

УДК 535 : 681.301

В. А. Сойфер, В. В. Котляр, С. Н. Хонина

(Самара)

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЯ НАПРАВЛЕНИЙ

Рассмотрены варианты оптических схем построения поля направлений для контурных изображений типа интерферограмм. Показана возможность перехода от фурье-коррелятора с установленным в частотную плоскость вращающимся экраном с радиальной щелью к оптической схеме с пространственным фильтром, состоящим из набора сегментных дифракционных решеток. Рассмотрены два типа сегментных пространственных фильтров для построения поля направлений, состоящих из дифракционных клиньев или бинарных решеток.

Специфический характер и сложность анализа таких объектов, как отпечатки пальцев, интерферограммы, кристаллограммы [1, 2] и другие контурные изображения, требуют предварительной обработки с целью выделения наиболее важной информации из массы несущественных деталей. Для этого предлагается структурировать контурное изображение путем построения поля направлений, характеризующего направление линий в каждой точке изображения. Это приводит к сжатию информации, так как целый набор линий заменяется на угол, характеризующий их направление, а также к выделению особых точек контурного изображения.

В [3] разработано и исследовано несколько цифровых методов построения и обработки поля направлений. Однако цифровой способ вычисления функции поля направлений требует больших временных затрат и поэтому малоэффективен в задачах поиска нужного изображения среди большого числа сходных изображений, например в дактилоскопии.

В работе [4] предложена простая оптическая схема для распознавания дактилограмм по их фурье-спектру, зарегистрированному фотоприемником, содержащим 32 кольцевые и 32 радиальные фоточувствительные ячейки. Однако анализ изображений по их пространственному спектру имеет серьезный недостаток. Изображения, отличающиеся перестановкой фрагментов, будут иметь почти одинаковые пространственные спектры и не интерпретируются системой как различные изображения. На наш взгляд, изображения со сложной структурой штрихов целесообразно анализировать по их полю направлений. В данной работе рассматривается оптический метод вычисления поля направлений.

Описание метода. Полем направлений [3] называется функция $\varphi(x, y)$, значение которой в данной точке равно углу касательной к линии постоянного уровня функции изображения $w(x, y)$ в этой же точке, приведенному к диапазону $[0, 180^\circ)$:

$$\varphi(x, y) = \arctg \left(- \frac{\partial \Lambda / \partial x}{\partial \Lambda / \partial y} \right) + \frac{\pi}{2}, \quad (1)$$

где $\Lambda(x, y) = w(x, y) - \text{const} = 0$ — линия уровня.

Оптический метод построения поля направлений [2] основан на представлении контурного изображения $w(x, y)$ в виде набора косинусных дифракционных решеток, ограниченных некоторыми областями, с различными углами наклона и частотой штрихов:

$$w(x, y) = \sum_{i=1}^N q_i(x, y) \cos(\alpha_i x + \beta_i y), \quad (2)$$

где $q_i(x, y)$ — функция области, ограничивающей i -ю решетку; $\cos(\alpha_i x + \beta_i y)$ — i -я решетка с параметрами α_i и β_i , определяющими частоту и наклон штрихов.

Угол наклона штрихов φ определяется через параметры решетки α и β следующим образом:

$$\begin{cases} y = x \cdot \text{tg}\varphi \\ \alpha x + \beta y = \text{const} \end{cases} \Rightarrow \text{tg}\varphi = -\frac{\alpha}{\beta}. \quad (3)$$

При этом в фурье-плоскости два δ -импульса, соответствующие такой решетке, будут располагаться на линии, проходящей через центр под углом $\theta = \text{mod}_\pi(\varphi + \pi/2)$, т. е. перпендикулярно углу наклона штрихов φ (рис. 1).

Если решетка ограничена некоторой областью $q(x, y)$, то в частотной плоскости получим свертку фурье-образа от функции $Q(\xi, \eta)$, описывающей эту область, с δ -импульсами. Так, при сканировании изображения прямоугольными окнами получим вместо δ -импульсов расположенные точно так же sinc-функции.

Далее, если в верхней части частотной плоскости (см. рис. 1) «вырезать» сегмент под углом $\theta = \text{mod}_\pi(\varphi + \pi/2)$, то еще одно фурье-преобразование от такого усеченного спектра даст следующий результат: в выходной плоскости (x', y') отличная от нуля интенсивность будет только в области, соответствующей решетке с углом наклона штрихов φ (с учетом симметрии (x', y') \rightarrow ($-x, -y$)).

Причем этот эффект имеет место независимо от частоты полос, так как им будут соответствовать δ -функции, находящиеся на одном луче: ближе или дальше от центра. Следовательно, вырезая сегмент вдоль направления $\theta = \text{mod}_\pi(\varphi + \pi/2)$, мы захватываем спектры от всех решеток с направлением штрихов $-\alpha_i/\beta_i = \text{tg}\varphi$ независимо от частоты штрихов и областей, их

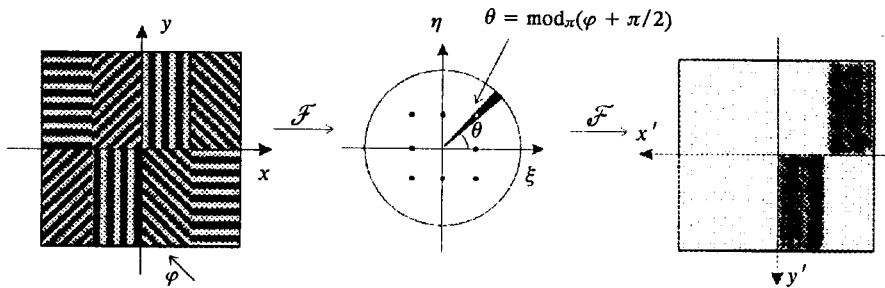


Рис. 1. Оптический метод построения поля направлений

ограничивающих. Таким образом, последовательность указанных преобразований запишется в виде

$$w(x, y) = \sum_{i=1}^N q_i(x, y) \cos(\alpha_i x + \beta_i y) \xrightarrow{\mathcal{F}} \sum_{i=1}^N Q_i(\xi - \alpha_i, \eta - \beta_i) \rightarrow$$

$$\xrightarrow{-\alpha_k/\beta_k = \text{tg}\varphi} \sum_{k \in K} Q_k(\xi - \alpha_k, \eta - \beta_k) \xrightarrow{\mathcal{F}} \sum_{k \in K} q_k(-x, -y) = D_\varphi(x, y), \quad (4)$$

где $D_\varphi(x, y)$ — совокупность всех областей, где линии изображения $w(x, y)$ направлены под углом φ ; \mathcal{F} — фурье-преобразование.

Таким образом, «вырезая сегменты» в верхней части фурье-плоскости, можно просканировать все направления линий, имеющиеся на изображении в диапазоне $[0, \pi)$. Для реализации описанного метода в [2] был предложен фурье-коррелятор с установленным в частотной плоскости вращающимся непрозрачным экраном, имеющим радиальную щель. Однако наличие механически вращаемого элемента сильно усложняет оптическую схему. Поэтому в данной работе вместо последовательного сканирования сегментов пространственного спектра предлагается разносить их пространственно с помощью фильтра, представляющего собой набор дифракционных решеток.

Оптическая схема, реализующая метод. На рис. 2, а показана оптико-электронная схема для построения поля направлений. Когерентное излучение с длиной волны λ проходит сквозь транспарант с амплитудной функцией пропускания $w(x, y)$, который расположен на входе в фурье-коррелятор. Пршедшее излучение в частотной плоскости коррелятора формирует фурье-спектр транспаранта. В этой плоскости располагаются совмещенные фазовый F_1 и амплитудный F_2 пространственные фильтры. На выходе коррелятора, где формируется набор фильтрованных и пространственно разделенных изображений, располагается матричный фотоприемник, электрически связанный с компьютером. Фазовый фильтр F_1 представляет собой набор дифракционных клиньев, расположенных по радиальным сегментам (рис. 2, б), и имеет функцию пропускания вида

$$F_1(r, \varphi) = \sum_{n=1}^N F_{1n} = \sum_{n=1}^N \exp \left[i \frac{k}{f} r \rho_n \cos(\varphi - \psi_n) \right] \text{rect} \left[\frac{\varphi - n\varphi_0}{\varphi_0} \right], \quad (5)$$

где (ρ_n, ψ_n) — полярные координаты центра n -го изображения на выходе коррелятора; (r, φ) — полярные координаты в плоскости фильтра; N — число

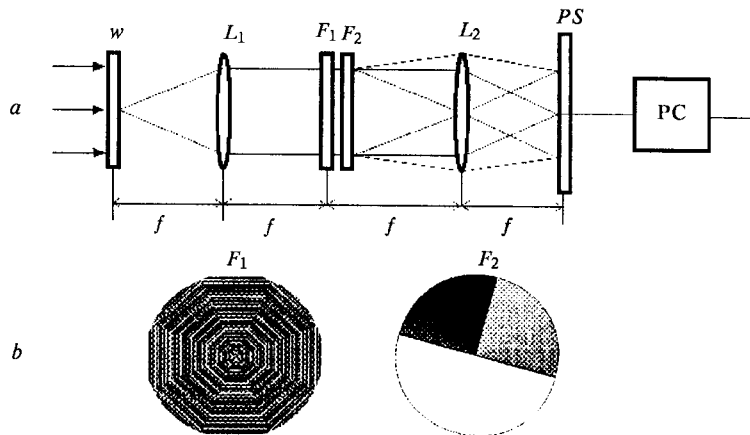


Рис. 2. Оптико-электронная схема для построения поля направлений

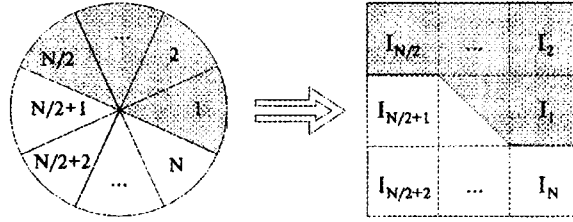


Рис. 3. Соответствие разнесенных изображений различным сегментам спектра, выделяемым фильтром F_1

сегментов фильтра; k — волновое число света; f — фокусное расстояние линз коррелятора; $2\varphi_0$ — угол раскрыва радиальных сегментов.

Амплитудный фильтр F_2 имеет пропускание, пропорциональное углу:

$$F_2(\varphi) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \varphi, & 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}, \\ \frac{3\pi}{2} - \varphi, & \frac{\pi}{2} < \varphi < \pi, \\ 1, & \pi < \varphi < 2\pi. \end{cases} \quad (6)$$

В результате прохождения светом коррелятора на выходе сформируются N пространственно разделенных изображений, $N/2$ из которых сформируются после прохождения светом верхней части фильтров, а другие $N/2$ — нижней. Соответствие полученных изображений различным сегментам спектра, выделяемым фильтрами, показано на рис. 3. Так как исследуемое изображение представляет собой амплитудный транспарант: $w(x, y) \geq 0$, то любая пара изображений, сформированных взаимно вертикальными сегментами фильтров, будет различаться постоянной, равной значению угла, задающего данный сегмент:

$$I_k(x, y) = \varphi_k I_{N/2+k}(x, y), \quad k = \overline{1, N/2}, \quad (7)$$

где $\varphi_k = k\varphi_0$; $I_k = |w \otimes f_k|^2$; $f_k = \mathcal{F}[F_{1k}F_2]$; \mathcal{F} — фурье-преобразование; \otimes — свертка; F_{1k} — пропускание k -го сегмента фильтра F_1 .

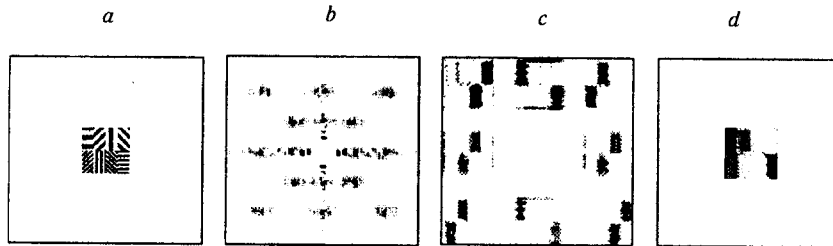


Рис. 4. Результаты построения поля направлений для изображения, состоящего из набора дифракционных решеток с использованием линейного фильтра F_1 и амплитудного фильтра F_2 по формуле (8):

a — изображение, b — пространственный спектр, c — распределение интенсивности на выходе коррелятора, d — поле направлений

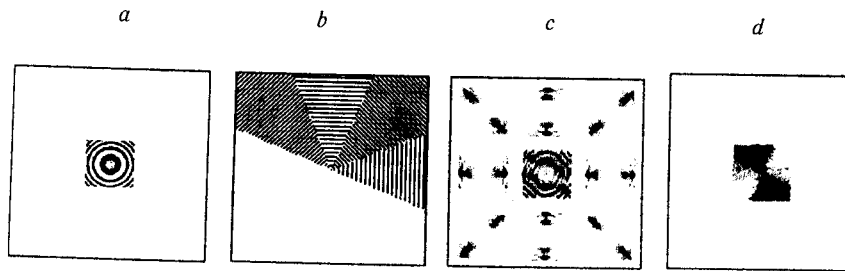


Рис. 5. Результаты построения поля направлений для интерферограммы с использованием бинарного фильтра F_1 и амплитудного фильтра F_2 по формуле (8):
a — интерферограмма, *b* — бинарный фильтр F_1 , *c* — распределение интенсивности на выходе коррелятора, *d* — поле направлений

Компьютер вычисляет отношение двух сумм, состоящих из распределений интенсивности зарегистрированных приемником изображений:

$$N(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^{N/2} I_n(x, y)}{\sum_{n=N/2}^N I_n(x, y)}. \quad (8)$$

Функция, определенная уравнением (8), и есть конечная цель вычислений и является оптическим аналогом поля направлений.

На рис. 4 представлены результаты компьютерного моделирования описанного метода для изображения, состоящего из набора дифракционных решеток с различным наклоном и плотностью штрихов (рис. 4, *a*). На рис. 4, *b* показан фурье-спектр этого изображения, получаемый в частотной плоскости коррелятора, а на рис. 4, *c* — распределение интенсивности на выходе коррелятора, представляющее собой набор пар изображений, соответствующих различным сегментам спектра. По формуле (8) из этого набора изображений было получено поле направлений (рис. 4, *d*).

Разработанная оптическая схема может иметь различные модификации.

Так, например, фильтр F_1 может быть не линейным, а бинарным, что значительно облегчает его изготовление. Действие такого фильтра показано на рис. 5: *a* — интерферограмма на входе, *b* — бинарный фильтр F_1 , *c* — распределение интенсивности на выходе коррелятора, *d* — поле направлений. Из рисунка видно, что действие бинарного фильтра аналогично действию линейного фильтра с той лишь разницей, что в центральной части выходной плоскости появляется изображение, представляющее собой наложение первых порядков, что не влияет на результат вычисления по формуле (8).

В качестве другой модификации можно заменить оптическую маркировку изображений по углам, которым они соответствуют, на электронное выполнение этой операции, состоящее в домножении на соответствующие ко-

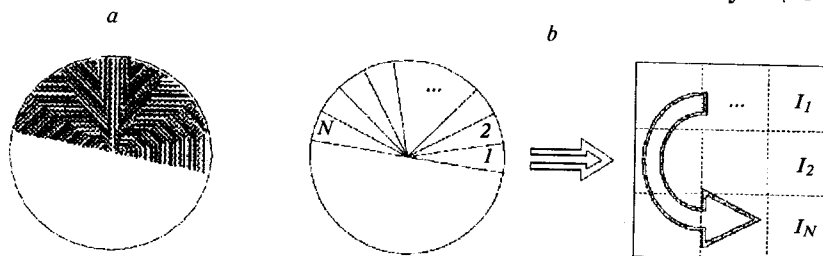


Рис. 6. Фазовый линейный пространственный фильтр F (*a*) и соответствие разнесенных изображений различным сегментам спектра, выделяемым фильтром F (*b*)

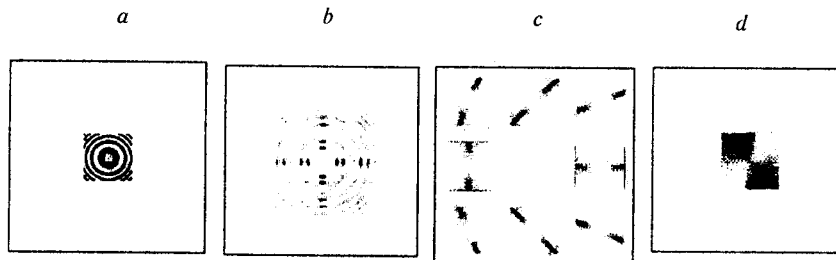


Рис. 7. Результаты построения поля направлений для интерферограммы с использованием только линейного фильтра F по формуле (9):
a — интерферограмма, *b* — пространственный спектр, *c* — распределение интенсивности на выходе коррелятора, *d* — поле направлений

эффиценты. Такое усложнение электронной части схемы позволяет не только убрать амплитудный фильтр F_2 , но и более рационально использовать рабочую часть выходной плоскости, так как в этом случае нет необходимости в паре изображений для каждого угла. В этом случае используется линейный селектирующий фильтр (рис. 6, *a*), позволяющий сформировать на выходе N пространственно разделенных изображений, соответствие которых различным сегментам спектра показано на рис. 6, *b*.

Компьютер вычисляет отношение двух сумм, состоящих из распределений интенсивности, зарегистрированных фотоприемником, с соответствующим коэффициентом и без него:

$$N(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^N \varphi_n I_n(x, y)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y)} \approx \varphi(x, y). \quad (9)$$

На рис. 7 представлены результаты вычисления поля направлений описанным способом для той же интерферограммы (рис. 7, *a*). На рис. 7, *b* показан фурье-спектр этого изображения, получаемый в частотной плоскости коррелятора, а на рис. 7, *c* — распределение интенсивности на выходе коррелятора, представляющее собой набор изображений, соответствующих различным сегментам спектра. Хорошо видно, что данный вариант позволяет отслеживать в 2 раза больше направлений, чем предыдущие. По формуле (9) из этого набора изображений было получено поле направлений (рис. 7, *d*), содержащее соответственно большее количество градаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Soifer V. A., Khonina S. N. Stability of the Karhunen — Loeve expansion in the problem of pattern recognition // Pattern Recogn. and Image Anal. 1994. 4, N 2. P. 135.
2. Khonina S. N., Kotlyar V. V., Soifer V. A., Dvoryanova T. P. Optical-digital method for detecting distortions in microcrystal structure of tear crystallogram // Proc. of SPIE, 5th International Workshop on Image Processing and Computer Optics. 1994. P. 249.
3. Ильясова Н. Ю., Устинов А. В., Храмов А. Г. Методы анализа дактилоскопических изображений на основе поля направлений // Научное приборостроение. 1993. 3, № 1.
4. Chen Z., Sun Y., Zhang Y., Mu G. Hybrid optical/digital access control using fingerprint identification // Opt. Eng. 1995. 34, N 3. P. 834.

Поступила в редакцию 22 сентября 1995 г.