

УДК 535.42

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

*(Самара)***ОПТИКО-ЦИФРОВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
ПО ИДЕНТИФИКАЦИИ ДАКТИЛОГРАММ**

Представлен оптико-цифровой метод и описан эксперимент по идентификации отпечатков пальцев. Идентификация основана на сравнении векторов признаков небольшой размерности (16 компонент), полученных с помощью разложения по базису Адамара полей направлений для каждого отпечатка (выделяются четыре направления). Введение операции ортогонализации «частичных» изображений при расчете поля направлений позволило увеличить надежность распознавания.

Введение. Персональная идентификация с помощью распознавания дактилограмм вызывает устойчивый интерес и важна для задач обеспечения безопасности. Для решения этих задач разрабатываются гибридные оптико-цифровые устройства, в которых распознавание контурных изображений основано на оптическом выполнении преобразования Радона [1, 2], анализе пространственного спектра Фурье изображения с помощью фотоприемника с кольцевыми и секторными чувствительными элементами [3], использовании совместной корреляции двух изображений с помощью фоторефрактивных кристаллов [4]. В некоторых существующих системах отпечатки пальцев вводятся в компьютер в реальном времени с помощью призмы, используемой в режиме полного внутреннего отражения [3—5]. Быстрый оптический ввод отпечатка пальца в память компьютера и оптическая предобработка изображения существенно ускоряют процесс распознавания, и в этом преимущество гибридных систем перед цифровыми.

Однако существующие системы идентификации дактилограмм несвободны от недостатков. Анализ и классификация структуры полос дактилограммы (папиллярного узора) с помощью оптической нейронной сети, предназначенной для выделения участков прямых линий на изображении методом преобразования Радона [1], или с помощью подсчета числа Гальтона (число бифуркаций и центров полос дактилограммы) [2] являются операциями с определенными затратами машинного времени. Это связано с наличием высокой пространственной несущей частоты на дактилограмме, которая затрудняет поэлементную обработку изображения. Анализ дактилограмм с помощью обработки пространственного спектра [3] хотя и является более быстрым вариантом распознавания, но обладает низкой достоверностью, так как инвариантен к перестановке участков на изображении. В [6] предложен метод оптического построения поля направлений структурно-избыточных изображений. Этот метод позволяет эффективно сжимать информацию, содержащуюся в изображениях с несущей пространственной частотой. Он основан фактически на замене участка изображения одним числом, равным среднему углу наклона полос на данном участке. В [7] описан численный эксперимент по идентификации дактилограмм (для 10 различных пальцев) с помощью полей направ-

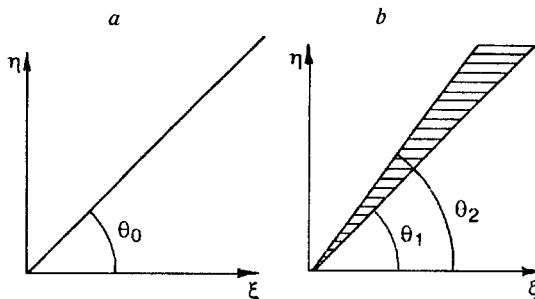


Рис. 1. Вид щелевых диафрагм, располагаемых в частотной плоскости:
a — бесконечно узкая, *b* — конечной ширины

лений (выделялось восемь направлений), который продемонстрировал высокую надежность идентификации по сравнению с методом Фурье-спектра. В данной работе приведены результаты оптико-цифрового эксперимента по идентификации также отпечатков 10 различных пальцев, но выделялось всего четыре направления: 0, 45, 90, 135°. Предложен также эффективный метод расчета поля направлений по ортогонализированному набору «частичных» изображений, позволяющий повысить надежность идентификации дактилограмм.

Теоретические основы метода идентификации дактилограмм. Поле направлений изображения — это функция координат точки, равная углу касательной к линии уровня интенсивности изображения. Так, если $I(x, y)$ есть интенсивность света в изображении, то поле направлений $\varphi(x, y)$ определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi(x, y) = - \frac{\partial I(x, y) / \partial x}{\partial I(x, y) / \partial y}, \quad 0 \leq \varphi(x, y) < \pi. \quad (1)$$

Очевидно, что угол $\varphi(x, y)$ задает направление, перпендикулярное вектору градиента $(\partial I(x, y) / \partial x, \partial I(x, y) / \partial y)$.

Реализовать оптическими средствами формулу (1) не представляется возможным. В [6] предложено оптически формировать поле направлений с помощью Фурье-коррелятора с пространственным фильтром в виде щели-сектора. На рис. 1 показаны два варианта щелей в частотной плоскости коррелятора: бесконечно узкая щель, заданная углом θ_0 (а), и щель конечной ширины, ограниченная углами θ_1 и θ_2 (б). Амплитуда светового поля $A(x', y')$ на выходе коррелятора с фильтрами (см. рис. 1) может быть выражена через амплитуду входного изображения $A_0(x, y)$ известным образом:

$$A(x', y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_0(x, y) h(x + x', y + y') dx dy, \quad (2)$$

где $h(x, y)$ — частотная характеристика пространственного фильтра, являющаяся Фурье-образом функции пропускания фильтра. Для щели в экране, заданной углом θ_0 (см. рис. 1, а), функция пропускания $H(r, \theta)$ и ее частотная характеристика равны:

$$H_1(r, \theta) = \delta(\theta - \theta_0), \quad (3)$$

$$h_1(x, y) = \left[x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0 \right]^{-2}, \quad (4)$$

где $\delta(x)$ — дельта-функция, а для конечной щели, показанной на рис. 1, b , соответствующие функции примут вид:

$$H_2(r, \theta) = \begin{cases} 1, & \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, \\ 0, & 0 \leq \theta \leq \theta_1, \theta_2 < \theta < 2\pi, \end{cases} \quad (5)$$

$$h_2(x, y) = \sin(\theta_1 - \theta_2) \left[x^2 \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 + y^2 \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 + xy \sin(\theta_1 + \theta_2) \right]^{-1}. \quad (6)$$

Если щель вращать в плоскости фильтрации и регистрировать интенсивность на выходе коррелятора в дискретные моменты времени, то образуется последовательность «частичных» изображений:

$$I_n(x', y') = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_0(x, y) h_n(x + x', y + y') dx dy \right|^2. \quad (7)$$

Здесь функция $h_n(x, y)$ определяется из уравнения (4) или (6) при следующем выборе углов: $\theta_k + \Delta n$, $k = 0, 1, 2$; $n = 1, 2, \dots, N$; Δ — дискретность отсчетов по углу.

С помощью линейной комбинации «частичных» изображений, взятых с весами, пропорциональными центральным углам щелей, можно определить функцию поля направления [7]:

$$\varphi(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^N \varphi_n I_n(x, y)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y)}, \quad (8)$$

где N — число положений щели; φ_n — угол наклона линий уровня интенсивности исходного изображения $I_0(x, y) = |A_0(x, y)|^2$, связанный с центральным углом θ_n щели выражением

$$\theta_n = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \varphi_n, & 0 < \varphi_n < \frac{\pi}{2}, \\ \frac{3}{2}\pi - \varphi_n, & \frac{\pi}{2} \leq \varphi_n < \pi. \end{cases} \quad (9)$$

Заметим, что так как исходное изображение $A_0(x, y)$ описывается действительной функцией, то модуль фурье-образа такой функции будет центрально-симметричным, и поэтому диапазон изменений угла φ_n лежит в интервале $[0, \pi)$. В [7] предложена многоканальная оптическая схема для параллельного построения N «частичных» изображений (рис. 2, a). В этом случае в корреляторе в частотной плоскости располагается пространственный фильтр DF в виде амплитудного (или фазового) транспаранта, состоящего из бинарных дифракционных решеток, делящих угол в 180° на N секторов, другая часть фильтра не пропускает свет (рис. 2, b). На рис. 2, a во входной плоскости коррелятора помещен отпечаток пальца на стекле F .

Хотя секторы решетки, формирующие «частичные» изображения, не пересекаются (см. рис. 2, b), каждая точка исходного изображения в принципе вносит вклад в каждую точку «частичного» изображения. Изображения со структурной избыточностью (контурные изображения типа отпечатков пальцев) состоят из большого числа линий с характерным периодом или из участков дифракционных решеток, пространственный спектр каждой из которых вносит вклад только в один из угловых секторов фильтра. Поэтому следует

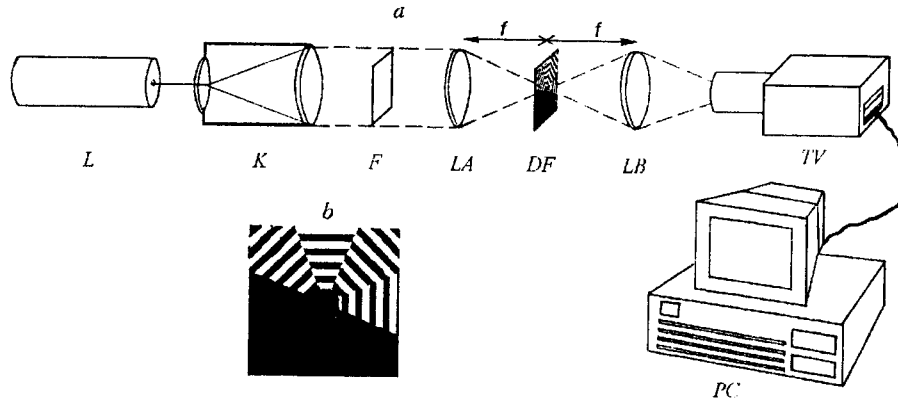


Рис. 2. Схема оптической установки для получения поля направлений (а) и фильтр DF (b)

ожидать, что «частичные» изображения будут почти ортогональны, т. е. «интеграл перекрытия» двух «частичных» изображений много меньше суммарной энергии каждого из них:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_n(x, y) I_m(x, y) dx dy \ll \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_n^2(x, y) dx dy. \quad (10)$$

Если неравенство (10) не выполняется, то можно осуществить операцию ортогонализации «частичных» изображений по правилу

$$\tilde{I}_k(x, y) = \begin{cases} 1, & I_k(x, y) = \max_n \{I_n(x, y)\}, \\ 0, & I_k(x, y) \neq \max_n \{I_n(x, y)\}, \end{cases} \quad (11)$$

где $\max_n \{ \dots \}$ — максимальное значение функции в точке среди функций с номерами $n = \overline{1, N}$.

Из уравнения (11) видно, что «частичные» изображения $\tilde{I}(x, y)$ представляют собой ортогональный набор бинарных функций. Они позволяют вместо уравнения (8) рассчитывать поле направлений по более простой формуле:

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=1}^N \varphi_n \tilde{I}_n(x, y), \quad \varphi_n = \frac{\pi n}{N}. \quad (12)$$

Далее полученное поле направлений разлагается в ряд по некоторому ортогональному базису. В [7] показано, что базис бинарных функций Адамара предпочтительнее, чем базис Фурье. Несколько первых коэффициентов разложения составляют вектор признаков поля направления.

Функции Адамара определяются, как известно, следующим образом [8]:

$$\text{had}_m(t) = (T)^{-1/2} \prod_{k=0}^{\infty} [\text{rad}_{k+1}(t)]^{m_k^\Gamma}, \quad (13)$$

где m_k^Γ — разряд кода Грея номера m ; $\text{rad}_m(t)$ — функция Радемахера. Код Грея образуется из номера m по правилу

$$m_k^\Gamma = m_k \oplus m_{k+1}. \quad (14)$$

Здесь k — номер двоичного разряда (справа налево); m_k — двоичный разряд в двоичной записи номера m : $m = \sum_{k=0}^{\infty} m_k 2^k$; знак \oplus означает сложение по модулю 2. Функция Радемахера определяется следующим образом:

$$\text{rad}_m(t) = \text{sgn} \left[\sin(2^m \pi t / T) \right], \quad (15)$$

где sgn — знаковая функция.

Идентификация отпечатков пальцев осуществляется с помощью поиска минимального евклидова расстояния между векторами признаков анализируемого изображения и набора эталонных базовых изображений. Евклидово расстояние определяется выражением

$$d_{mn} = \left[\sum_{k=1}^K \left[b_m^{(k)} - a_n^{(k)} \right]^2 \right]^{1/2}. \quad (16)$$

Здесь $b_m^{(k)}$ и $a_n^{(k)}$ — k -е коэффициенты m -го базового и n -го анализируемого векторов признаков; K — число коэффициентов разложения Адамара полей направлений.

Надежность идентификации дактилограммы можно характеризовать параметром R :

$$R_i = \frac{d_0^{(i)} - d_1^{(i)}}{d_1^{(i)}}, \quad (17)$$

где $d_0^{(i)}$ и $d_1^{(i)}$ — минимальное и ближайшее к нему значения расстояний между анализируемым i -м вектором и базисными векторами.

Средняя надежность метода идентификации характеризуется величиной

$$\langle R \rangle = (2M)^{-1} \sum_{i=1}^{2M} R_i, \quad (18)$$

где $2M$ — число анализируемых и базисных дактилограмм.

Таким образом, рассматриваемый в работе метод идентификации дактилограмм состоит из последовательности шагов.

1. Для каждого из анализируемых или базисных отпечатков пальцев, описываемых функцией пропускания $I(x, y)$, оптическими средствами с помощью коррелятора формируются N «частичных» изображений $I_n(x, y)$, имеющих пространственный спектр, заключенный в узком угловом секторе. Набор «частичных» изображений регистрируется и вводится в виде массива чисел в память компьютера.

2. Цифровая обработка «частичных» изображений состоит из следующих этапов:

а) формирование набора бинарно-ортогональных «частичных» изображений $\tilde{I}_n(x, y)$;

б) расчет поля направлений $\varphi(x, y)$ по формуле (8) или (12);

в) расчет K коэффициентов ($\{a_k^{(n)}\}$, $\{b_k^{(n)}\}$) разложения поля направлений $\varphi(x, y)$ по базису Адамара;

г) определение евклидовых расстояний d_{mn} и обнаружение минимального среди них.

Экспериментальные результаты. В [7] описан численный эксперимент по идентификации отпечатков 10 различных пальцев. Поле направлений строилось по восьми направлениям и в соответствии с уравнением (8), а число

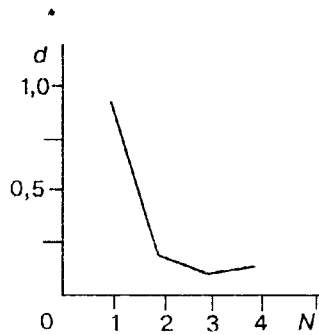


Рис. 3. График нормированной интенсивности для одной точки в разных «частичных» изображениях

коэффициентов разложения Адамара было равно 16 (длина вектора признаков). Средняя надежность идентификации $\langle R \rangle$ в данном численном эксперименте оказалась равной 0,64.

Ниже описывается оптико-цифровой эксперимент, аналогичный рассмотренному в [7], но для каждой дактилограммы численно

обрабатывались четыре реально полученных «частичных» изображения.

Отпечаток пальца на стекле F помещен на вход когерентного фурье-коррелятора (см. рис. 2, *a*), в частотной плоскости которого расположен пространственный фильтр DF в виде фазового транспаранта из бинарных дифракционных решеток, делящих 180° на четыре сектора, другая часть фильтра не пропускает свет (см. рис. 2, *b*). На выходе коррелятора регистрируется набор изображений, отличающихся от исходного (входного) изображения тем, что каждое из них имеет только часть спектра, попадающего в соответствующий сектор. Так как каждый сегмент фильтра DF представляет собой амплитудную бинарную дифракционную решетку, то после каждого сектора формируется пара симметричных изображений. Таким образом, из восьми полученных изображений неповторяющихся только четыре. Далее эти четыре изображения в компьютере совмещаются в одно изображение с весами, соответствующими сектору и равными углу наклона полос на изображении отпечатка пальца. В экспериментальной установке использовался фильтр с периодом дифракционных решеток 20 мкм.

При использовании уравнения (8) поле направлений отражает не только структуру основных полос дактилограммы, но и побочные структурные элементы, возникающие вследствие колебаний контраста полос изображения. Однако их вклад в частичное изображение относительно невелик. На рис. 3 изображен график нормированной интенсивности для одной характерной точки в четырех разных «частичных» изображениях. Как видно из рисунка, наибольшая интенсивность в произвольно выбранной точке (x, y) наблюдается в «частичном» изображении под номером 1. Интенсивность в этой же точке в других «частичных» изображениях существенно меньше. Подобное отношение интенсивностей наблюдается в большинстве точек.

В эксперименте с помощью оптической схемы (см. рис. 2, *a*) получены «частичные» изображения, показанные на рис. 4, *a*. Четыре из них участвовали в построении поля направлений, рассчитанного по формулам (8) и (12). Эти поля показаны на рис. 4, *b, c* соответственно. Размер «частичных» изображений 100×100 пикселей, все поле изображения имеет размер 512×512 пикселей. Физический размер поля телекамеры 10×10 мм, физический размер «частичного» изображения около 2 мм.

В качестве базисных выбирались 10 отпечатков. Базисные векторы признаков составлялись из коэффициентов разложения по базису Адамара полей направлений базисных отпечатков. Выбирались 10 анализируемых отпечатков и определялось евклидово расстояние d_{mn} от вектора каждого анализируемого отпечатка до вектора каждого базисного отпечатка по формуле (16): во всех экспериментах использовались первые 16 коэффициентов разложения Адамара.

На рис. 5, *a* изображен график евклидова расстояния d_{mn} между вектором признаков a_5 и 10 базисными векторами 10 разных пальцев. На рис. 5, *b* приведен график евклидова расстояния d_{mn} между вектором признаков b_5 и 10 анализируемыми векторами 10 разных пальцев.

Как видно из рис. 5, расстояние минимально между векторами a_5 и b_5 , т. е. происходит распознавание. То же самое происходит с любой другой парой векторов. При распознавании отпечатков по разложению Адамара их

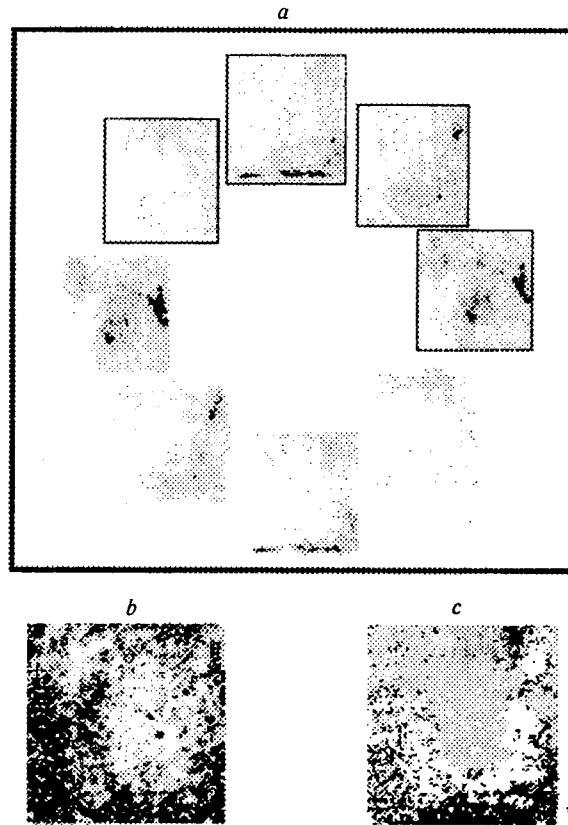


Рис. 4. Экспериментальные «частичные» изображения (а) и поля направлений, полученные из них по формулам (8) (b) и (12) (c) (изображения в рамках были использованы в построении поля направлений)

оптических полей направлений, полученных по формуле (12), значение $\langle R \rangle$ составляет 0,72, что несколько выше, чем значение аналогичного параметра при распознавании аналогичного набора отпечатков по разложению Адамара их полей направлений, которые, однако, получены путем численного моделирования [7] данной оптической установки по формуле (8): $\langle R \rangle = 0,64$.

Проводился также эксперимент по распознаванию отпечатков по полям направлений, которые были получены оптическим путем с использованием формулы (8). В этом случае не удалось добиться распознавания всех отпечатков и надежность этого метода оказалась существенно ниже: $\langle R \rangle = 0,24$. Ухуд-

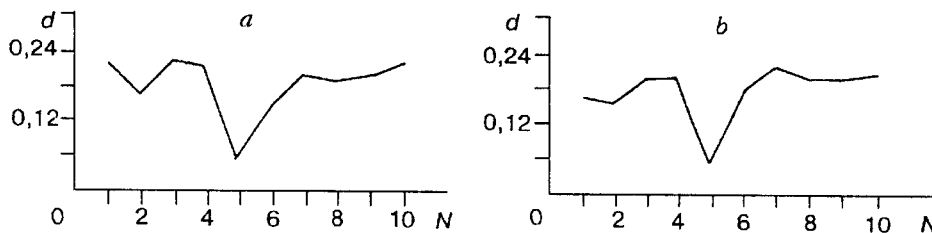


Рис. 5. Расстояния между вектором анализируемого отпечатка $\{a_5\}$ и векторами 10 базовых отпечатков $\{b_n\}$ (a) и между вектором базового отпечатка $\{b_5\}$ и векторами 10 анализируемых отпечатков $\{a_n\}$ (b)

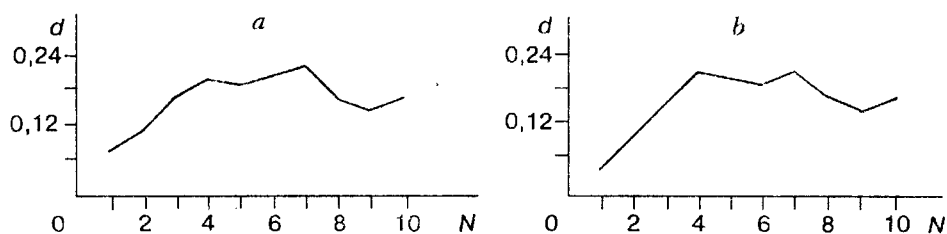


Рис. 6. Расстояния между вектором анализируемого отпечатка $\{a_i\}$ и векторами 10 базовых отпечатков $\{b_n\}$ (а) и между вектором $\{a_i\}$ и векторами 10 базовых отпечатков $\{c_n\}$, которые получены путем усреднения векторов от двух вариантов отпечатков одного пальца (б)

шение надежности по сравнению с результатом численного моделирования [7] связано с малым количеством выделяемых направлений, так как в численном методе выделялось восемь направлений.

Для увеличения надежности распознавания необходимо, чтобы базовый вариант был составлен как среднее от векторов полей направлений нескольких вариантов отпечатка одного пальца. На рис. 6, а представлены расстояния между вектором $\{a_i\}$ и 10 базовыми векторами, на рис. 6, б — расстояния между тем же вектором $\{a_i\}$ и 10 базовыми векторами, каждый из которых получен путем усреднения по двум векторам от разных отпечатков одного пальца.

Из рис. 6 видно, что разность расстояний d_{11} и d_{21} в том случае, если базовые векторы получены усреднением по двум векторам, увеличивается, следовательно, увеличивается параметр R . В таблице базовые векторы получены с усреднением. Из таблицы видно, что минимальные расстояния располагаются по диагонали, т. е. имеет место полное распознавание дактилограмм. Видно также, что операция усреднения для базовых отпечатков повысила надежность с $\langle R \rangle = 0,72$ до $\langle R \rangle = 0,88$.

Расстояния между векторами признаков из 16 компонент для 10 базовых $\{b_n\}$ векторов, составленных из двух разных отпечатков одного пальца и 10 анализируемых $\{a_n\}$ векторов отпечатков 10 различных пальцев

	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	R
a_1	4,8	10,0	15,0	20,0	18,0	18,0	21,0	16,0	13,0	15,0	1,10
a_2	12,0	5,6	14,0	18,0	17,0	16,0	19,0	17,0	12,0	16,0	1,00
a_3	13,0	15,0	4,9	11,0	21,0	19,0	14,0	14,0	11,0	12,0	1,20
a_4	16,0	18,0	10,0	5,3	21,0	14,0	8,8	13,0	10,0	12,0	0,68
a_5	22,0	14,0	22,0	21,0	4,0	13,0	21,0	19,0	20,0	22,0	2,30
a_6	16,0	17,0	17,0	12,0	17,0	6,1	12,0	11,0	13,0	16,0	0,79
a_7	17,0	21,0	15,0	8,7	24,0	16,0	6,0	8,5	9,8	9,1	0,42
a_8	15,0	18,0	13,0	7,9	21,0	14,0	7,2	5,1	7,8	7,0	0,36
a_9	13,0	17,0	11,0	8,9	21,0	15,0	7,7	6,4	4,8	6,6	0,34
a_{10}	14,0	19,0	15,0	12,0	22,0	17,0	11,0	6,7	10,0	6,1	0,10
R	1,40	0,77	1,10	0,50	3,30	1,20	0,19	0,24	0,65	0,08	0,88

Примечание. Последний столбец и последняя строка состоят из значений величины R

Заключение. В работе описан новый оптико-цифровой метод идентификации дактилограмм и показано, что для отпечатков пальцев, папиллярный узор которых, как правило, имеет $20 \div 30$ периодов модуляции функции пропуска, достаточно для надежного распознавания выделения четырех направлений ($0, 45, 90, 135^\circ$) и выбора 16 первых коэффициентов разложения Адамара поля направлений в качестве координат векторов признаков. Показано преимущество ортогонализации «частичных» изображений и вычисления поля направлений по формуле (12) по сравнению с уравнением (8), а также важность проведения предварительного усреднения по реализациям отпечатков одного пальца при построении поля направлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seth M., Datta A. K. Optical implementation of a connectionist model of Hough transform // Opt. Eng. 1996. 35, N 6. P. 1779.
2. Huh H., Pan J. K. Optical digital invariant recognition of two dimensional patterns with straight links // Ibid. N 4. P. 997.
3. Chen Z., Sun Y., Zhang Y., Mu G. Hybrid optical digital access control using fingerprint identification // Opt. Eng. 1995. 34, N 3. P. 834.
4. Rodolfo J., Rajbenbach H., Haignard J. P. Performance of a photorefractive joint transform correlator for fingerprint identification // Ibid. N 4. P. 1166.
5. Kawagoe M., Tojo A. Fingerprint pattern classification // Pattern Recognition. 1984. 17. P. 295.
6. Сойфер В. А., Котляр В. В., Хонина С. Н. Оптический метод построения поля направлений // Автометрия. 1996. № 1. С. 31.
7. Сойфер В. А., Котляр В. В., Хонина С. Н., Скиданов Р. В. Оптические методы идентификации дактилограмм // Компьютерная оптика. 1996. Вып. 16. С. 78.
8. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. М.: Сов. радио, 1979.

Поступила в редакцию 4 ноября 1996 г.
