

В. Ю. Гудков

## МЕТОД ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЙ ЛИНИЙ ДАКТИЛОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*Предложен метод распознавания направлений линий на изображении отпечатка пальца. Направления линий находятся по конечным вершинам простой цепи и снабжаются достоверностью. Пути цепей определяются границами линий. Поиск простых параллельных цепей в окрестностях одноименных границ различных линий обеспечивает фильтрацию помех.*

**E-mail:** diana@sonda.ru

**Ключевые слова:** отпечаток пальца, параллельные цепи, направления линий на изображении отпечатка пальца, отклонение от нуля.

Многие методы обработки изображений отпечатков пальцев основаны на градиентных методах, методах тензорного анализа и фильтрации изображений [1, 2]. Применение классических методов для распознавания таких изображений, как правило, неэффективно. Комплексное решение проблем требует создания специальных технологий, в рамках которых характер и уникальные особенности пространственной и топологической структуры изображений могут быть учтены наиболее оптимально [3].

Узор изображения отпечатка пальца представляет собой почти параллельные линии темного цвета, которые оканчиваются или начинаются, соединяются или расщепляются. Продольные границы линий содержат многочисленные микронеровности, а на линиях наблюдаются случайно расположенные микроразрывы, иногда образующие длинные светлые складки [3]. Микроразрывы, микронеровности, межпапиллярные линии, случайные микродетали, поры и загрязнения вносят сильные искажения при автоматическом определении направления линий на изображении отпечатка пальца [4, 5].

**Концепция обработки изображения.** Математическое описание изображения представляют в виде функции

$$F = \left\{ f(x, y) \in (0...2)^b - 1 \mid (x, y) \in X \times Y \right\},$$

где  $b$  – глубина изображения;  $X = (0...x_0) - 1$ ;  $Y = (0...y_0) - 1$ . Мощность области определения изображения  $|G| = x_0 y_0$  [4]. Согласно принципу иерархической сегментации [1, 6], изображение

отпечатка пальца разбивают на  $|G_h| = x_h y_h$  квадратных сегментов  $S_h(x, y) \in X \times Y$  с длиной стороны  $2^h$  точек и центрами  $(u, v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h$ . Вершины сегментов записывают в виде функции  $F_h = \{f_h(x, y) \in (0 \dots 2)^b - 1 \mid (x, y) \in X_h \times Y_h\}$ ,  $X_h = (0 \dots x_h) - 1$  и  $Y_h = (0 \dots y_h) - 1$ , с центрами

$$\begin{aligned} \hat{X}_h &= \{2^{h-1} + x2^h \mid x \in X_h\}; \\ \hat{Y}_h &= \{2^{h-1} + y2^h \mid y \in Y_h\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $h \in 0 \dots n$  – уровень иерархии, к которой относятся сегменты;  $n$  – высший уровень иерархии;  $x_h = \lceil x_0 / 2^h \rceil$ ,  $y_h = \lceil y_0 / 2^h \rceil$  – размеры области определения  $h$ -й иерархии; символы  $\lfloor \cdot \rfloor$  и  $\lceil \cdot \rceil$  обозначают целую часть и наименьшее целое число, превышающее вещественную величину. Объединение всех сегментов уровня иерархии  $h$  есть  $S_h$ . Доступ к данным  $h$ -го уровня иерархии  $l$ -го слоя:

$$F_h^{(l)} = \{f_h^{(l)}(x, y) \mid (x, y) \in X_h \times Y_h\} = \{f(x, y)\} = F.$$

Классификационный анализ изображения отпечатка пальца имеет многослойную иерархическую организацию, а доступ к точкам сегмента  $S_{h,k}(x, y)$  при  $h > k$  в координатах  $(u, v) \in \bar{X}_{h,k} \times \bar{Y}_{h,k}$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{X}_{h,k} &= \{u + x2^{h-k} \mid x \in X_h \wedge u \in (0 \dots 2)^{h-k} - 1\}; \\ \bar{Y}_{h,k} &= \{v + y2^{h-k} \mid y \in Y_h \wedge v \in (0 \dots 2)^{h-k} - 1\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для упрощения изложения материала вводят формальный аппарат с прямолинейной щелевой апертурой  $A_h(x, y, \alpha, w)$  и точечной апертурой  $A_h^\circ(x, y, \alpha, w)$  (множества точек слоя данных  $h$ -го уровня иерархии и связанными с ними углами), которые определяются по формулам:

$$\begin{aligned} A_h(x, y, \alpha, w) &= \{(u, v, \beta) = (x + ]t \cos \alpha[, y + ]t \sin \alpha[, \beta) \mid t \in Z_w\}; \\ A_h^\circ(x, y, \alpha, w) &= \{(u, v, \beta) = (x + ]t \cos \alpha[, y + ]t \sin \alpha[, \beta) \mid t \in Z_w^\circ\}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$A_h(x, y, w) = \bigcup_{\alpha \in Z^*} A_h(x, y, \alpha, w); \quad (4)$$

$$A_h(x, y, \alpha, \beta, w) = \bigcup_{\varphi \in \alpha \dots \beta} A_h(x, y, \varphi, w),$$

где  $(x, y) \in X_h \times Y_h$  – центр апертуры;  $(u, v) \in X_h \times Y_h$  – точка апертуры;  $w$  – размер апертуры;  $Z_w = 1 \dots w$ ,  $Z_w^\circ = \{w\}$ ,  $Z^* = [0, 2\pi)$ ;  $\alpha$  – направление апертуры;  $\beta$  – угол, определяющий направление из центра  $(x, y)$  в точку  $(u, v)$  апертуры,  $\beta = \lceil \arctg((v-y)/(u-x)) \rceil$ ; скобки  $\lceil \cdot \rceil$  обозначают ближайшее к вещественной величине целое число. Апертуры есть множества троек  $(u, v, \beta)$ . Для сегмента  $d \pm \pi/4$  относительно направления  $d \in 0 \dots 7$  на основе (4) находят апертуру

$$A_h^d(x, y, w) = A_h(x, y, (d+1)(\pi/4), (d-1)(\pi/4), w). \quad (5)$$

Формализм движения вводят отношением порядка

$$R = \{(x_d, y_d)\} =$$

$$= \{(1, 0), (1, 1), (0, 1), (-1, 1), (-1, 0), (-1, -1), (0, -1), (1, -1)\}$$

по направлению  $d \in 0 \dots 7$ . Элемент  $(1, 0)$  для  $d = 0$  минимален. Отношение (5) определяет функцию перехода  $T_h^d(x, y)$  в  $h$ -м уровне иерархии, задающей в слое синхронный переход по множеству точек или по одной точке в виде

$$T_h^d(\{(x, y)\}) = \{(a, b) = (x + x_d, y + y_d) \mid (a, b) \in X_h \times Y_h\}. \quad (6)$$

Например,  $(u, v) = T_h^0(T_h^1(T_h^1(T_h^0(T_h^7(T_h^0(x, y) \dots))))))$ .

**Коррекция изображения.** В предварительной обработке обычно выполняют нормализацию изображения отпечатка пальца [3]. Эта операция опасна, так как позволяет получить решение вначале обработки изображения, но, как правило, полезна [7]. Функция коррекции изображения  $F_0^{(0)} = \{f_0^{(0)}(x, y)\} = \{f(x, y)\}$  обеспечивает полный динамический диапазон значений яркостей, определяемых по формуле

$$f_0^{(1)}(x, y) = \frac{(f_0^{(0)}(x, y) - f_{\min})(2^b - 1)}{f_{\max} - f_{\min}},$$

где  $f_{\min} = \arg\{p(j) | p(j) < k_l \wedge p(j+1) \geq k_l\}$ ;  $f_{\max} = \arg\{p(j) | p(j) \leq k_r \wedge$

$\wedge p(j+1) > k_r\}$ ;  $p(j)$  – оценка гистограммы  $B(i) = \sum_{(x,y) \in X \times Y} \nabla f_0^{(0)}(x, y)$

при  $i \equiv j$   $f_0^{(0)}(x, y)$  [ для модуля градиента  $\nabla f$  (оператор Собела),

$$p(j) = \sum_{i=0}^j \frac{B(i)}{w}.$$

Здесь  $w$  – вес гистограммы;  $k_l, k_r$  – коэффициенты для оценки доли гистограммы слева и справа, выбираемые в процессе обучения алгоритма по минимуму ошибки распознавания изображения;  $j \in (0 \dots 2)^b - 1$ . Расчет значений  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$  можно выполнить с использованием гистограммы яркостей  $f_0^{(0)}(x, y)$  [1, 6]. Однако рассмотренный вариант лучше, поскольку учитывает и яркость точек изображения, и модуль градиента  $\nabla f$ .

**Сглаживание изображения.** В большинстве приложений для обработки изображений этот шаг предварительной обработки выполняют с помощью фильтра Гаусса [1, 2]. Однако более высоким качеством обладают фильтры, основанные на порядковых статистиках [3, 6]. В таком случае в окрестности свертки собирают набор яркостей точек в виде

$$\Xi_0^{(1)}(x, y) = \{\xi_0^{(1)}(u, v)\} = \{f_0^{(1)}(u, v) | (u, v) \in A_0(x, y, 1) \vee (x, y)\},$$

где  $A_0(x, y, 1)$  – круговая апертура, вычисленная при  $h = 0, w = 1$  по (4). Набор из девяти элементов, применяя формулу

$$\Xi_0^{(1)}(x, y) = \underset{\leq}{\text{sort}}\{\xi_0^{(1)}(u, v)\}.$$

Для набора находят одномерную свертку [1, 4]

$$f_0^{(2)}(x, y) = \mathbf{H} * \Xi_0^{(1)}(x, y),$$

где  $\mathbf{H} = [1, 1, 2, 2, 4, 2, 2, 1, 1]$  – ядро свертки; за норму принимают скаляр  $\|\mathbf{H}\| = \sum_i h(i)$ . Операцию свертки осуществляют для

каждой точки слоя  $F_0^{(1)} = \{f_0^{(1)}(x, y)\}$ , а результаты объединяют в слой  $F_0^{(2)} = \{f_0^{(2)}(x, y)\}$  и записывают как

$$F_0^{(2)} = \mathbf{H} * \Xi_0^{(1)} = \Xi_0^{(1)} * \mathbf{H}, \quad (7)$$

где  $\Xi_0^{(1)} = \{\Xi_0^{(1)}(x, y) \mid (x, y) \in X \times Y\}$ .

Для краевых точек слоя вместо сглаживания выполняют простое копирование

$$\{f_0^{(2)}(x, y)\} = \{f_0^{(1)}(x, y) \mid x \in \{0, x_0 - 1\} \vee y \in \{0, y_0 - 1\}\}.$$

**Формирование слоев светотеней.** На основе сглаженного слоя  $F_0^{(2)} = \{f_0^{(2)}(x, y)\}$  рассчитывают слои светотеней  $F_0^{(d+3)} = \{f_0^{(d+3)}(x, y)\}$  по формуле двумерной свертки:

$$F_0^{(d+3)} = \mathbf{H}^d ** F_0^{(2)}, \quad (8)$$

где  $d \in D = 0 \dots 3$  – направление засветки изображения;  $\mathbf{H}^d$  – маски Собела,

$$\mathbf{H}^0 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H}^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H}^3 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix}.$$

Данные слоев  $F_0^{(d+3)}$  масштабируют с помощью функции

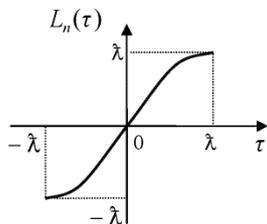
$$f_0^{(d+3)}(x, y) = L_n \left( \frac{\lambda}{\sigma} f_0^{(d+3)}(x, y) \right),$$

где  $\sigma = \max_{(x,y)} |f_0^{(d+3)}(x, y)|$ ;  $L_n(\cdot)$  – интерпо-

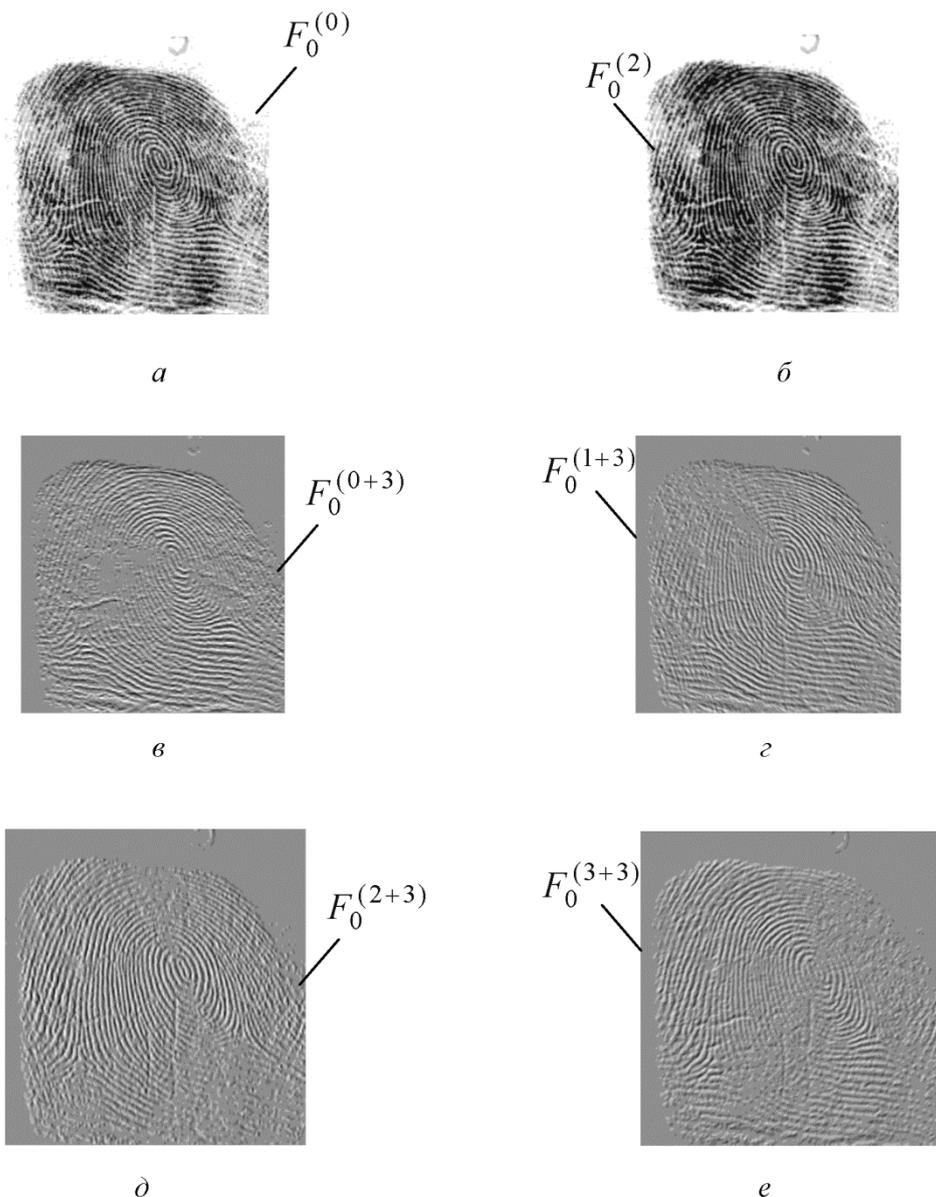
ляционный многочлен  $n$ -й

степени,  $L_n(0) \equiv 0$  (рис. 1);  $(x, y) \in X \times Y$ ;

$\lambda$  – масштаб по глубине изображения. Четыре слоя светотеней изображения отпечатка пальца приведены на рис. 2. Нулевая реакция окрашена серым цветом, положительные значения светлее, а отрицательные – темнее. Для краевых точек задают нулевые реакции.



**Рис. 1. Типичная кривая интерполяционного многочлена**



**Рис. 2.** Изображение отпечатка пальца (а, б) и четыре слоя светотеней изображения (в–е)

**Метод параллельных цепей для измерения направлений линий.** Оценку направлений линий на изображении отпечатка пальца выполняют по слоям параллельных светотеней  $F_0^{(d+3)}$  методом локального адаптивного параллельного сканирования каналов «тени» и «света». Выполняемая процедура для направления  $d \in D = 0 \dots 3$  реализует отображение

$$\Gamma : \{S_h^{(d+3)}\} \rightarrow \{\{\Delta_h^k\}, \{\Lambda_h^k\}\},$$

где  $S_h^{(d+3)} = \{S_h^{(d+3)}(u, v) \mid (u, v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h\}$  – множество сегментов с центрами, рассчитанными по (1), слоев  $F_0^{(d+3)}$ ;  $\Delta_h^k = [\delta_h^k(x, y)]$  – слои  $F_h$  как матрицы направлений на сегментах  $S_h$  с углами  $0 \leq \delta_h^k(x, y) < \pi$ ;  $\Lambda_h^k = [\lambda_h^k(x, y)]$  – слои как матрицы достоверностей  $\Lambda_h^k$  для матриц  $\Delta_h^k$ ;  $h$  – уровень иерархии;  $k \in \{0, 1, 2\}$  с метками (0 – канал «тени», 1 – канал «света», 2 – канал доминирующих направлений).

Для изображения с разрешением 500 пикселей/дюйм выбирают сегменты  $S_2$  (4×4). Расчет матриц осуществляет в шесть этапов. Первые четыре этапа реализуют измерения, пятый этап отображает результаты измерений в верхние эшелоны пирамиды  $\mathfrak{R}$ , шестой этап завершает отображение  $\Gamma$ .

**Первый этап.** Для каждого сегмента  $S_2$  и заданного направления  $d$  фиксируют четыре точки:

$$p_q^{lk} = (x_q^{lk}, y_q^{lk}) \in P^{lk};$$

$$p_q^{rk} = (x_q^{rk}, y_q^{rk}) \in P^{rk},$$

где  $q$  – длина цепи;  $k \in \{0, 1\}$  – метка каналов «тени» и «света»;  $l$  и  $r$  – метки левой и правой цепей;  $(x, y)$  – координаты;  $P$  – цепь. Цепи формируются в слоях  $F_0^{(d+3)}$  как выделенные отсчеты, которые отвечают последовательностям точек  $\{p_i = (x_i, y_i)\}$  в направлении  $s \in G = \{(d+1) \bmod 8, (d+2) \bmod 8, (d+3) \bmod 8\}$ , перпендикулярном направлению засветки  $d$ . Эти отсчеты соответствуют четырем простым цепям на точках изображения, как на вершинах графа. Две простые цепи для «тени» и две цепи для «света» из  $P^{lk}$  и  $P^{rk}$  задают независимо:

$$P^{lk} = \{p_i^{lk} = (x_i^{lk}, y_i^{lk}) \mid i \in 0 \dots q \wedge p_0^{lk} = p^l\};$$

$$P^{rk} = \{p_i^{rk} = (x_i^{rk}, y_i^{rk}) \mid i \in 0 \dots q \wedge p_0^{rk} = p^r\},$$
(9)

где  $p^l = (x^l, y^l)$  и  $p^r = (x^r, y^r)$  – две стартовые точки для левых и правых простых цепей (располагаются обычно в соседних сегментах). Они для сегментов  $S_h^{(d+3)}$  с центрами  $\{(u, v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h\}$ , вычис-

ленными по (1) при  $h = 2$ , определяются методом переноса точки  $(u, v)$  в направлениях  $d$  и  $\bar{d} = (d + 4) \bmod 8$  в апертуре (3):

$$\{(x^l, y^l)\} = \{A_0^\circ(u, v, 45d, t) \mid (u, v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h\};$$

$$\{(x^r, y^r)\} = \{A_0^\circ(u, v, 45\bar{d}, t) \mid (u, v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h\},$$

где  $t$  – расстояние, на которое переносится точка (в реализации  $t \in 4 \dots 7$ ).

Независимый синтез четырех простых цепей  $P^{lk}$  и  $P^{rk}$  выполняют как

$$f_0^{(d+3)}(x_i, y_i) = f_0^{(d+3)}(T_0^s(x_{i-1}, y_{i-1})), \quad (10)$$

где  $i > 0$ ;  $T_0^s(\cdot)$  – функция перехода (см. (6));  $s$  – направление движения функции перехода как результат выбора,  $s = \arg \operatorname{sel}(\max_{k \neq 0} (f_0^{(d+3)}(x_i, y_i)), \min_{s \in G} (f_0^{(d+3)}(x_i, y_i)))$ ,  $\operatorname{sel}(\cdot)$  – функция выбора левого аргумента, если критерий истинен, или выбора правого аргумента при ложности критерия.

Графы функций переходов показаны на рис. 3. Поскольку на этапе для каждого сегмента и направления  $d$  фиксируются четыре точки, то их точность существенна. Поэтому значение  $q$  настраивают. Для диагональных направлений  $q = ]0, 707q[$ .

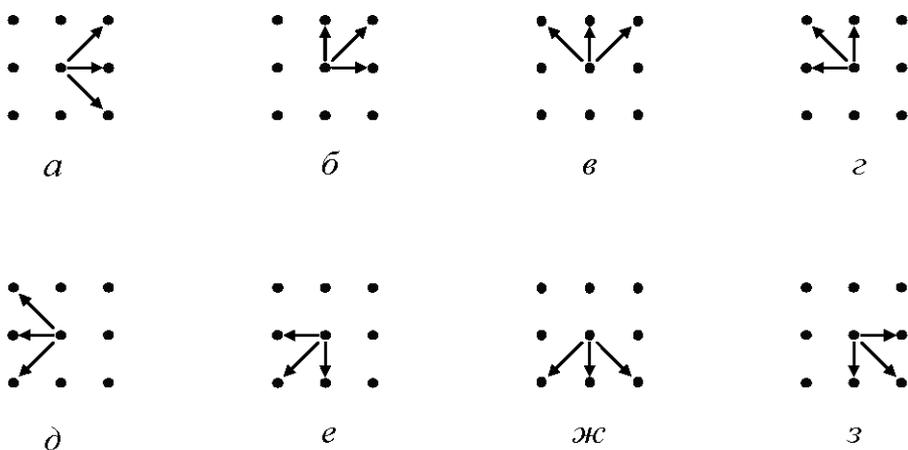


Рис. 3. Графы функций переходов  $T^d$  множества  $G$  для направлений  $d \in D$  при  $d \equiv 0$  (а), 1 (б), 2 (в), 3 (г), 4 (д), 5 (е), 6 (ж), 7 (з)

Перемещением точек  $p^l$  и  $p^r$  повышают точность измерения: шаг в направлении  $d$ , два шага в направлении  $\bar{d}$ , шаг в направлении  $d$  (см. (10)). При этом точки  $p^l$  и  $p^r$  расщепляются и образуются четыре стартовые точки для синтеза четырех независимых простых цепей в виде (9).

**Второй этап.** На сегментах  $S_2$  измеряют параллельные цепи. Задают два множества  $P^k = \{p^{lk}, p^{rk}\} = \{p_q^{lk}, p_q^{rk}\}$ ,  $k \in \{0, 1\}$ . Каждое множество содержит две точки для канала «тени» или две точки для канала «света». Расчет сводится к выделению в слоях  $F_0^{(d+3)}$  отсчетов, соответствующих последовательностям точек  $\{p_i = (x_i, y_i)\}$  в направлении:

$$s \in \bar{G} = \{(d+5) \bmod 8, (d+6) \bmod 8, (d+7) \bmod 8\}.$$

По направлениям множество  $\bar{G}$  зеркально множеству  $G$ . Выделенные точки формируют две простые параллельные цепи для канала «тени» и две простые параллельные цепи для канала «света» с одной и той же функцией перехода на каждом шаге:

$$\begin{aligned} \bar{P}^{lk} &= \{p_i^{lk} = (x_i^{lk}, y_i^{lk}) \mid i \in q \dots 3q\}; \\ \bar{P}^{rk} &= \{p_i^{rk} = (x_i^{rk}, y_i^{rk}) \mid i \in q \dots 3q\}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $k \in \{0, 1\}$ ;  $q \dots 3q$  – длина цепи;  $l$  и  $r$  – метки левой и правой цепей. Синтез двух копий простых параллельных цепей определяют условием

$$f_0^{(d+3)}(x_i, y_i) = f_0^{(d+3)}(T_0^s(x_{i-1}, y_{i-1})), \quad (12)$$

где  $(x_q, y_q) \in P^k$  – координаты начала цепей;  $s$  – направление движения для функции перехода как аргумент

$$s = \arg \psi_{\bar{G}}^k(f_0^{(d+3)}(x_i^l, y_i^l), f_0^{(d+3)}(x_i^r, y_i^r))$$

с функцией предварительного исследования пути на каждом шаге движения [4]

$$\psi_{\bar{G}}^k(a, b) = \operatorname{sel}(\max_{k \neq 0} \min_{s \in \bar{G}}(a, b), \min_{s \in \bar{G}} \max(a, b)).$$

Для определения направлений каналов «тени» и «света» на сегменте  $S_h^{(d+3)}(u, v)$  по (10) используют пары точек  $(p_q^{lk}, p_{3q}^{lk})$  или  $(p_q^{rk}, p_{3q}^{rk})$  ну-

левого уровня иерархии. Связанные с ними направления  $\delta_h^{(dk)}(x, y) \in F_2$  для заданного направления  $d$  определяют по одной из формул:

$$\delta_h^{(dk)}(x, y) = \arctg((y_q^{lk} - y_{3q}^{lk}) / (x_q^{lk} - x_{3q}^{lk}));$$

$$\delta_h^{(dk)}(x, y) = \arctg((y_q^{rk} - y_{3q}^{rk}) / (x_q^{rk} - x_{3q}^{rk})).$$

Выбор точек из цепей  $\bar{P}^{lk}$  или  $\bar{P}^{rk}$  незначим, так как цепи в канале  $k$  параллельны. Достоверностью решения являются величины

$$\lambda_h^{(dk)}(x, y) = \frac{1}{q} \left| \sum_{i=q}^{3q} \psi^k(f_0^{(d+3)}(x_i^{lk}, y_i^{lk}), f_0^{(d+3)}(x_i^{rk}, y_i^{rk})) \right|,$$

собираемые в слоях данных, где точки  $f_0^{(d+3)}(x_i, y_i)$  находятся по (12). Функция выбора точек из параллельных цепей

$$\psi^k(a, b) = \underset{k \neq 0}{\text{sel}}(\min(a, b), \max(a, b))$$

позволяет на каждом шаге рассчитывать значения, наименее отклоняющиеся от нуля.

Из двух параллельных цепей выбирают одну и определяют направление. Достоверность решения  $\lambda_h^{(dk)}$  оценивается значениями, накапливаемыми при синтезе цепей и наименее отклоняющимися от нуля. Сглаживание изображения осуществляется с помощью операции свертки (9) и обеспечивает плавность перепадов яркостей, что повышает точность измерений. Две независимые цепи (9), две параллельные цепи (показаны стрелками) (11) и перенос центра сегмента (штриховая линия) приведены на рис. 4.

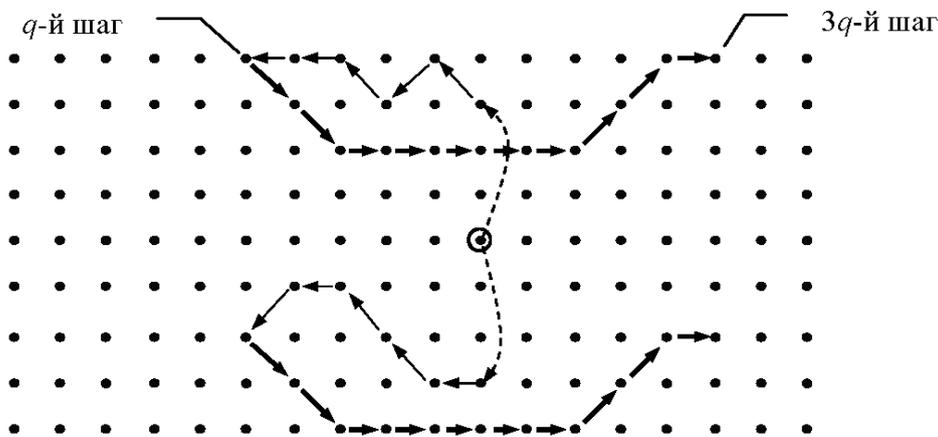


Рис. 4. Возможный граф цепей для  $d = 2, G = \{3, 4, 5\}$  в каналах «теп» и «света»

**Третий этап.** Оптимизируют параметры первого и второго этапов на сегментах  $S_2$  для  $d \in D = 0...3$ . Выбор характера движения цепей и их длин центрирует цепи на сегменте. Однако качество измерений для направлений  $d$  и  $\bar{d} = (d + 4) \bmod 8$  в каналах можно повысить выбором лучших по достоверности измерений. Оптимизация сводится к вычислению в слоях  $F_h$  восьми матриц направлений

$$\Delta_h^{(dk)} = \left[ \delta_h^{(dk)}(x, y) \right] \quad (13)$$

и соответствующих им восьми матриц достоверностей

$$\Lambda_h^{(dk)} = \left[ \lambda_h^{(dk)}(x, y) \right], \quad (14)$$

где  $k \in \{0, 1\}$ . Для этого в вершины сегментов  $S_h^{(d+3)}$  записывают направления

$$- \delta_h^{(dk)}(x, y) = \delta_h^{(\mathcal{G}(x, y, k)k)}(x, y)$$

и соответствующие им достоверности

$$\lambda_h^{(dk)}(x, y) = \lambda_h^{(\mathcal{G}(x, y, k)k)}(x, y),$$

где параметр  $\mathcal{G}(x, y, k) \in \{d, \bar{d}\}$  и

$$\mathcal{G}(x, y, k) = \arg \max_{\{d, \bar{d}\}} \left( \lambda_h^{(dk)}(x, y), \lambda_h^{(\bar{d}k)}(x, y) \right). \quad (15)$$

С помощью параметра  $\mathcal{G}(x, y, k)$  как направления максимизируют достоверность измеренных направлений. Пусть цепи имеют вид, приведенный на рис. 4. Изменим направление  $d$  на противоположное  $\bar{d}$ . Несмотря на совпадение новых значений точек  $\{p^l, p^r\}$  со значениями точек, полученными по (9), независимые цепи, вероятно, изменятся, а матрицы направлений и достоверностей перестроятся. Экспериментально установлено, что применение формул (13)–(15) улучшает результаты обработки изображений.

**Четвертый этап.** Для коррекции ошибки прогноза периода линий выполняют поэлементную селекцию матриц направлений (13) и достоверностей (14). Процедура сводится к итерации с первого по третий этапов с увеличением на первом этапе расстояния переноса

$t = t + 1$  центральной точки  $(u, v) \in \hat{X}_h \times \hat{Y}_h$  сегмента  $S_2^{(d+3)}$ , а также поэлементным замещением матриц направлений

$$\Delta_h^{(dk)} = \left[ \delta_h^{(dk)}(x, y) \right] = \left[ \text{sel}_R(\delta_{h,j}^{(dk)}(x, y), \delta_{h,j-1}^{(dk)}(x, y)) \right] \quad (16)$$

и матриц достоверностей

$$\Lambda_h^{(dk)} = \left[ \lambda_h^{(dk)}(x, y) \right] = \left[ \text{sel}_R(\lambda_{h,j}^{(dk)}(x, y), \lambda_{h,j-1}^{(dk)}(x, y)) \right], \quad (17)$$

где  $j \in 2 \dots m$  – номер итерации;  $\text{sel}(\cdot)$  – функция выбора левого аргумента, если критерий  $R = \lambda_{h,j}^{(dk)}(x, y) > \lambda_{h,j-1}^{(dk)}(x, y)$  истинен, или выбора правого аргумента при ложности этого критерия.

Условие селекции для отдельного элемента как вершины сегмента в центре апертуры (4) на  $j$ -й итерации истинно, если

$$\lambda_h^{(d2)}(x, y) < \frac{l_i}{\kappa + j},$$

где  $i$  – индекс;  $\kappa$  – коэффициент (0 и 3 в реализации);  $\lambda_h^{(d2)}(x, y) \in \Lambda_h^{(d2)}$  – элемент матрицы доминирующих достоверностей;  $l_i$  – элемент матрицы  $\Lambda_h^{(d2)}$  из упорядоченного по возрастанию подмножества [3]

$$L(x, y) = \{l_i\} = \underset{>}{\text{sort}}\{\lambda_h^{(d2)}(u, v) \mid (u, v) \in A_h(x, y, 1) \vee (x, y)\},$$

$\forall i \in I$ ;  $I$  – индексное множество.

Матрица доминирующих направлений

$$\Delta_h^{(d2)} = \left[ \delta_h^{(d2)}(x, y) \right] = \left[ \text{sel}_R(\delta_h^{(d0)}(x, y), \delta_h^{(d1)}(x, y)) \right], \quad (18)$$

матрица доминирующих достоверностей

$$\Lambda_h^{(d2)} = \left[ \lambda_h^{(d2)}(x, y) \right] = \left[ \text{sel}_R(\lambda_h^{(d0)}(x, y), \lambda_h^{(d1)}(x, y)) \right] \quad (19)$$

с критерием выбора  $R = \lambda_h^{(d0)}(x, y) > \lambda_h^{(d1)}(x, y)$  вычисляются для  $\forall d \in D = 0 \dots 3$ .

Итак, сравнение  $\lambda_h^{(d2)}(x, y) \in \Lambda_h^{(d2)}$  с элементами  $l_i$  приводит к повторному измерению направлений с другим расстоянием переноса  $t$ . Индекс  $i$  указывает элемент из множества  $L(x, y)$ , влияющий на баланс скорости и качества измерения.

**Пятый этап.** Выполняют перколяцию матриц (16)–(19) для направления  $d$  с уровнем иерархии измерений  $h = \min H$  на высшие уровни иерархии пирамиды  $\mathfrak{R}$  [4, 6]. Процедура заключается в рекурсивном вычислении по иерархиям в векторных пространствах 12 матриц направлений

$$\Delta_h^{(dk)} = \left[ \delta_h^{(dk)}(x, y) \right] = \left[ \frac{1}{2} \arctg \left( \frac{im_{h-1}^{(dk)}}{re_{h-1}^{(dk)}} \right) \right]$$

и 12 матриц достоверностей

$$\Lambda_h^{(dk)} = \left[ \lambda_h^{(dk)}(x, y) \right] = \left[ \kappa \sqrt{\left( re_{h-1}^{(dk)} \right)^2 + \left( im_{h-1}^{(dk)} \right)^2} \right],$$

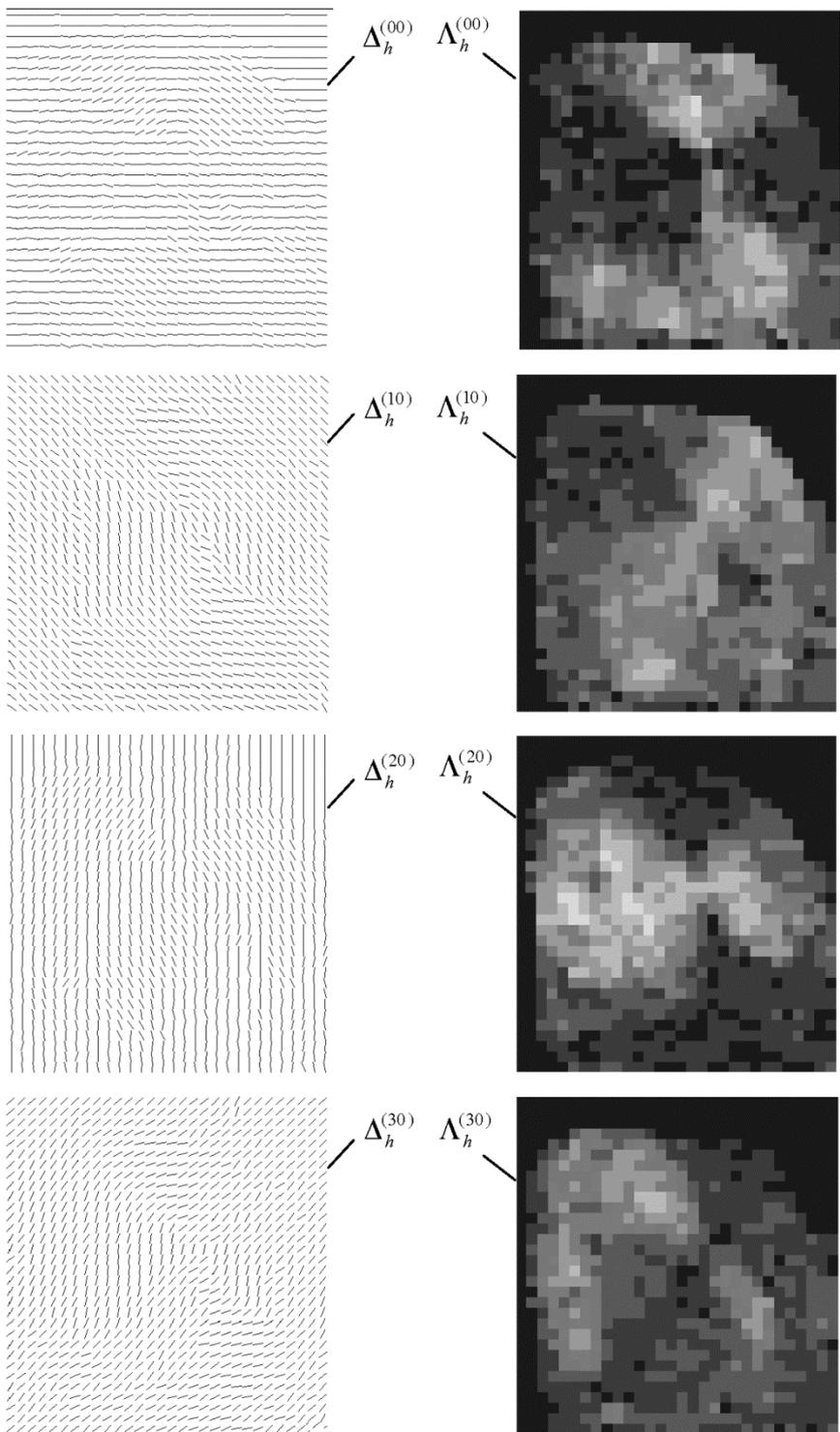
где  $k \in 0 \dots 2$  – номер канала;  $h \in 3 \dots n$  – уровень иерархии;  $d \in D = 0 \dots 3$  – направление. Действительную и мнимую части векторов для сегмента  $S_{h, h-1}(x, y)$  определяют сложением векторов с модулем  $\lambda_{h-1}^{(dk)}(x, y)$  и аргументом  $\delta_{h-1}^{(dk)}(x, y)$  в виде

$$re_{h-1}^{(dk)} = \sum_{(u, v) \in G} \lambda_{h-1}^{(dk)}(u, v) \cos(2\delta_{h-1}^{(dk)}(u, v));$$

$$im_{h-1}^{(dk)} = \sum_{(u, v) \in G} \lambda_{h-1}^{(dk)}(u, v) \sin(2\delta_{h-1}^{(dk)}(u, v)),$$

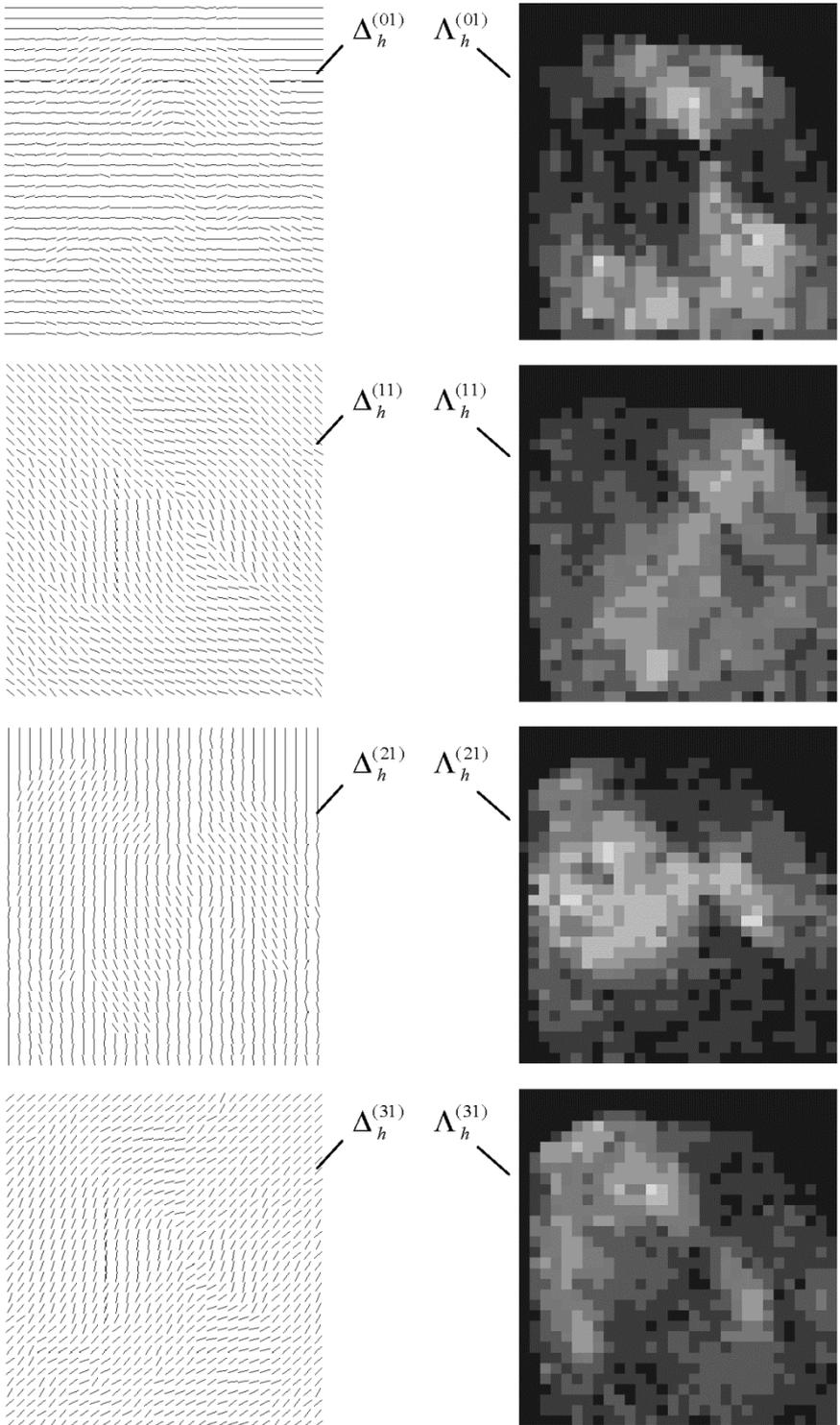
где  $G = \bar{X}_{h, h-1} \times \bar{Y}_{h, h-1}$  – множество точек сегмента  $S_{h, h-1}(x, y)$  (см. (2)). Аргумент  $\delta_{h-1}^{(dk)}(u, v)$  удваивают для расширения полуплоскости  $[0, \pi)$  до плоскости  $[0, 2\pi)$  [1];  $\kappa$  – коэффициент нормировки векторов из множества  $G$ ,

$$\kappa = \frac{\max_{(u, v) \in G} \lambda_{h-1}^{(dk)}(u, v)}{\sum_{(u, v) \in G} \lambda_{h-1}^{(dk)}(u, v)}.$$



*a*

**Рис. 5. Направления и достоверности**



*б*

**каналов «тени» (а) и «света» (б)**

Результаты перколяции запоминают в вершинах сегментов, смещаясь по иерархиям пирамиды  $\mathfrak{R}$ . С помощью коэффициента  $\kappa$  масштабируют достоверность  $\lambda(x, y)$ , которая как мера когерентности максимальна для простой окрестности, а для изотропной структуры близка нулю [1, 4].

**Шестой этап.** Выполняют отбор направлений на сегментах  $S_h^{(d+3)}$ . Формально алгоритм реализуют последовательным выбором направлений из диапазона значений  $D=0...3$  для уровня иерархии  $H=2...n$  итерационно  $h = \min H \Rightarrow H = H \setminus \{h\}$  по формулам

$$\Delta_h^{(k)} = [\delta_h^{(k)}(x, y)] = [\delta_h^{(\mathcal{G}(x, y, k)k)}(x, y)];$$

$$\Lambda_h^{(k)} = [\lambda_h^{(k)}(x, y)] = [\lambda_h^{(\mathcal{G}(x, y, k)k)}(x, y)],$$

где  $k \in 0...2$ ;  $\mathcal{G}(x, y, k) = \arg \max_{d \in D} \lambda_h^{(dk)}(x, y)$  – направление-победитель на отдельном сегменте уровня иерархии  $h$ . Направления покрывают все многообразие ориентаций папиллярных линий  $0 \leq \delta < 180$ , так как при выборе параметра  $\mathcal{G}(x, y, k)$  по (15) направления  $d$  и  $\bar{d}$  равноправны. Матрицы  $\{\Delta_h^{(k)}\}$  и  $\{\Lambda_h^{(k)}\}$  содержат наиболее правдоподобные направления для каждого из трех каналов, необязательно корректные. В результате для каждого уровня иерархии  $h \in H$  формируется 30 слоев:  $\{\Delta_h^{(dk)}\}, \{\Delta_h^{(k)}\}, \{\Lambda_h^{(dk)}\}, \{\Lambda_h^{(k)}\}$ , где  $d \in 0...3$ ;  $k \in 0...2$ .

На шестом этапе заканчивается измерение матриц направлений и матриц достоверностей методом параллельных цепей (рис. 5).

Способ измерения матриц направлений основан на оценке отсчетов при параллельном движении в слое светотеней. Это позволяет разделить результаты анализа на два канала – канал «тени» и канал «света», объединение которых порождает доминирующие направления. Многообразие результатов измерений в дальнейшем улучшает обработку узора.

**Заключение.** Описанный метод параллельных цепей для измерения направлений линий на изображениях отпечатков пальцев позволяет существенно повысить качество обработки изображения. В будущих исследованиях ожидается развитие этого метода до использования в нем трех параллельных цепей, а также совместное применение такого метода с методом тензорного исчисления. Последнее предполагает внедрение коллективных решающих правил в каждом сегменте любого слоя и иерархии пирамиды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Я н е Б. Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 584 с.
2. Handbook of Fingerprint Recognition / D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, S. Prabhakar. London: Springer-Verlag, 2009. 496 p.
2. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко и др. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
4. Г у д к о в В. Ю. Методы первой и второй обработки дактилоскопических изображений. Миасс: Изд-во «Геотур», 2009. 237 с.
5. К у х а р е в Г. А. Биометрические системы: методы и средства идентификации личности человека. СПб.: Политехника, 2001. 240 с.
6. Г о н с а л е с Р., В у д с Р. Цифровая обработка изображений / Под ред. П.А. Чочиа; Пер. с англ. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.
7. V o l l e R. M. R a t h a N. K. Automatic Fingerprint Recognition Systems. NY: Springer-Verlag, 2004. 458 p.

Статья поступила в редакцию 14.05.2012