех дифрагированных волн от изображения и четырех плоских волн. Дифрагированные волны в плоскости P_2 дадут непересекающиеся дифракционные картины. На эти картины накладываются плоские волны. Однако для того, чтобы плоские волны не засвечивали всей плоскости фотопластинки, помещаемой в плоскость P_2 , используется маска M_2 . Последняя, за исключением центрального отверстия, соответствует маске M_1 и по отношению к ней расположена зеркально. Полученная на выходе маски M_2 картина регистрируется на фотопластинке.

После MN экспозиций (M — число классов, N — число изображений класса), сопровождающихся сменой масок M_1 , M_2 и M , фотопластинку проявляют. (Габор показывает, что на одной фотопластинке может быть зарегистрировано около 1000 изображений.) Полученная голограмма устанавливается на прежнее место. Этим заканчивается процесс обучения,

который в отличие от итерационного, сводится лишь к запоминанию изображений совместно с кодами классов.

В режиме классификации используются все точечные источники пластины P_1 и лишь центральное отверстие пластины P_2 . Маски M_1 и M_2 удаляются, а неиспользуемые отверстия пластины P_2 закрываются. Если теперь в плоскость P_1 поместить неизвестное изображение, то в плоскости P_2 появится код класса этого изображения. В заключение отметим, что использование четырех плоских волн для освещения изображений вызвано необходимостью получения более яркого и менее зависящего от дефектов фотопластинки изображения кода.

Заключение

Нами рассмотрены лишь некоторые из возможных реализаций операций, имеющих место при классификации изображений. Достоинство этих реализаций состоит в том, что они допускают восприятие и обработку пространственных сигналов в их естественной форме задания и тем самым открывают возможности для создания классификаторов параллельного способа действия. Трудно пока говорить о достижимых характеристиках и о рациональных методах построения таких устройств. Это предмет дальнейших исследований. Однако уже сейчас есть основания ожидать, что по быстродействию, точности и надежности работы, габаритам и другим параметрам классификаторы параллельного способа действия окажутся более приспособленными для решения многих задач классификации, чем существующая техника обработки информации, основанная на использовании ЦВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Себестян. Процессы принятия решений при распознавании образов. Киев, «Техника», 1965.
2. В. А. Ковалевский. Современное состояние проблемы распознавания образов.— Кибернетика, 1965, № 5.
3. Я. З. Цыпкин. Адаптация и обучение в автоматических системах. М., «Наука», 1968.
4. J. K. Hawkins, C. J. Munskey. An Adaptive System with Direct Optical Input.— Proceedings of the IEEE, 1967, v. 55, № 7.
5. A. Lugt Vander, F. B. Rots, A. Klooster. Character — reading by optical spatial filtering — Optical and Electro-optical Information Processing, 1965, p. 125—141.
6. Дж. Строук. Введение в когерентную оптику и голографию. М., «Мир», 1967.
7. К. Хелстром. Статистическая теория обнаружения сигналов. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
8. Г. П. Катус, Н. В. Кравцов, Л. Е. Чирков, С. М. Коновалов. Модуляция и отклонение оптического излучения. М., «Наука», 1967.
9. Голографическое оптическое ЗУ фирмы BELL.— Радиоэлектроника за рубежом, 1969, вып. 11 (501).
10. E. A. Trabka, P. C. Roetling. Shape Detection Using Incoherent Illumination.— Journal of Optical Society of America, 1967, v. 57, № 7.
11. J. K. Hawkins, C. J. Munskey. Image Processing by Electron-optical techniques.— Journal of Optical Society of America, 1967, v. 57, № 7.
12. Г. Л. Гимельфарб, В. К. Елисеев, Н. Д. Москанов, О. Ф. Цурин. Читающий автомат с оптическими эталонами и электронно-оптическим преобразователем.— Автоматика и телемеханика, 1968, № 3.
13. L. J. Cutrona, E. N. Leith, C. J. Palermo, L. J. Parcelllo. Optical Data Processing and Filtering Systems.— IRE Trans., 1960, IT-6, № 3.
14. G. G. Lendaris, C. L. Stanley. An opticalogical self-organizing recognition system.— Optical Information Processing, 1965.
15. Обзорение электронной техники.— Электроника, 1968, № 17.
16. D. Gabor. Character Recognition by Holography.— Nature, 1965, NT-44.

Поступила в редакцию
9 июня 1969 г.