

12. А. В. Тимофеев. Об одном классе полиномиальных разделяющих функций в задачах опознавания и диагностики.— Методы вычислений, вып. 7, ЛГУ, 1971.
13. А. В. Тимофеев. Системы инвариантного опознавания и их реализация методами когерентной и некогерентной оптики.— Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, 1971, № 6.

Поступила в редакцию 3 октября 1972 г.

© «Автометрия», 1974.

УДК 681.625+621.378.9

Л. БОРОВИЧ, А. ДУБИК

(Варшава)

КОГЕРЕНТНОЕ ОПТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ПО ИХ ОРИЕНТАЦИИ ВО ВХОДНОЙ ПЛОСКОСТИ

При обработке оптической информации когерентными устройствами, предназначенными, например, для распознавания образов, встречается проблема согласования ориентаций и масштаба изображения и фильтра. В настоящей работе авторы предлагают метод, который позволяет получить инвариантность изображения к повороту предмета. Метод использует разность ориентаций различных объектов для их идентификаций. Предлагаемая когерентная оптическая система позволяет идентифицировать объекты путем измерения угла их ориентаций в момент, когда функция корреляции на выходе является максимальной. Аналогично можно идентифицировать образы, измеряя масштаб объекта, перемещаемого вдоль оптической оси системы в момент наступления максимума функции корреляции.

Система может распознавать несколько объектов, имея на выходе один фотодетектор. Применение одного фотодетектора стало возможным благодаря регистрации вместе с согласованным фильтром в матрице памяти оператора линзы. Это позволяет получить постоянство положения максимума автокорреляционной функции на выходе оптического устройства для каждого из распознаваемых изображений.

В частотной плоскости оптического Фурье-анализатора — линзы получаем амплитудно-фазовое распределение объекта следующего вида:

$$\Lambda(x_3, y_3, d_3) \mathcal{F}[f(x_2, y_2)], \quad (1)$$

где $\mathcal{F}[\]$ — оператор Фурье-преобразования; $f(x_2, y_2)$ — функция входного изображения; x_2, y_2 — координаты предметной плоскости; x_3, y_3 — координаты частотной плоскости.

Выражение

$$\sum_{i=1}^n \delta(x - \xi_i, y - \eta_i) \quad (2)$$

описывает матрицу точечных источников в виде δ -функций Дирака, расположенных во входной плоскости системы; $i=1, 2, \dots, n$ — число точечных источников, соответствующее числу распознаваемых изображений. Такой вид источника света позволяет зарегистрировать в частотной плоскости P_4 (рис. 1) матрицу согласованных с объектами $f_k(x_2, y_2)$ фильтров. Пусть $f_1(x_2, y_2) \dots f_n(x_2, y_2)$ — образы, подлежащие идентификации. Для получения матрицы согласованных фильтров используем схему, представленную на рис. 1.

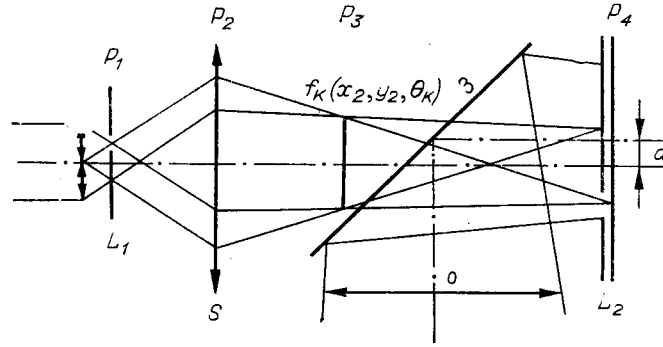


Рис. 1. Схема получения матрицы согласованных фильтров:
 L_1 , L_2 — кодирующие маски; $f_k(x_2, y_2, \theta_k)$ — предметная функция с заданной ориентацией θ_k ; S — линза; Z — полупрозрачные зеркала; a — величина смещения, O — опорный пучок.

Поместим в плоскости предметов P_3 (см. рис. 1) k -й объект, задавая ему ориентацию, определяемую углом θ_k . Тогда этот объект можно представить выражением

$$f(x_2 \cos \theta_k + y_2 \sin \theta_k; -x_2 \sin \theta_k + y_2 \cos \theta_k). \quad (3)$$

Предположим, что плоскость P_1 расположена на расстоянии $2F$ от линзы S (F — фокус линзы). Если осветить объект [см. (3)] одним из точечных источников света $\delta(x - \xi_k, y - \eta_k)$, заданным в плоскости P_1 маской с небольшим отверстием, имеющим координаты ξ_k, η_k , то светочувствительный материал, помещенный в частотной плоскости P_4 в область $-\xi_k, -\eta_k$, выделенную другой маской, после интерференции с опорной волной зарегистрирует распределение Фурье

$$\left| \Lambda(x_3, y_3, d_3) \mathcal{F}[f_k(x_2 \cos \theta_k + y_2 \sin \theta_k; -x_2 \sin \theta_k + y_2 \cos \theta_k)] + \Lambda^* \left(x_3, y_3, \frac{d_n f}{d_n - f} \right) \exp \left[jk \frac{d_n f}{d_n - f} a x_3 \right] \right|^2. \quad (4)$$

Повторяя эту операцию n раз для всех функций $f_n(x_2, y_2)$ и учитывая смену масок в плоскостях P_1 и P_4 при каждой новой экспозиции, получаем в частотной плоскости следующее распределение амплитуды световой волны:

$$\sum_{i=1}^n \left| \Lambda(x_3, y_3, d_3) \mathcal{F}[f_i(x_2 \cos \theta_i + y_2 \sin \theta_i; -x_2 \sin \theta_i + y_2 \cos \theta_i)] + \Lambda^* \left(x_3, y_3, \frac{d_n f}{d_n - f} \right) \exp \left[jk \frac{d_n f}{d_n - f} a x_3 \right] \right|^2; \quad x_3 = -\xi_i, \quad y_3 = -\eta_i.$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[f_i(x_2 \cos \theta_i + y_2 \sin \theta_i; -x_2 \sin \theta_i + y_2 \cos \theta_i)] &= \\ &= F_i \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \cos \theta_i + \frac{2\pi}{\lambda f} \sin \theta_i; -\frac{2\pi}{\lambda f} \sin \theta_i + \frac{2\pi}{\lambda f} \cos \theta_i \right), \end{aligned}$$

где λ — длина волны, формулу (4) можно записать так:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n [1 + |F_i|^2]_{\substack{x_3 = -\xi_i \\ y_3 = -\eta_i}} + \sum_{i=1}^n \Lambda(x_3, y_3, d_3) \Lambda \left(x_3, y_3, \frac{d_n f}{d_n - f} \right)_{\substack{x_3 = -\xi_i \\ y_3 = -\eta_i}} F_i \times \\ & \times \exp \left[-jk \frac{d_n f}{d_n - f} a x_3 \right] + \sum_{i=1}^n \Lambda^*(x_3, y_3, d_3) \Lambda^* \left(x_3, y_3, \frac{d_n f}{d_n - f} \right)_{\substack{x_3 = -\xi_i \\ y_3 = -\eta_i}} F_i^* \times \end{aligned}$$

$$\times \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \cos \theta_i + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \sin \theta_i; -\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \sin \theta_i + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \cos \theta_i \right) \times \exp \left[jk \frac{d_n f}{d_n - f} a x_3 \right]. \quad (5)$$

Последний член в (5) является суммой спектров Фурье согласованных фильтров, зарегистрированных в местах с координатами $x_3 = -\xi_i$; $y_3 = -\eta_i$ для функции $f_i(x_2, y_2)$, где $i=1, 2, \dots, n$. Третий член содержит оператор линзы

$$\Lambda^* \left(x_3, y_3, \frac{d_n f}{d_n - f} \right),$$

фазовый компенсатор

$$\Lambda^*(x_3, y_3, d_3),$$

а также член пространственного разделения

$$\exp \left[jk \frac{d_n f}{d_n - f} a x_3 \right].$$

Процесс распознавания образов поясняет схема рис. 2. Во время идентификации убираются маски, использованные на этапе регистрации матрицы памяти (5), а образ, подлежащий идентификации, помещается в предметной плоскости P_3 . Если осветить теперь этот объект одновременно из всех точечных источников, тогда в частотной плоскости P_4 системы (см. рис. 2) в местах, определяемых координатами (ξ_i, η_i) , получается его мультиплицированное преобразование Фурье

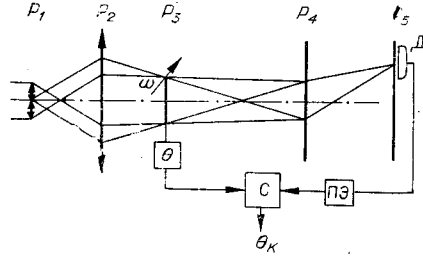


Рис. 2. Схема для распознавания образов по предложенному методу: ω — угловая скорость оборота распознаваемого образа; θ — временной датчик угла; ПЭ — пороговый элемент; Д — фотодетектор; С — схема; θ_k — параметр идентификации.

$$\Lambda(x_3, y_3, d_3) \sum_{i=1}^n \mathcal{F}[f_k(x_2, y_2)]_{\substack{x_3 = -\xi_i \\ y_3 = -\eta_i}}. \quad (6)$$

Для произвольной ориентации объекта $f_k(x_2, y_2)$ в предметной плоскости (6) можно переписать следующим образом:

$$\Lambda(x_3, y_3, d_3) \sum_{i=1}^n F_k \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \cos \Omega + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \sin \Omega; -\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \sin \Omega + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \cos \Omega \right)_{\substack{x_3 = -\xi_i \\ y_3 = -\eta_i}}. \quad (7)$$

Если теперь вращать объект вокруг оптической оси с угловой скоростью ω , то в частотной плоскости непосредственно за матрицей голограммных согласованных фильтров получим распределение

$$\Lambda^* \left(x_3, y_3, \frac{d_n f}{d_n - f} \right) \left[\sum_{i=1}^n F_k \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \cos \omega t + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \sin \omega t; -\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \sin \omega t + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \cos \omega t \right) \right]_{\substack{x_3 = -\xi_i \\ y_3 = -\eta_i}} \left[\sum_{i=1}^n F_i \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \cos \theta_i + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \sin \theta_i; -\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \sin \theta_i + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \cos \theta_i \right) \right]_{\substack{x_3 = -\xi_i \\ y_3 = -\eta_i}} \exp \left[jk \frac{d_n f}{d_n - f} a x_3 \right]. \quad (8)$$

Для дальнейших рассуждений ограничимся, исходя из (8), третьим членом в выражении (5), так как только от него зависит формирование корреляционной функции. Остальные члены разделены в пространстве и непосредственно не влияют на результат распознавания. Учитывая, что

$$F_{\substack{x_3=-\xi_i \\ y_3=-\eta_i}} F_{\substack{x_3=-\xi_{k \neq i} \\ y_3=-\eta_{k \neq i}}}^* = 0,$$

зависимость (8) запишем так:

$$\begin{aligned} \Lambda^* \left(x_3, y_3, \frac{d_n f}{d_n - f} \right) & \left[\sum_{i=1}^n F_k \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \cos \omega t + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \sin \omega t; -\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \sin \omega t + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \cos \omega t \right)_{\substack{x_3=-\xi_i \\ y_3=-\eta_i}} F_i^* \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \cos \theta_i + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \sin \theta_i; \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \sin \theta_i - \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \cos \theta_i \right)_{\substack{x_3=-\xi_i \\ y_3=-\eta_i}} \right] \exp jk \frac{d_n f}{d_n - f} a x_3. \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение (9) для плоскости P_5 (см. рис. 2) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \iint_{P_n} \Lambda^* \left(x_3, y_3, \frac{d_n f}{d_n - f} \right) F_k \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \cos \omega t + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \sin \omega t; \right. \\ & \left. - \frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \sin \omega t + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \cos \omega t \right)_{\substack{x_3=-\xi_i \\ y_3=-\eta_i}} F_i^* \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \cos \theta_i + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \sin \theta_i; \right. \\ & \left. - \frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \sin \theta_i + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \cos \theta_i \right)_{\substack{x_3=-\xi_i \\ y_3=-\eta_i}} \Lambda(x_3, y_3, d_6) \Lambda(x_n, y_n, d_6) \times \\ & \times \exp jk \frac{d_n f}{d_n - f} a x_3 \exp[-jkd_6(x_3 x_n + y_3 y_n)] dx_3 dy_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Принимая, что $d_6 = \frac{d_n f}{d_n - f}$, последнюю формулу можно представить как

$$\begin{aligned} & \Lambda(x_n, y_n, d_6) \sum_{i=1}^n \iint_{P_n} F_k \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \cos \omega t + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \sin \omega t, \frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \sin \omega t + \right. \\ & \left. + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \cos \omega t \right)_{\substack{x_3=-\xi_i \\ y_3=-\eta_i}} F_i^* \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \cos \theta_i + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \sin \theta_i; -\frac{2\pi}{\lambda f} x_3 \sin \theta_i + \right. \\ & \left. + \frac{2\pi}{\lambda f} y_3 \cos \theta_i \right)_{\substack{x_3=-\xi_i \\ y_3=-\eta_i}} \exp\{-jkd_6[(x_n - a)x_3 + y_n y_3]\} dx_3 dy_3. \end{aligned} \quad (11)$$

В моменты времени, для которых $\omega t = \theta_k$, выражение (11) примет вид

$$\begin{aligned} & \Lambda(x_n, y_n, d_6) \left[\sum_{i=1}^{k-1} f_k(x_n, y_n, \theta_k) f_i^*(x_n, y_n, \theta_i) + f_k(x_n, y_n, \theta_k)^* \right. \\ & \left. f_k^*(x_n, y_n, \theta_k) + \sum_{k+1}^n f_k(x_n, y_n, \theta_k) f_i(x_n, y_n, \theta_i) \right]_{\substack{x_n=a \\ y_n=0}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Из (12) следует, что корреляционная функция размещена в месте с координатами $x_3 = a$, $y_3 = 0$, что позволяет распознавать одним фотодетектором несколько объектов.

Предложенный метод изготовления матриц согласованных голографических фильтров позволяет идентифицировать образы на основе измерения величины угла, при котором фотодетектор регистрирует

максимум автокорреляционной функции. Благодаря вращению распознаваемого объекта в случае автокорреляционной функции на выходе системы получается электрический сигнал, во много раз больший, чем в случае взаимной корреляционной функции. Это значительно облегчает выделение сигнала. Представленная система накладывает ограничения на число распознаваемых изображений, так как фотодетектор регистрирует зависимость

$$\left| \sum_{i=1}^{k-1} f_k(\theta_k) * f_i^*(\theta_i) + f_k(\theta_k) * f_k^*(\theta_k) + \sum_{k+1}^n f_k(\theta_k) * f_i^*(\theta_i) \right|^2.$$

По предлагаемому методу можно построить инвариантное к повороту (масштабу) устройство с параллельным способом сравнения. Регистрация операторов линз в каждом месте матрицы исключает линзу, необходимую для создания оператора обратного Фурье-преобразования и получения корреляционной функции на выходе когерентного оптического устройства.

Поступила в редакцию 7 марта 1973 г.

УДК 681.327

Л. А. ДУШИН, В. И. ПРИВЕЗЕНЦЕВ,
В. С. ТАРАН, В. А. ЯМНИЦКИЙ
(Харьков)

ДВУХГРАДАЦИОННАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ ПЛАЗМЫ НА ЭВМ

Интерферометрические исследования плазмы в газовых разрядах требуют огромного труда, связанного с обработкой полученных фотографий. Известные способы обмера фотоснимков (измерение сдвига интерференционных полос) ручным способом и на полуавтоматических просмотрно-цифровальных столах имеют ряд недостатков, связанных главным образом с участием оператора. Следствием этого является низкая производительность, малая точность измерения и др.

Вопросам автоматизации интерферометрических измерений посвящено еще очень мало работ, и все они основаны на применении фототелеграфного аппарата и ЭВМ «Минск-22» [1—4]. В данной работе описывается система автоматической обработки, использующая ЭВМ «М-220А» и графикопостроитель АПГ на шаговых двигателях [5], представляющий собой в этом случае измерительное устройство.

Целью оптической интерферометрии плазмы является построение пространственно-временного распределения, которое находится по измерению сдвига интерференционных полос, вызванного изменением коэффициента преломления плазмы $n = 1 - 4,5 \cdot 10^{-14} \lambda^2 N$ (λ — длина волны).

Измеряемый сдвиг полос, вызванный изменением коэффициента преломления на длине L , равен

$$\Delta l = \frac{L}{\lambda} (1 - n) S,$$

где Δl — смещение полосы; S — расстояние между полосами.

В данной работе использовался интерферометр Маха — Цендери с гелий-неоновым лазерным осветителем. Регистрация интерференци-