

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

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

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДАКТИЛОГРАММ

Рассмотрены оптико-цифровые системы для идентификации дактилограмм по пространственному спектру и по полю направлений. Для построения поля направлений предложена оптическая схема когерентного коррелятора с пространственным фильтром, состоящим из сегментных дифракционных решеток. Показано, что анализ по полю направлений более предпочтителен. Показано также, что при анализе отпечатков пальцев по Фурье-спектру существенной оказывается информация только об угловом распределении спектра, а данные о радиальном распределении спектра являются избыточными.

Введение

В данной работе рассмотрены оптико-цифровые методы идентификации дактилограмм. Под идентификацией понимается как отнесение дактилограммы к одному из нескольких классов, так и выбор из многих дактилограмм тех, которые относятся к данному классу.

Для идентификации дактилограмм цифровыми методами требуются значительные временные затраты. Применение оптической предобработки позволяет, таким образом, сократив время, достичь высокой степени сжатия информации для последующей цифровой обработки.

Известные оптико-цифровые системы [1-3] идентификации дактилограмм основаны либо на корреляционном анализе, либо на анализе пространственного спектра. Так в работе [3] описаны два варианта (когерентный и некогерентный) оптико-цифровой системы идентификации дактилограмм, основанные на оптическом построении пространственного Фурье-спектра отпечатка пальца и регистрации его с помощью сегментно-кольцевого фотоприемника. В результате этого в компьютере вместо матрицы отсчетов изображения отпечатка пальца находится вектор признаков из 64 компонент (фотоприемник разделен на 32 угловых сегмента и 32 полукольцевых). Однако заметим, что анализ отпечатков пальцев по Фурье-спектру имеет следующие недостатки. Изображения, отличающиеся перестановкой фрагментов будут иметь одинаковые пространственные спектры и не будут интерпретироваться системой [3] как разные изображения. Кроме того, дактилоскопические изображения являются структурно избыточными. Т.е., представляют собой совокупность линий с характерным периодом, который составляет 0.5-0.7мм. Пространственный спектр таких изображений имеет специфику: он преимущественно расположен в узкой полосе частот в окрестности несущей пространственной частоты. Именно несущая частота воспринимается визуально как множество контурных линий и является основным фактором структурной избыточности дактилоско-

пического изображения. В связи с этим наличие 32 полукольцевых фотоприемников в Фурье-спектре, измеряющих радиальное распределение интенсивности света, информационно избыточно. В данной работе это показано на примере идентификации 10 отпечатков пальцев из 10 разных классов.

Рассматривается оптико-цифровой метод распознавания отпечатков пальцев по их полю направлений. 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

$$(\partial I(x, y) / \partial x, \partial I(x, y) / \partial y).$$

В [4] предложен оптический метод построения поля направлений. В данной работе поле направлений используется для построения вектора признаков, который используется для цифровой идентификации отпечатков пальцев. Показаны преимущества метода поля направлений перед Фурье-методом [3]. Заметим, что ранее уже было показано преимущество использования поля направлений на численных примерах [5].

1. Идентификация дактилограмм по пространственному спектру.

В данном разделе описаны результаты анализа 20 отпечатков пальцев. Из них 10 отпечатков разных пальцев считаются базовыми представителями 10-ти различных классов, а другие 10 отпечатков тех же пальцев, рассматривались в качестве анализируемых. Эти отпечатки пальцев были получены с помощью чернил на бумаге и на стекле. Отпечатки пальцев на бумаге с помощью телекамеры вводились в компьютер, а отпечатки на стекле использовались в когерентной оптической схеме как пропускающие амплитудные транспаранты для получения их пространственных Фурье спектров.

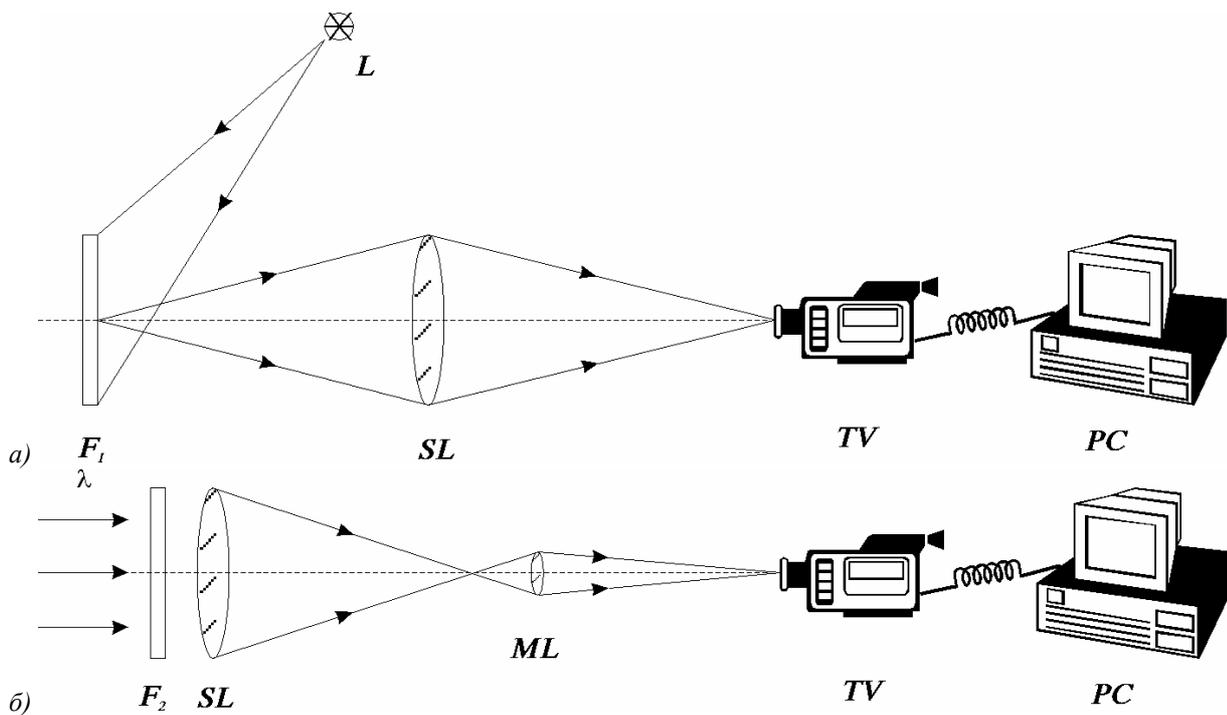


Рис. 1. Оптические схемы ввода изображения (а) и спектра (б) отпечатков пальцев в компьютер.

На рис.1 показаны две оптические схемы, которые использовались для получения пространственного спектра. Отпечаток пальца на бумаге в плоскости изображения F_1 (рис.1а) освещается лампой L , а сферическая линза SL строит его изображение в плоскости телекамеры TV , которая соединена с компьютером PC .

На рис.2а,г,ж,к показаны примеры изображений отпечатков пальцев размером 256×256 пикселей, полученных с помощью оптической схемы изображенной на рис.1а.

Причем отпечатки на рис.2а,г,ж являются отпечатками трех из 10 разных пальцев, выбранных в качестве базовых, а отпечаток на рис.2к является представителем десяти анализируемых отпечатков. На рис.2г и 2к показаны два отпечатка одного и того же пальца. На рис.2б,е,и,м показаны пространственные спектры, полученные численно для отпечатков пальцев на рисунках 2а,г,ж,к соответственно.

Когерентно-оптический вариант получения Фурье-спектра показан на рис.1б. Отпечаток пальца на стекле F_2 освещается коллимированным пучком света от лазера. Сферическая линза SL формирует спектр в задней фокальной плоскости, а микролинза ML увеличивает его и отображает в плоскость приемного окна телекамеры. На рис.2б,д,з,л показаны Фурье-спектры, полученные с помощью оптической системы на рис.1б, для соответствующих отпечатков пальцев (см. рис.2а,г,ж,к). Из сравнения второго и третьего столбцов на рис.2 видно хорошее соответствие обоих видов пространственных спектров, полученных когерентно-оптическим методом и цифровым. Анализ полученных пространственных спектров производился цифровым методом аналогичным [3]. Кадр размерностью 256×256 пикселей

разбивался в верхней половине на 32 угловых сектора, в нижней на 32 полукольца (см.рис.3).

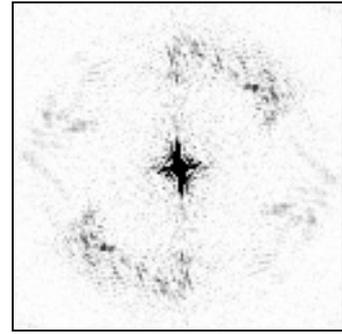
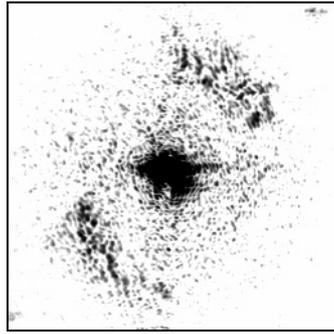
Вектора признаков для всех 20 отпечатков, состоящие из 64 компонент составлялись из значений усредненной по указанным областям интенсивности Фурье-спектра. На рис.4а,б,г,ж показаны угловые распределения (32 отсчета) интенсивности в спектре в пределах от 0° до 180° для отпечатков пальцев, показанных на рис.2а,г,ж,к, соответственно, а на рис.4б,г,е,з показаны радиальные распределения интенсивности (32 отсчета) для тех же отпечатков пальцев.

Таким образом 32 угловых отсчетов спектра и 32 радиальных представляют собой 64-х компонентный вектор признаков для базовых и анализируемых отпечатков пальцев. В таблице 1 представлены значения евклидова расстояния d_{mn} между векторами признаков из $K=64$ компонент для 10 базовых и 10 анализируемых отпечатков 10 разных пальцев. Расстояние d_{mn} вычислялось по формуле:

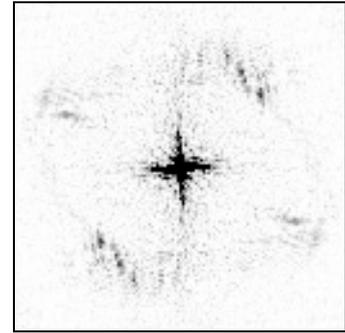
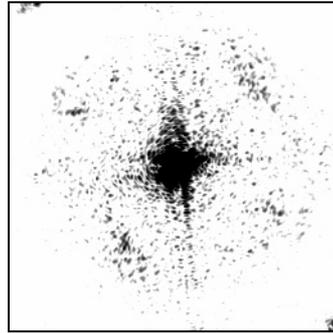
$$d_{mn} = \sqrt{\sum_{k=1}^K [b_m^{(k)} - a_n^{(k)}]^2} \quad (2)$$

где $b_m^{(k)}$ и $a_n^{(k)}$ - " k "-ые коэффициенты " m "-го базового и " n "-го анализируемого векторов, соответственно.

Значения расстояний в каждой строке таблицы 1 показывают результат идентифици $R = \frac{d_{\min} - d_{mm}}{d_{mm}}$ ка-ции вектора a_n среди набора базовых векторов $\{b_m\}$, $m = \overline{1, M}$, а значения в столбцах показывают результат идентификации вектора b_m среди набора анализируемых векторов $\{a_n\}$, $n = \overline{1, N}$.



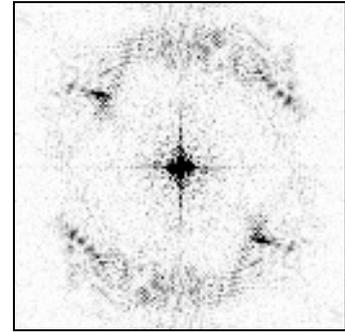
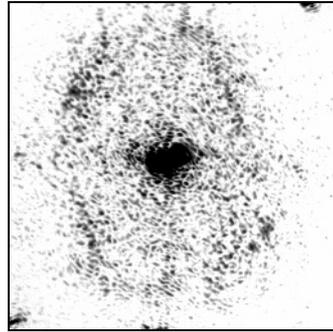
а б в



г

д

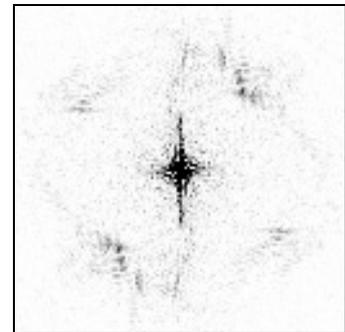
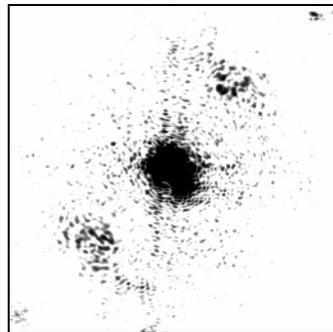
е



ж

з

и



к

л

м

Рис.2. Базовые отпечатки пальцев (а,г,ж) и анализируемый (к); их пространственные спектры, полученные когерентно-оптическим методом (б,д,з,л) и цифровым (в,е,и,м).

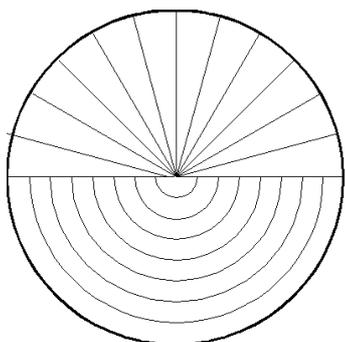


Рис.3. Разбиение пространственного спектра на 32 угловых и 32 радиальных сектора.

Чтобы характеризовать надежность распознавания в отдельном эксперименте, используется величина R , которая вычисляется по формуле:

$$R = \frac{d_{\min} - d_{mm}}{d_{mm}} \quad (3)$$

Таблица 1. Расстояния между векторами признаков из 64 компонент для 10 базовых $\{b_n\}$ и 10 анализируемых $\{a_n\}$ отпечатков 10 различных пальцев; последний столбец и последняя строка состоят из значений величины R .

	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	R
a_1	6.20	12.20	11.17	12.11	12.04	11.02	9.95	13.33	16.46	17.08	0.60
a_2	11.82	6.47	9.50	9.94	6.30	12.94	11.93	9.81	9.15	8.47	-0.03
a_3	8.43	8.84	4.79	6.46	8.22	8.03	8.30	6.78	12.54	12.54	0.349
a_4	11.10	9.91	6.44	6.17	7.66	8.86	9.75	7.09	10.38	11.87	0.04
a_5	9.94	6.62	6.72	6.62	4.27	9.86	8.38	8.03	9.12	8.9	0.55
a_6	9.68	10.69	6.97	8.92	9.48	5.68	10.98	7.11	11.18	12.79	0.23
a_7	9.97	10.19	7.58	6.81	8.71	11.91	4.97	11.13	14.52	14.63	0.37
a_8	10.81	8.01	6.28	8.36	6.37	9.13	10.64	5.61	8.38	7.96	0.12
a_9	17.41	11.74	14.21	14.87	10.84	16.15	17.45	12.69	7.87	8.97	0.14
a_{10}	13.60	8.10	10.47	11.40	7.40	12.33	13.95	8.78	6.28	5.27	0.19
R	0.36	0.02	0.31	0.05	0.47	0.41	0.67	0.21	-0.25	0.51	0.27

Таблица 2. Расстояния между векторами признаков из 32 угловых компонент для 10 базовых $\{b_n\}$ и 10 анализируемых $\{a_n\}$ 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	5.33	8.93	8.59	9.29	7.74	6.04	8.58	9.90	9.40	10.45	0.13
a_2	6.43	4.43	5.29	7.07	4.55	6.64	9.63	6.16	5.98	4.88	0.03
a_3	7.28	5.47	2.88	5.22	5.10	6.42	7.45	4.79	7.48	7.48	0.66
a_4	8.58	6.82	5.49	5.29	5.51	7.83	7.76	6.41	6.87	8.97	0.04
a_5	6.16	5.71	4.75	5.27	3.72	5.29	6.84	6.39	6.52	6.21	0.28
a_6	7.20	6.24	5.99	7.87	6.16	5.08	8.93	5.77	5.80	8.49	0.14
a_7	8.73	9.02	6.52	5.64	6.97	9.42	4.21	9.47	10.78	10.95	0.34
a_8	7.50	5.84	4.12	7.26	5.39	5.84	9.11	4.71	6.03	5.44	-0.14
a_9	8.87	6.13	8.19	9.51	6.51	7.60	12.24	6.82	3.29	5.41	0.64
a_{10}	8.12	4.90	7.02	8.87	5.99	7.01	11.31	6.30	4.89	3.50	0.40
R	0.16	0.11	0.43	-0.01	0.22	0.04	0.62	0.02	0.49	0.39	0.25

Из рис.4 видно, что кривые б,г,е,з - отражающие радиальные распределения интенсивности в спектре гораздо менее чувствительны к видоизменению отпечатков, чем кривые а,в,д,ж, которые соответствуют угловому распределению интенсивности в спектре. Это объясняется тем, что в картине полос отпечатков пальцев расстояние между соседними полосами почти не изменяется. Это приводит

где d_{mm} диагональный элемент матрицы, d_{min} минимальный недиагональный элемент.

Так как вектора b_n и a_n с одинаковыми номерами соответствуют разным отпечаткам одного пальца, то идентификация будет успешной, если минимальные значения расстояний d_{mn} в каждой строке и в каждом столбце находятся на диагонали, при этом величина R должна быть положительной.

Из таблицы 1 видно, что во второй строке и в девятом столбце минимальные расстояния не принадлежат диагонали матрицы значений, и значение R отрицательно. То есть полной идентификации не произошло, так как вектор a_2 отнесен к классу b_5 , а из всех анализируемых элементов к классу b_9 ближе элемент a_{10} . В правом нижнем углу таблицы помещается усредненное значение $\langle R \rangle$. Эта величина позволяет оценивать надежность самого метода распознавания. В общем случае, чем больше эта величина, тем надежнее метод распознавания.

к тому, что пространственный спектр отпечатков пальцев носит специфический характер; он сосредоточен в кольце некоторого радиуса, который пропорционален несущей пространственной частоте, пропорциональной обратному расстоянию между соседними полосами на отпечатке. Поэтому, если исключить из рассмотрения отсчеты радиальной части вектора признаков, а оставить только 32 ком-

поненты, соответствующие отсчетам углового распределения интенсивности в спектре, то качество идентификации почти не изменяется. Это видно из таблицы 2, в которой представлены расстояния между векторами признаков только из 32 угловых компонент для тех же 10 базовых $\{b_n\}$ и 10 анализируемых $\{a_n\}$ отпечатков 10 различных пальцев.

Из таблицы 2 видно, что идентификация не произошла только в двух случаях: вектор a_8 отнесен к классу b_3 , и классу b_4 оказался ближе вектор a_3 . А значение величины $\langle R \rangle$ почти не отличается от значения этой величины для распознавания по вектору признаков из 64 компонент: $\langle R \rangle = 0.27$ (таблица 1) и $\langle R \rangle = 0.25$ (таблица 2).

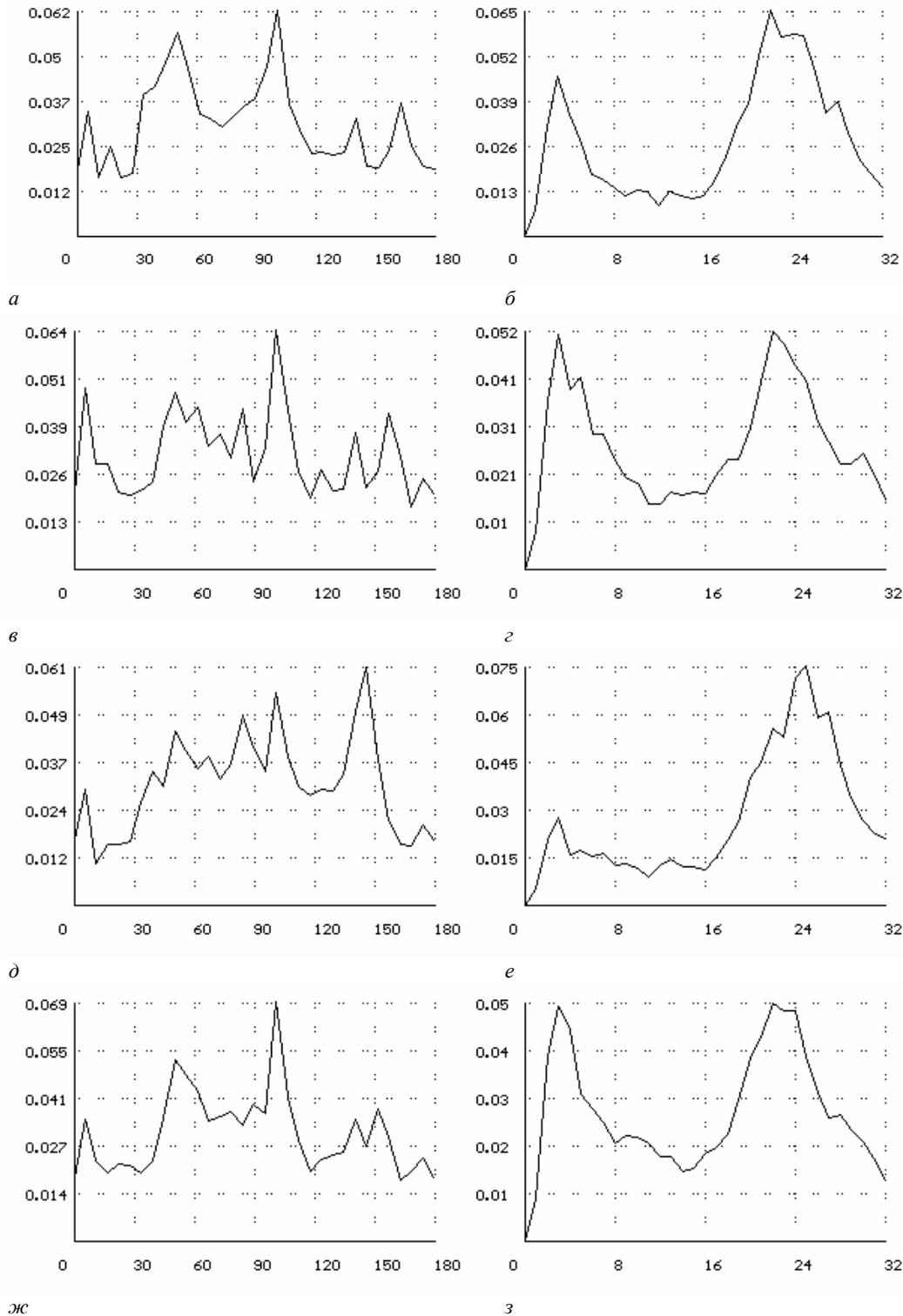


Рис.4. Вектора признаков для трех базовых (а-б,в-г,д-е) и одного анализируемого (ж-з) отпечатков пальцев; по горизонтальной оси отмечены градусы (а,в,д,ж) и номера полуколец (б,г,е,з); по вертикальной оси - относительные значения усредненной интенсивности спектра.

2 Идентификация дактилограмм по полю направлений.

2.1 Оптическая схема построения поля направлений.

В данном разделе описывается оптико-цифровой метод анализа отпечатков пальцев по полю направлений. Для построения поля направлений используется оптическая схема изображенная на рис.5а.

Отпечаток пальца на стекле F_2 помещен на вход когерентного Фурье-коррелятора (рис.5а), в частотной плоскости которого расположен пространственный фильтр SF в виде амплитудного транспаранта из бинарных дифракционных решеток, делящих 180° на 4

сектора, другая часть фильтра не пропускает свет (рис.5б). На выходе коррелятора регистрируется набор изображений, отличающихся от исходного (входного) изображения тем, что каждое из них имеет только часть спектра, попадающую в соответствующий сектор. Так как каждый сегмент фильтра SF представляет собой амплитудную бинарную дифракционную решетку, то для каждого сектора мы будем получать пару симметричных изображений. Таким образом, из 8 полученных изображений неповторяющихся только 4. Далее эти 4 изображения в компьютере совмещаются в одно изображение с весами, соответствующими сектору и равными углу наклона полос на изображении отпечатка пальца.

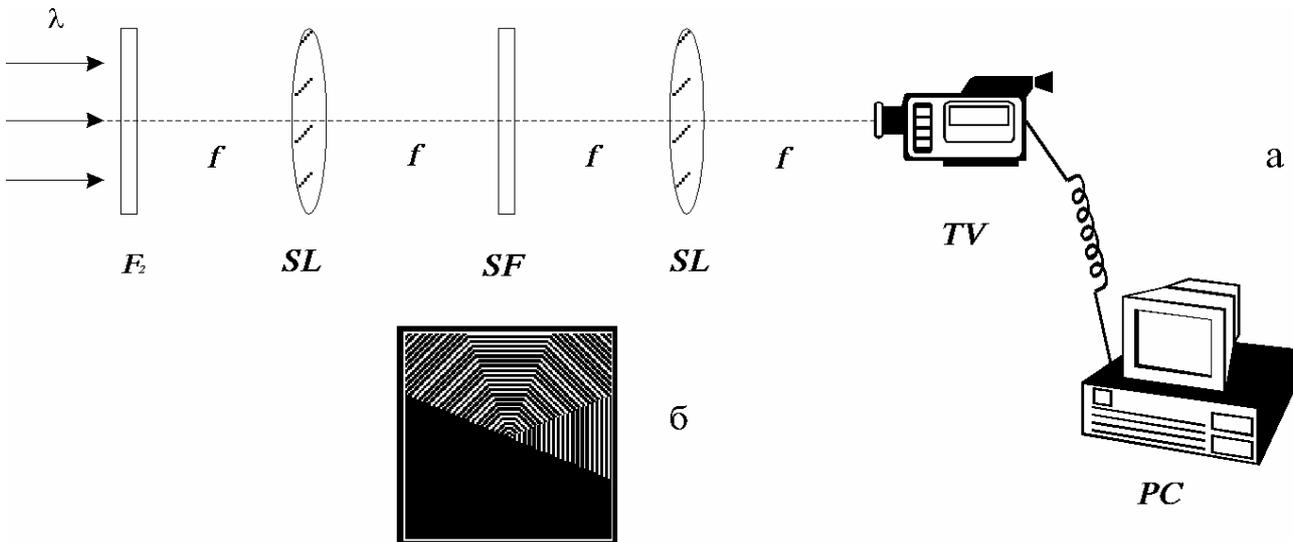


Рис.5. Оптическая схема Фурье-коррелятора (а) для построения поля направлений с пространственным фильтром из амплитудных секторных дифракционных решеток (б).

Поле направлений, которое в аналитическом виде определяется соотношением (1), в данном случае аппроксимируется выражением:

$$\varphi(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^N \varphi_k I_k(x, y)}{\sum_{k=1}^N I_k(x, y)} \quad (4)$$

где $I_k(x, y)$ - функция интенсивности " k "-го неповторяющегося изображения, сформированного на выходе коррелятора в оптической схеме на рис.5а, после прохождения светом " k "-го сектора решетки фильтра с центральным углом:

$$\theta_k = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \varphi_k, & 0 < \varphi_k < \frac{\pi}{2} \\ \frac{3\pi}{2} - \varphi_k, & \frac{\pi}{2} < \varphi_k < \pi \end{cases}, k = \overline{1, N} \quad (5)$$

где φ_k - отсчеты угла наклона полос на отпечатке, $N=4$ - число секторов.

На рис.6 показан пример оптического построения поля направлений для тестового изображения, состоящего из 4-х секторов, в которых полосы направлены под углами 0° , 45° , 90° (см. Рис.6а).

На выходе коррелятора, схема которого показана на рис.5а, получается 6 пространственно разделенных изображений (кроме центрального), 3 из которых (в правом верхнем углу на рис.6б) соответствуют трем направлениям несущей частоты в исходном изображении, а остальные являются их симметричным повторением. Неповторяющиеся изображения складываются в компьютере в соответствии с уравнением (4). На рис.6в показан результат сложения, представляющий собой поле направлений, для изображения на рис.6а: темно-серый цвет - 90° , серый - 45° , светлый - 0° . На рис.6г показано поле направлений (256×256 отсчетов) для того же изображения (рис.6а), но рассчитанное на компьютере. Видно, что реальное и рассчитанное поля направлений хорошо согласуются (сравни рис.6в и рис.6г).

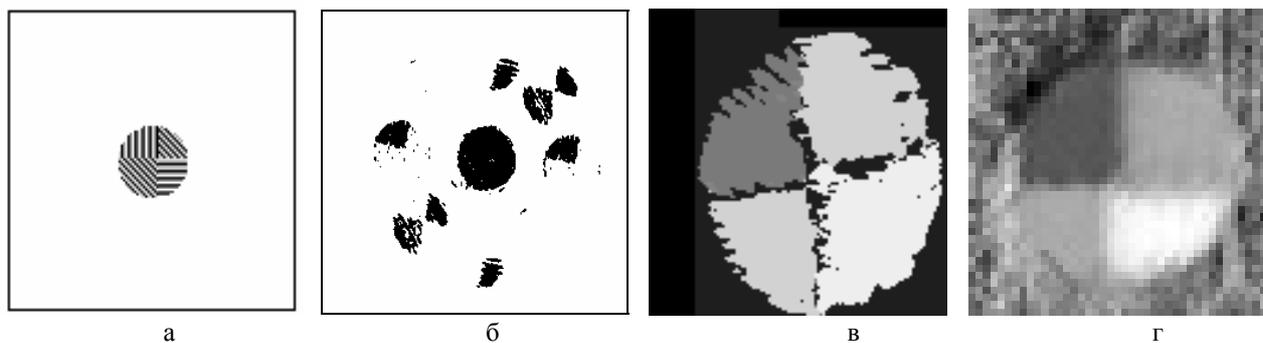


Рис.6. Модельный объект (а), полосы на котором расположены под тремя углами (0° , 45° и 90°); картина, зарегистрированная на выходе коррелятора с 4 секторами решетками (б); поле направлений (в), полученное с помощью изображений (б); и поле направлений (з), рассчитанное на компьютере.

Заметим, что совмещение четырех частичных изображений при получении реального поля направлений происходит цифровым методом. При этом необходима большая точность позиционирования частичных изображений, это ведет к увеличению затрат времени на обработку. Поэтому предлагается упрощенный метод получения поля направлений. Оптическая схема для получения поля направлений по упрощенному методу показана на рис.7.а

Отпечаток пальца на стекле F_2 помещен на вход когерентного Фурье-коррелятора (рис.7а), в частотной плоскости которого попеременно располагаются пространственные фильтры SF в виде амплитудных транспарантов. Один из них состоит из 8 секторов, коэффициент поглощения которого T пропорционален корню квадратному из угла. Эти сектора занимают 180° , другая часть фильтра не пропускает свет (рис.7б). Другой фильтр просто закрывает половину частотной плоскости (рис.7в). После последовательного применения обоих фильтров на выходе коррелятора регистрируются два изображения, которые используются далее для вычисления

в компьютере их отношения, аппроксимирующего поле направлений исходного изображения:

$$\varphi(x, y) \cong \frac{|f(x, y) \otimes g_1(\xi, \eta)|^2}{|f(x, y) \otimes g_2(\xi, \eta)|^2 + \alpha^2} \quad (6)$$

где $f(x, y)$ - функция исходного изображения, $g_1(\xi, \eta)$, $g_2(\xi, \eta)$ - Фурье-образы от функции пропускания фильтров, изображенных на рисунках 7б и 7в, соответственно, \otimes - знак операции свертки, α - регуляризирующая константа.

На рис.8а показано поле направлений (128×128 пикселей) полученное путем моделирования коррелятора изображенного на рис. 7а и по формуле (6) отпечатка пальца изображенного на рис.2а, на рис.8б показано то же самое поле направлений, но обработанное медианным фильтром, на рис.8в показано поле направлений от того же отпечатка пальца рассчитанное по формуле (4). Как видно из рис.8 эти поля направлений совпадают в крупных деталях.

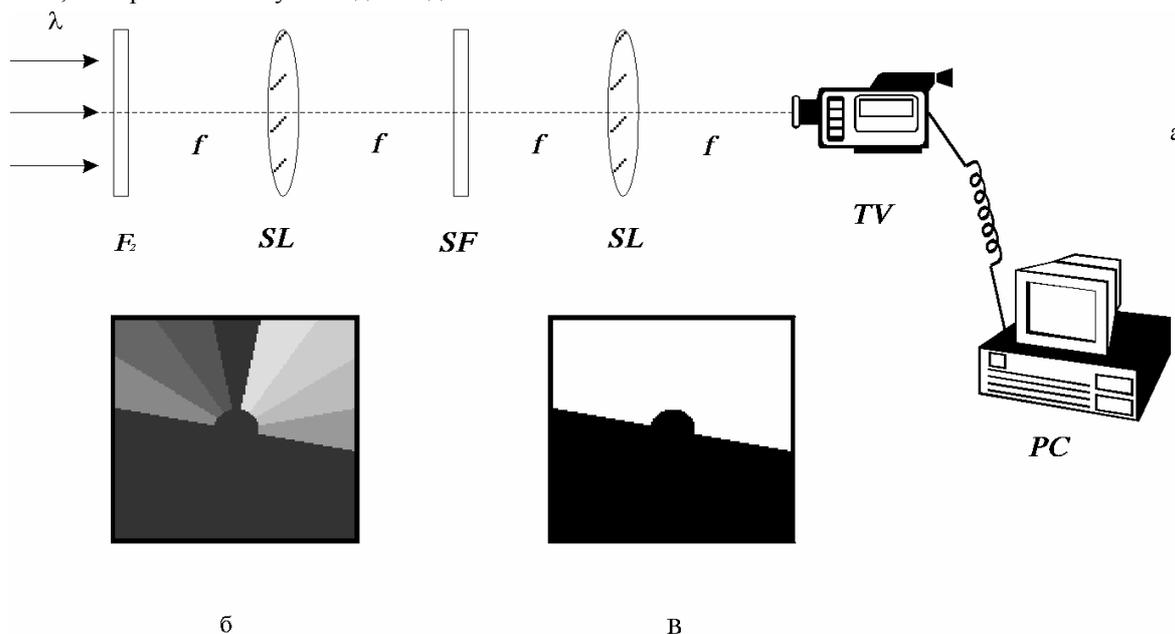


Рис.7 Оптическая схема Фурье-коррелятора (а) для построения поля направлений с секторным амплитудным пространственным фильтром(б) и амплитудным пространственным фильтром, который обрезает половину спектра (в).

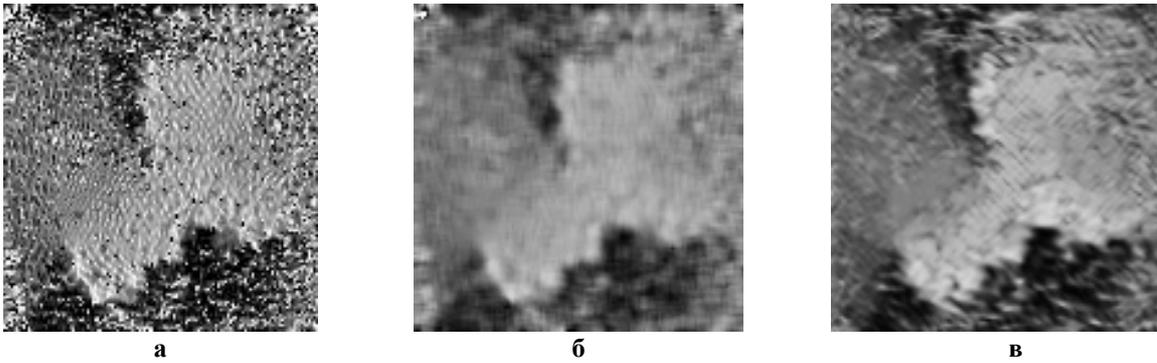


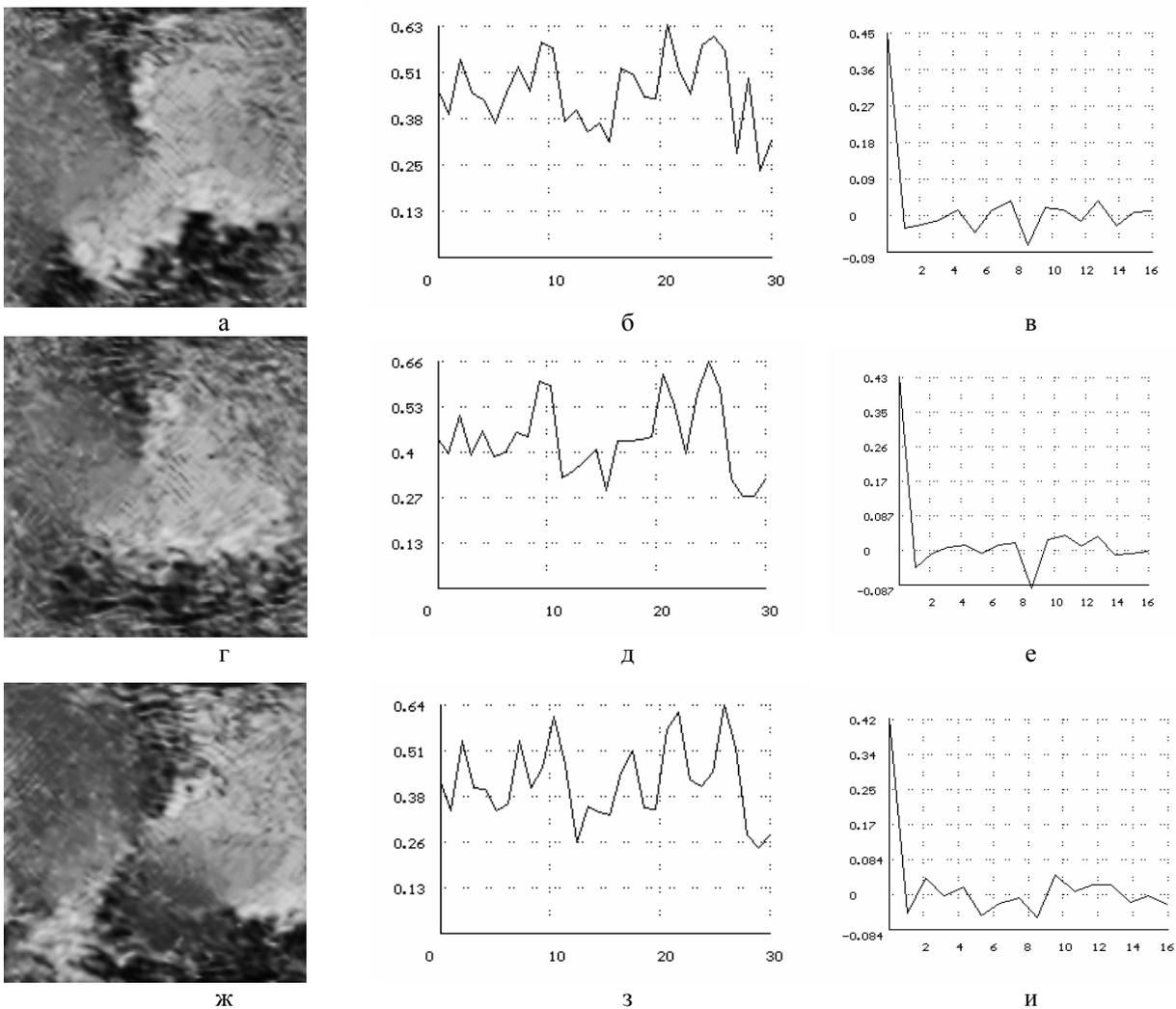
Рис.8 Поле направлений (а) полученное путем численного моделирования работы коррелятора изображенного на рис.7а, поле направлений (б) полученное путем численного моделирования работы коррелятора изображенного на рис.7а и обработанное медианным фильтром и поле направлений (в) рассчитанное на компьютере по формуле (4).

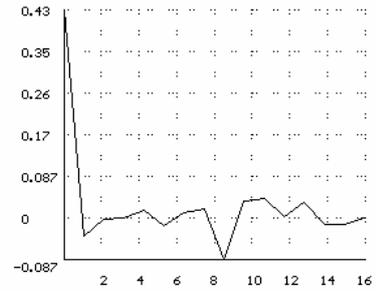
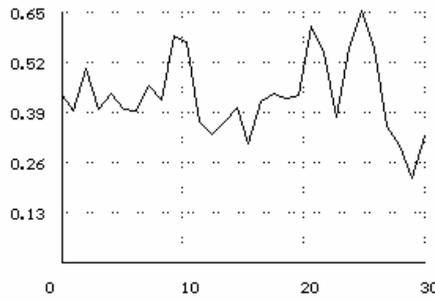
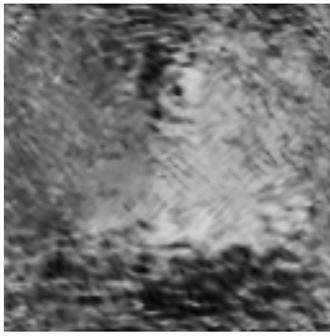
2.2 Вычисление векторов признаков.

На рис.9а,г,ж,к показаны поля направлений (128×128 пикселей) рассчитанные на компьютере по методике, описанной выше.

Эти поля направлений получены для изображений отпечатков пальцев, показанных на рис.2а,г,ж,к, соответственно. Вектор признаков из 30 усредненных компонент формировался следующим

образом. Изображения на рис.9а,г,ж,к разбивались на квадратные участки как показано на рис.10 и внутри этих участков определялось среднее значение интенсивности, которое характеризует средний угол наклона несущей в данной области у отпечатка пальца. На рис.9б,д,з,л показаны вектора признаков из 30 компонент, соответствующие полям направлений на рис. 9а,г,ж,к.





К

Л

М

Рис. 9. Поля направлений (*а,г,ж,к*), рассчитанные по формуле (4) для отпечатков пальцев на рис.2*а,г,ж,к*; их вектора признаков из 30 “усредненных” компонент (*б,д,з,л*) и вектора признаков из 16 первых коэффициентов разложения Адамара (*в,е,и,м*).

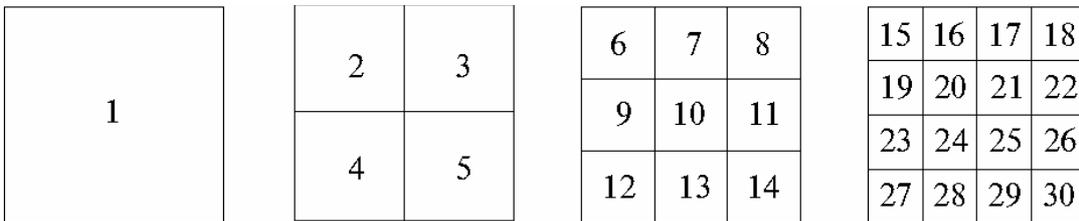


Рис.10. Схема квадратных окон, по которым проводилось усреднение при получении вектора из 30 “усредненных” компонент.

Таблица 3. Расстояния между векторами признаков из 30 “усредненных” компонент для полей направлений, построенных по 10 базовым $\{b_n\}$ и 10 анализируемым $\{a_n\}$ отпечаткам 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	2.54	6.55	4.94	4.55	5.71	6.51	4.03	5.49	6.04	7.00	0.59
a_2	7.12	2.00	4.67	5.37	5.07	4.02	6.30	5.13	3.98	4.37	0.99
a_3	4.80	3.37	2.12	4.38	2.94	5.10	4.06	3.68	4.03	4.79	0.39
a_4	4.64	4.27	2.76	2.39	3.50	4.88	3.28	4.34	4.57	5.97	0.15
a_5	5.08	4.38	2.83	3.30	1.03	4.33	3.68	2.73	3.80	4.68	1.65
a_6	5.97	3.50	4.45	4.51	4.22	1.72	4.91	3.52	3.90	4.63	1.03
a_7	4.64	5.03	2.62	2.87	2.46	5.19	1.97	3.76	5.18	6.27	0.25
a_8	6.13	4.41	4.44	5.26	3.47	4.41	5.29	1.81	2.58	2.90	0.42
a_9	5.96	3.90	4.50	4.98	4.57	4.86	5.42	3.60	1.81	2.78	0.54
a_{10}	6.65	4.29	5.62	6.13	5.34	4.99	6.47	4.14	2.23	1.71	0.30
R	0.83	0.68	0.24	0.20	1.39	1.34	0.66	0.51	0.23	0.63	0.65

В таблице 3 приведены расстояния между векторами признаков, рассчитанные по формуле (2), для полей направлений, которые соответствуют тем же, что и раньше 10-ти базовым $\{b_n\}$ и 10-ти анализируемым $\{a_n\}$ отпечаткам 10-ти различных пальцев.

Из таблицы 3 видно, что имеет место полная идентификация, так как в каждой строке матрицы чисел минимальное число стоит на диагонали. И величина средней надежности идентификации $\langle R \rangle = 0.65$ в 2.4 раза больше, чем аналогичная величина в указанных выше методах идентификации по пространственному спектру (см.Табл. 1 и 2).

Заметим, что если у векторов признаков из 30 “усредненных” компонент оставить только последние 16 компонент, то есть использовать для усреднения схему окон, показанную на рис.11, то результаты идентификации почти не изменяются результаты этого эксперимента приведены в таблице 4.

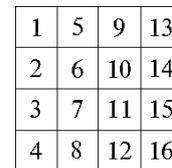


Рис.11. Схема квадратных окон, по которым проводится усреднение при получении вектора из 16 “усредненных” компонент.

Из таблицы 4 видно, что имеет место полная идентификация. Несмотря на то, что вектор признаков имеет только 16 компонент, величина $\langle R \rangle$, характеризующая надежность метода, уменьшилась несущественно: $\langle R \rangle = 0.64$ (по сравнению с той же величиной, которая для таблицы 3 составляет 0.65).

Заметим также, что если использовать для распознавания тех же отпечатков пальцев поля направлений, полученные с помощью упрощенной оптиче-

ской схемы, показанной на рис. 7а, и вектор признаков из 16 "усредненных" компонент формировать с помощью схемы окон на рис. 11, то результаты ухудшаются, но остаются лучше, чем при анализе Фурье-спектра с вектором признаков из 64 компонент. Результаты этого эксперимента даны в таблице 5.

Полная идентификация имеет место и в этом случае, но из-за наличия мелкомасштабной структуры в

полях направлений, надежность распознавания ухудшилась. Величина $\langle R \rangle$ составляет теперь только 0.43.

Надежность распознавания по этим полям направлений можно улучшить, если обработать исходные поля направлений медианным фильтром. Вектор признаков из 16 "усредненных" компонент формируется также с помощью схемы окон на рис. 11. Результаты этого эксперимента даны в таблице 6.

Таблица 4. Расстояния между векторами признаков из 16 "усредненных" компонент для полей направлений, построенных по 10 базовым $\{b_n\}$ и 10 анализируемым $\{a_n\}$ отпечаткам 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	2.05	5.18	3.89	3.53	4.43	5.03	3.20	4.05	4.57	5.36	0.56
a_2	5.35	1.59	3.81	4.08	4.01	3.18	4.86	4.05	2.96	3.27	0.86
a_3	3.48	2.84	1.83	3.28	2.42	4.26	3.30	3.06	3.07	3.72	0.32
a_4	3.33	3.54	2.36	1.83	2.72	3.91	2.64	3.26	3.50	4.56	0.29
a_5	3.77	3.81	2.47	2.54	0.83	3.66	3.03	2.38	3.28	3.88	1.87
a_6	4.70	3.10	3.94	3.69	3.62	1.39	4.00	2.89	3.14	3.73	1.08
a_7	3.57	4.22	2.40	2.25	1.89	4.21	1.69	2.93	4.24	5.01	0.12
a_8	4.38	3.70	3.62	3.77	2.84	3.41	3.91	1.41	2.12	2.44	0.50
a_9	4.44	3.13	3.83	3.87	3.92	3.85	4.34	3.10	1.44	2.10	0.46
a_{10}	5.10	3.41	4.65	4.76	4.47	4.06	5.10	3.58	1.75	1.43	0.22
R	0.62	0.79	0.29	0.23	1.28	1.45	0.56	0.69	0.21	0.47	0.64

Таблица 5. Расстояния между векторами признаков из 16 "усредненных" компонент для полей направлений, полученных упрощенным методом по схеме на рис. 7а, и построенных по 10 базовым $\{b_n\}$ и 10 анализируемым $\{a_n\}$ отпечаткам 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	0.64	1.84	1.30	1.25	1.50	1.35	1.04	1.13	1.39	1.40	0.62
a_2	1.76	0.50	1.15	1.21	1.07	1.32	1.43	1.39	1.10	1.23	1.14
a_3	1.17	1.05	0.65	0.98	0.90	1.28	0.90	0.84	0.85	0.99	0.28
a_4	0.94	1.19	0.66	0.59	0.78	1.24	0.71	0.96	1.04	1.25	0.11
a_5	1.34	1.28	0.92	0.89	0.43	1.17	1.11	1.06	1.16	1.33	1.07
a_6	1.56	1.05	1.24	1.31	1.12	0.64	1.38	1.05	1.04	1.08	0.62
a_7	1.26	1.34	0.81	0.79	0.63	1.35	0.52	0.96	1.31	1.48	0.21
a_8	1.20	1.22	0.93	0.88	0.87	1.12	0.94	0.50	0.591	0.74	0.18
a_9	1.47	0.86	1.05	0.99	1.15	1.20	1.23	1.04	0.59	0.74	0.26
a_{10}	1.55	1.13	1.29	1.31	1.40	1.30	1.46	1.10	0.61	0.57	0.06
R	0.45	0.72	0.01	0.32	0.46	0.75	0.35	0.67	0.002	0.28	0.43

Таблица 6. Расстояния между векторами признаков из 16 "усредненных" компонент для фильтрованных полей направлений, полученных упрощенным методом по схеме на рис. 7а, и построенных по 10 базовым $\{b_n\}$ и 10 анализируемым $\{a_n\}$ отпечаткам 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	1.40	3.85	2.93	2.54	3.26	3.39	2.29	2.82	3.21	3.63	0.63
a_2	4.00	1.21	2.80	2.96	2.72	2.65	3.65	3.05	2.33	2.58	0.93
a_3	2.62	2.19	1.57	2.52	2.05	3.24	2.56	2.29	2.22	2.64	0.30
a_4	2.33	2.51	1.66	1.39	1.87	2.82	2.03	2.36	2.53	3.29	0.19
a_5	2.73	2.82	1.93	1.76	0.74	2.52	2.20	1.87	2.44	2.96	1.40
a_6	3.36	2.29	2.82	2.64	2.40	1.18	2.94	2.07	2.48	2.74	0.75
a_7	2.59	3.10	1.75	1.54	1.50	3.06	1.12	2.13	3.06	3.67	0.33
a_8	2.96	2.73	2.54	2.56	2.05	2.46	2.66	1.02	1.54	1.73	0.51
a_9	3.19	2.17	2.64	2.56	2.74	2.87	3.07	2.29	1.22	1.62	0.33
a_{10}	3.71	2.56	3.34	3.33	3.22	3.07	3.69	2.57	1.28	0.98	0.31
R	0.66	0.80	0.05	0.10	1.00	1.10	0.81	0.83	0.05	0.66	0.59

Имеет место полная идентификация, надежность распознавания улучшилась. Величина $\langle R \rangle$ составляет теперь 0.59.

2.3 Разложение поля направлений по ортогональным базисам.

Рассмотрим ниже как влияет на процесс идентификации дактилограмм способ построения векторов признаков для полей направлений. Будем формировать вектор признаков с помощью коэффициентов разложения полей направлений по ортогональному базису. Для разложения полей направлений в настоящей работе используются базисы Адамара и Фурье.

Так, на рис.9в,е,и,м показаны вектора признаков, соответствующие полям направлений на рис.9а,г,ж,к, из 16 первых коэффициентов разложения по базису Адамара [6,7]:

$$had_m(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \prod_{k=0}^{\infty} [rad_{k+1}(t)]^{m_k}, \quad (7)$$

Таблица 7. Расстояния между векторами признаков из 16 коэффициентов разложения по ортогональному базису Адамара для полей направлений, построенных по 10 базовым $\{b_n\}$ и 10 анализируемым $\{a_n\}$ отпечаткам 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	5.13	13.00	9.73	8.83	11.07	12.56	7.99	10.12	11.42	13.39	0.56
a_2	13.37	3.97	9.52	10.20	10.03	7.96	12.14	10.13	7.39	8.17	0.86
a_3	8.70	7.09	4.56	8.21	6.05	10.65	8.24	7.64	7.66	9.29	0.33
a_4	8.31	8.84	5.90	4.58	6.79	9.78	6.61	8.16	8.75	11.41	0.29
a_5	9.42	9.53	6.18	6.36	2.07	9.15	7.58	5.94	8.21	9.71	1.87
a_6	11.74	7.76	9.86	9.22	9.03	3.47	10.01	7.23	7.84	9.32	1.08
a_7	8.92	10.54	5.99	5.64	4.71	10.52	4.22	7.34	10.61	12.52	0.12
a_8	10.94	9.25	9.04	9.42	7.09	8.53	9.78	3.52	5.31	6.10	0.51
a_9	11.11	7.82	9.56	9.69	9.80	9.63	10.85	7.75	3.60	5.25	0.46
a_{10}	12.74	8.52	11.63	11.90	11.17	10.15	12.74	8.94	4.36	3.58	0.22
R	0.62	0.79	0.29	0.23	1.27	1.29	0.57	0.69	0.21	0.47	0.64

Из сравнения таблиц 4 и 7 видно, что хотя числовые значения расстояний в этих таблицах отличаются друг от друга в несколько раз, значения показателя надежности распознавания (последний столбец и последняя строка таблиц) почти совпадают.

В таблице 8 приведены результаты идентификации с помощью векторов признаков, построенных с помощью первых 16 коэффициентов разложения полей направлений по базису Фурье:

$$f_m = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{A}} \cos\left(\frac{m}{2} \cdot \frac{\pi n \Delta t}{A}\right), m = 0, 2, 4, \dots \\ \frac{1}{\sqrt{A}} \sin\left(\frac{m+1}{2} \cdot \frac{\pi n \Delta t}{A}\right), m = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \quad (11)$$

Двумерные базисные функции определяются как произведение одномерных:

где m_k^Γ - k-й разряд кода Грея номера m , $rad_m(t)$ - функции Радемахера. Код Грея образуется из двойного номера m по следующему правилу:

$$m_k^\Gamma = m_k \oplus m_{k+1}, \quad (8)$$

где k - номер двоичного разряда (справа налево); m_k - двоичный разряд в двоичной записи номера m :

$$m = \sum_{k=0}^{\infty} m_k 2^k, \text{ а знак } \oplus \text{ означает сложение по модулю}$$

2. Функции Радемахера определяются следующим образом:

$$rad_m(t) = \text{sign}[\sin(2^m \pi t / T)]. \quad (9)$$

Двумерные функции Адамара определяются как произведение одномерных:

$$had_{mn}(t_1, t_2) = had_m(t_1) had_n(t_2), \quad (10)$$

В этом случае полная идентификация, как видно из Таблицы 7 также достигается с хорошей надежностью ($R = 0.64$).

$$f_{mn}(t_1, t_2) = f_m(t_1) f_n(t_2). \quad (12)$$

Как видно из таблицы 8, нет полной идентификации отпечатков (смотри третий столбец), и величина $\langle R \rangle$ меньше ($\langle R \rangle = 0.52$), чем аналогичная величина при распознавании по коэффициентам разложения в базисе Адамара ($\langle R \rangle = 0.64$). В данном случае базис Адамара является более эффективным.

Общее сравнение надежности всех рассмотренных методов приведено в таблице 9.

Из таблицы 9 видно, что при идентификации отпечатков пальцев с помощью оптикоцифровых методов, использование полей направлений предпочтительнее, чем использование пространственного спектра для построения векторов признаков.

Таблица 8. Расстояния между векторами признаков из 16 коэффициентов разложения по ортогональному базису Фурье для полей направлений, построенных по 10 базовым $\{b_n\}$ и 10 анализируемым $\{a_n\}$ 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	3.85	9.70	7.65	6.28	7.83	8.70	5.89	7.26	7.77	8.82	0.53
a_2	9.90	2.58	6.29	7.80	7.20	5.40	8.72	7.32	5.43	5.51	1.09
a_3	7.43	5.08	4.04	7.89	5.21	8.09	7.06	6.44	5.95	5.78	0.26
a_4	6.34	6.51	4.45	3.97	5.06	6.41	4.43	6.03	5.58	7.08	0.12
a_5	6.96	6.67	3.92	4.83	1.85	6.22	4.55	3.91	4.68	6.12	1.11
a_6	8.45	5.53	6.56	6.13	6.12	2.84	6.74	4.95	4.65	5.77	0.64
a_7	5.98	7.08	3.99	4.03	3.74	6.99	2.88	4.80	5.72	6.99	0.30
a_8	8.17	6.28	6.27	7.67	4.37	6.15	7.28	2.61	3.50	3.70	0.34
a_9	8.28	5.75	6.36	7.00	5.69	6.60	7.21	5.21	2.62	3.00	0.14
a_{10}	8.85	5.69	7.47	8.43	6.92	6.78	8.56	5.81	3.48	2.10	0.66
R	0.55	0.97	-0.03	0.01	1.02	0.90	0.54	0.50	0.33	0.43	0.52

Таблица 9. Значения показателя надежности для различных методов идентификации.

Метод обработки изображения	Метод набора вектора признаков	$\langle R \rangle$
Пространственный спектр	Средняя амплитуда в угловых секторах и полукольцах	0.27
	Средняя амплитуда в угловых секторах	0.25
Многоканальное поле направлений	Средняя амплитуда в 30 окнах	0.65
	Средняя амплитуда в 16 окнах	0.64
	16 коэффициентов разложения по базису Адамара	0.64
	16 коэффициентов разложения по базису Фурье	0.52
Одноканальное поле направлений	Средняя амплитуда в 16 окнах	0.43
Одноканальное отфильтрованное поле направлений	Средняя амплитуда в 16 окнах	0.59

Заключение

В данной работе предложены оптико-цифровые методы для идентификации отпечатков пальцев. Идентификация основана на сравнении векторов признаков небольшой размерности полученных с помощью полей направлений для каждого отпечатка. Произведено сравнение предложенной методики с известной, в которой вектор признаков строился на основе пространственного спектра отпечатка. Показано преимущество методов идентификации с помощью поля направлений.

Литература

- [1] D.H. McMahon, G.L. Johnson, S.L. Teeter, C.G. Whitheg. A hybrid optical computer processing technique for fingerprint identification. IEEE Trans. Comput. v.C-24, No.5, p.358-368 (1975).
- [2] F.T. Gamble, L.M. Frye, D.R. Grieser. Real time fingerprint verification system. Applied Optics, v.31, No.5, p.652-655 (1992).
- [3] Z. Chen, Y. Sun, Y. Zhang, G. Mu "Hybrid. optical/digital access control using fingerprint identification". Optical Engineering, v.34, No.3, p.834-839 (1995).
- [4] S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, T.P. Dvoryanova. Optical-digital method for detecting distortions in microcrystal structure of tear crystallogramm. Proceedings of SPIE, "Interneshonel Workshop on Image Processing and Computer Optics". v.2363, p.249-255 (1994).
- [5] V.A. Soifer, S.N. Khonina. Stability of the Karhunen-Loeve expansion in the problem of pattern recognition. Pattern Recognition and Image Analysis, v.4, No.2, p.135-145 (1994) .
- [6] W.K. Pratt. Digital image processing. Wiley - Interscience publication. New York. 1978.
- [7] Л.П. Ярославский. Введение в цифровую обработку изображений.-М.:Сов. радио,1979.

Optical-digital methods of fingerprint identification

V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, R.V. Skidanov

Abstract

In this paper we consider optical-digital systems for identifying fingerprints by the spatial spectrum and by the directional field. We suggest an optical scheme of a coherent correlator with a spatial filter consisting of segmented diffraction gratings for the design of the directional field. We show that the analysis by the directional field is more preferable. We also show that in the analysis of fingerprints by the Fourier spectrum, only the information on the angular distribution of the spectrum is significant, and the data on the radial spectrum allocation are redundant.

Citation: Soifer VA, Kotlyar VV, Khonina SN, Skidanov RV. Optical-digital methods of fingerprint identification. Computer Optics 1996; 16: 78-89.

References

- [1] McMahon DH, Johnson GL, Teeter SL, Whitheg CG. A hybrid optical computer processing technique for fingerprint identification. IEEE Trans. Comput.; 1975; C-24(5): 358-368.
- [2] Gamble FT, Frye LM, Grieser DR. Real time fingerprint verification system. Applied Optics; 1992; 31 (5); 652-655.
- [3] Chen Z, Sun Y, Zhang Y, Mu G. Hybrid. optical/digital access control using fingerprint identification. Optical Engineering; 1995; 34(3); 834-839.
- [4] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Dvoryanova TP. Optical-digital method for detecting distortions in microcrystal structure of tear crystallogramm. Proceedings of SPIE; International Workshop on Image Processing and Computer Optics; 1994; 2363: 249-255.
- [5] Soifer VA, Khonina SN. Stability of the Karhunen-Loeve expansion in the problem of pattern recognition. Pattern Recognition and Image Analysis; 1994; 4(2): 135-145.
- [6] Pratt WK. Digital image processing. New York: Wiley - Interscience publication; 1978.
- [7] Yaroslavsky LP. An introduction to digital picture processing; Moscow: Sov. Radio Publisher; 1979.