

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 621.391

БЫСТРЫЕ ПРОЕКЦИОННО-ДИСПЕРСИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ  
ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЯ НАПРАВЛЕНИЙ

И. С. Грузман

*Новосибирский государственный технический университет,**630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20**E-mail: gruzman@ktor.ref.nstu.ru*

Предложен метод построения быстрых проекционно-дисперсионных алгоритмов на основе сверточных алгоритмов вычисления дисперсий проекций Радона. Показано, что применение билинейной интерполяции ядра свертки и параболической интерполяции квантованных оценок поля направлений повышает точность алгоритмов более чем в 2 раза. Рассматриваются и сравниваются два варианта построения поля направлений на основе проекций Радона. Приведены примеры, демонстрирующие вычислительную эффективность, точность и помехоустойчивость полученных алгоритмов.

*Ключевые слова:* поле направлений, проекционно-дисперсионные алгоритмы, локальное преобразование Радона.

**Введение.** Методы оценивания локальных характеристик текстур изображений играют важную роль в различных задачах цифровой обработки изображений [1–3]. При проведении текстурного анализа широко используется поле направлений (ПН), представляющее собой поле углов преимущественного направления линий в локальной окрестности точки изображения [2, 3]. Среди известных методов построения ПН существенное место занимают проекционно-дисперсионные методы [3–5], основанные на вычислении локальных проекций Радона функции яркости фрагмента  $\Lambda_\alpha = \{\lambda(x', y'), (x', y') \in W'_\alpha\}$  наблюдаемого изображения  $\Lambda = \{\lambda(x, y), (x, y) \in W\}$  [3, 6, 7]:

$$R(x, y; s', \alpha) = \iint_{(x', y') \in W'_\alpha} \lambda(x', y') \delta(s' - x' \cos \alpha - y' \sin \alpha) dx' dy', \quad (1)$$

$$s' \in [-T', T'], \quad \alpha \in [0, 180^\circ],$$

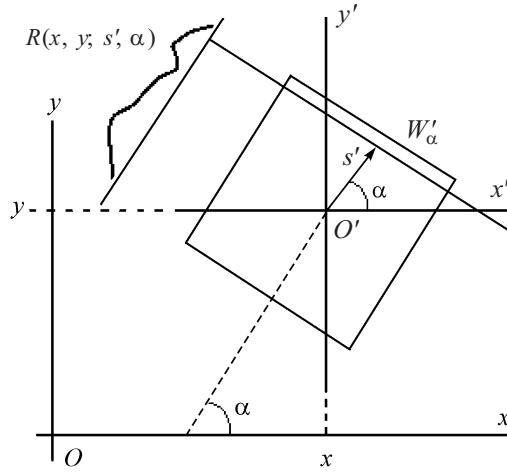


Рис. 1

где интегрирование выполняется внутри скользящего окна  $W'_\alpha$  размером  $2T' \times 2T'$  по прямой, заданной уравнением

$$s' - x' \cos \alpha - y' \sin \alpha = 0; \quad (2)$$

$\delta(\cdot)$  – дельта-функция;  $s'$  – расстояние от начала системы координат  $\{x' O' y'\}$  до прямой, по которой выполняется интегрирование;  $\alpha$  – угол, образованный перпендикуляром с осью  $x'$ , опущенным из начала системы координат  $\{x' O' y'\}$  на эту прямую (рис. 1). Начало прямоугольной системы координат  $\{x' O' y'\}$  совмещено с центром скользящего окна  $W'_\alpha$ . Система координат  $\{x O y\}$ , начало которой совмещено с центром наблюдаемого изображения  $\Lambda$ , связана с системой координат  $\{x' O' y'\}$  плоскопараллельным сдвигом. Для оценки ПН изображения  $\Lambda$  в точке с координатами  $(x, y)$  центр скользящего окна  $W'_\alpha$  совмещается с этой точкой. Далее для всех возможных углов поворота  $\alpha$  окна  $W'_\alpha$  вычисляются локальные проекции Радона (1). В качестве оценки ПН  $\tilde{\alpha}$  в точке с координатами  $(x, y)$  принимается значение угла  $\alpha$ , при котором некоторая функция от локальной проекции Радона достигает максимума [3, 4]

$$\tilde{\alpha}(x, y) = \arg \max_{\alpha} D(x, y; \alpha) - 90^\circ, \quad (3)$$

где

$$D(x, y; \alpha) = \frac{1}{2T'} \int_{-T'}^{T'} R^2(x, y; s', \alpha) ds' - \left( \frac{1}{2T'} \int_{-T'}^{T'} R(x, y; s', \alpha) ds' \right)^2 \quad (4)$$

– выборочная дисперсия проекции Радона  $R(x, y; s, \alpha)$ . В [5] предложен альтернативный проекционно-дисперсионный алгоритм оценивания ПН

$$\tilde{\alpha}^*(x, y) = \arg \max_{\alpha} \Psi(x, y; \alpha), \quad (5)$$

где

$$\Psi(x, y; \alpha) = \frac{D^*(x, y; \alpha + 90^\circ) - D^*(x, y; \alpha)}{D^*(x, y; \alpha + 90^\circ) + D^*(x, y; \alpha)};$$

$$D^*(x, y; \alpha) = \frac{1}{2T'} \int_{-T'}^{T'} \left( \frac{1}{2T'} R^*(x, y; s', \alpha) - \left( \frac{1}{2T'} R(x, y; s', \alpha) \right)^2 \right) ds'; \quad (6)$$

$$R^*(x, y; s', \alpha) = \iint_{(x', y') \in W'_\alpha} \lambda^2(x', y') \delta(s' - x' \cos \alpha - y' \sin \alpha) dx' dy'$$

Отличительной особенностью алгоритма (5) является то, что  $D^*(x, y; \alpha)$  есть аналог выборочной дисперсии фрагмента изображения  $\Lambda_\alpha$ , при вычислении которой в качестве выборочного среднего принято значение нормированной проекции Радона  $\frac{1}{2T'} R(x, y; s', \alpha)$ . Кроме того, статистика  $\Psi(x, y; \alpha)$  нормирована:  $|\Psi(x, y; \alpha)| \leq 1$ .

Широкое применение методов построения ПН на основе преобразования Радона сдерживается их чрезмерной вычислительной сложностью, связанной с тем, что, во-первых, локальные проекции Радона (1) обычно определяются отдельно для каждой точки изображения  $\Lambda$ ; во-вторых, для обеспечения необходимой точности оценки ПН шаг по углу  $\alpha$  должен быть достаточно мал, т. е. число проекций Радона, вычисляемых в каждой точке изображения, оказывается слишком большим.

Для практической реализации проекционно-дисперсионных методов в работе [3] предложено находить локальные проекции Радона лишь для четырех или максимум восьми направлений с последующей параметрической аппроксимацией синусоидой выборочной дисперсии (4) как функции угла  $\alpha$ . Однако такая аппроксимация не подходит для изображений со случайной анизотропной текстурой, что приводит к низкой точности оценки ПН большого класса реальных изображений.

В работе [7] рассмотрен быстрый алгоритм вычисления локальных проекций Радона при заданном угле  $\alpha$ . Локальные проекции определяются сразу для всего изображения методом двумерной свертки, реализованной в частотной области. По аналогии с [7] нетрудно показать, что

$$R(x, y; \alpha) = \lambda(x, y) \otimes \otimes h(x, y; \alpha), \quad (x, y) \in W, \quad (7)$$

где

$$h(x, y; \alpha) = \begin{cases} \delta(x \cos \alpha + y \sin \alpha), & \text{если } \sqrt{x^2 + y^2} \leq T', \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (8)$$

– ядро свертки, которое далее будем называть импульсной характеристикой (ИХ) фильтра, выполняющего интегрирование по отрезку длиной  $2T'$ ;  $\otimes \otimes$  – символ двумерной свертки.

Целью предлагаемой работы является построение быстрых проекционно-дисперсионных алгоритмов на основе сверточного алгоритма вычисления локальных проекций Радона (7).

**Сверточные алгоритмы вычисления  $D(x, y; \alpha)$  и  $D^*(x, y; \alpha)$ .** Интегрирование по  $s'$  в (4) и (6) соответствует интегрированию по отрезку длиной  $2T'$ , перпендикулярному прямой (2). Координаты центра отрезка равны  $(x, y)$ . Следовательно, дисперсии  $D(x, y; \alpha)$  и  $D^*(x, y; \alpha)$ , как и локальные проекции Радона, могут быть вычислены методом двумерной свертки:

$$D(x, y; \alpha) = \frac{1}{2T'} R^2(x, y; \alpha) \otimes \otimes h(x, y; \alpha + 90^\circ) - \left( \frac{1}{2T'} R(x, y; \alpha) \otimes \otimes h(x, y; \alpha + 90^\circ) \right)^2, \quad (9)$$

$$D^*(x, y; \alpha) = \frac{1}{2T'} \left( \frac{1}{2T'} R^*(x, y; \alpha) - \left( \frac{1}{2T'} R(x, y; \alpha) \right)^2 \right) \otimes \otimes h(x, y; \alpha + 90^\circ), \quad (10)$$

где

$$R^*(x, y; \alpha) = \lambda^2(x, y) \otimes \otimes h(x, y; \alpha). \quad (11)$$

Таким образом, для вычисления выборочной дисперсии  $\{D(x, y; \alpha), (x, y) \in W\}$  или  $\{D^*(x, y; \alpha), (x, y) \in W\}$  при заданном угле  $\alpha$  необходимо трижды выполнить двумерную свертку данных с импульсной характеристикой (8). Подставив  $\{D(x, y; \alpha), (x, y) \in W\}$  и  $\{D^*(x, y; \alpha), (x, y) \in W\}$  в выражения (3) и (5) соответственно, получим оценки ПН  $\{\tilde{\alpha}(x, y), (x, y) \in W\}$  и  $\{\tilde{\alpha}^*(x, y), (x, y) \in W\}$  изображения  $\Lambda$ .

**Дискретное приближение алгоритмов оценивания ПН.** Для обработки изображений на компьютере необходимо учитывать, что они заданы на квадратной сетке в плоскости переменных  $(x, y)$ . Для дискретного изображения  $\Lambda = \{\lambda(i_1, i_2), i_1 = \overline{1, N}, i_2 = \overline{1, N}\}$  размером  $N \times N$  элементов дисперсии  $D(i_1, i_2; \alpha)$  и  $D^*(i_1, i_2; \alpha)$ , оценки ПН  $\tilde{\alpha}(i_1, i_2)$  и  $\tilde{\alpha}^*(i_1, i_2)$  также представляют собой двумерные массивы размером  $N \times N$ .

Чтобы вычислить ПН цифровых изображений, необходимо в формулах (7), (9)–(11) перейти от непрерывной к дискретной двумерной свертке. При этом следует уточнить, как выполнить дискретизацию ИХ (8). Поскольку  $h(x, y; \alpha)$  представляет собой отрезок прямой с произвольным углом наклона  $\alpha$ , центр которого совмещен с началом координат, то целесообразно выполнить дискретизацию этого отрезка примерно с постоянным шагом. В результате получим дискретную ИХ размером  $(2N'+1) \times (2N'+1)$  элементов:

$$h(i_1, i_2; \alpha) = \begin{cases} C^{-1}, & \text{если } i_1 = -[j \sin \alpha] \text{ и } i_2 = [j \cos \alpha], \text{ где } j = \overline{-N', N'}, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (12)$$

где  $[b]$  – результат округления до целого вещественного числа  $b$ . Нормирующая константа  $C$ , выбираемая из условия

$$\sum_{i_1=-N'}^{N'} \sum_{i_2=-N'}^{N'} h(i_1, i_2; \alpha) = 2N' + 1,$$

должна обеспечить независимость статистических характеристик локальных проекций Радона от угла  $\alpha$  для случайных изотропных полей. Недостатком данного способа определения ИХ является то, что его применение может привести к значительным ошибкам оценивания ПН, особенно при малых значениях  $N'$  из-за больших ошибок задания прямолинейного отрезка на дискретной решетке.

Точность оценок ПН можно повысить с помощью метода билинейной интерполяции, используемого для интерполяции значений яркости изображений по четырем ближайшим соседям [1]. Применим этот метод для определения величины отсчетов ИХ. Пусть  $(i_1, i_2)$  – ближайшая соседняя точка с целыми координатами, значения которых не превосходят вещественных значений координат  $(x, y)$ . Тогда четыре ближайших отсчета ИХ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} h_+(i_1, i_2; \alpha) &= C^{-1}(1 - \xi_x - \xi_y + \xi_x \xi_y); & h_+(i_1 + 1, i_2; \alpha) &= C^{-1}(\xi_x - \xi_x \xi_y); \\ h_+(i_1, i_2 + 1; \alpha) &= C^{-1}(\xi_y - \xi_x \xi_y); & h_+(i_1 + 1, i_2 + 1; \alpha) &= C^{-1}\xi_x \xi_y, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\xi_x = x - i_1$ ,  $\xi_y = y - i_2$ . Отметим, что при этом условия нормировки ИХ не нарушаются, так как

$$h_+(i_1, i_2; \alpha) + h_+(i_1 + 1, i_2; \alpha) + h_+(i_1, i_2 + 1; \alpha) + h_+(i_1 + 1, i_2 + 1; \alpha) = C^{-1}.$$

Для обеспечения высокого быстродействия алгоритмов построения ПН двумерная дискретная свертка может быть реализована одним из способов, приведенных в работах [3, 8–10]: с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ), путем векторного представления наблюдаемого изображения и ИХ  $h(i_1, i_2; \alpha)$  или методом рекурсивной фильтрации. При выполнении свертки в (7)–(11) возникают краевые эффекты, обусловленные тем, что при использовании БПФ обычная свертка заменяется циклической [8, 10]. Результаты обычной свертки будут совпадать с результатами циклической свертки для точек, удаленных от границ наблюдаемого изображения на длину ИХ. Если размеры пограничной области, в которой возникают краевые эффекты, невелики по сравнению с размерами наблюдаемого изображения, то ими можно пренебречь. В противном случае проблема краевых эффектов может быть решена с помощью стандартных методов [8–10].

Следует подчеркнуть, что применение метода билинейной интерполяции не приведет к существенному увеличению трудоемкости способов реализации быстрой двумерной свертки (например, методом векторного представления данных), поскольку размеры апертуры ИХ остаются такими же, как и при интерполяции по ближайшему соседу (12).

При реализации алгоритмов построения ПН локальные проекции Радона, дисперсии  $D(i_1, i_2; \alpha)$  и  $D^*(i_1, i_2; \alpha)$  могут быть вычислены лишь на некотором конечном множестве значений аргумента  $\alpha$ . Это приводит к тому, что значения оценок ПН  $\tilde{\alpha}(i_1, i_2)$  и  $\tilde{\alpha}^*(i_1, i_2)$  будут квантованными на  $K = \frac{180^\circ}{\Delta_\alpha}$  уровней, где  $\Delta_\alpha$  – шаг квантования по углу  $\alpha$ . С одной стороны, увеличение  $\Delta_\alpha$  приведет к повышению быстродействия алгоритмов оценивания ПН, с другой – к увеличению погрешностей этих алгоритмов из-за роста уровня шумов квантования. Можно повысить точность квантованных оценок

$$\tilde{\alpha}_k(i_1, i_2) = \arg \max_k D(i_1, i_2; \alpha_k) - 90^\circ, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_k^*(i_1, i_2) &= \arg \max_k \Psi(i_1, i_2; \alpha_k) = \\ &= \arg \max_k \frac{D^*(i_1, i_2; \alpha_k + 90^\circ) - D^*(i_1, i_2; \alpha_k)}{D^*(i_1, i_2; \alpha_k + 90^\circ) + D^*(i_1, i_2; \alpha_k)}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\alpha_k = (k-1)\Delta_\alpha$ ,  $k = \overline{1, K}$ , применив интерполяцию дискретных последовательностей  $D(i_1, i_2; \alpha_k)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , и  $\Psi(i_1, i_2; \alpha_k)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , параболой  $f(\alpha) = \sum_{j=0}^2 c_j \alpha^j$  в области их максимума. Например, зная значения  $D(i_1, i_2; \alpha_k)$  в точках  $\tilde{\alpha}_{k-1}(i_1, i_2)$ ,  $\tilde{\alpha}_k(i_1, i_2)$  и  $\tilde{\alpha}_{k+1}(i_1, i_2)$ , можно оценить неизвестные значения параметров  $c_j$ ,  $j = \overline{0, 2}$ . Затем, приняв в качестве оценки ПН в точке  $(i_1, i_2)$  координату максимума параболы  $f(\alpha)$ , получим

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}(i_1, i_2) &= \tilde{\alpha}_k(i_1, i_2) - \\ &- \frac{D(i_1, i_2; \tilde{\alpha}_{k+1}) - D(i_1, i_2; \tilde{\alpha}_{k-1})}{2(D(i_1, i_2; \tilde{\alpha}_{k+1}) + D(i_1, i_2; \tilde{\alpha}_{k-1}) - 2D(i_1, i_2; \tilde{\alpha}_k))} \Delta_\alpha. \end{aligned} \quad (16)$$

Аналогичным образом интерполяционная оценка ПН по дискретной последовательности  $\Psi(i_1, i_2; \alpha_k)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , имеет вид

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}^*(i_1, i_2) &= \tilde{\alpha}_k^*(i_1, i_2) - \\ &- \frac{\Psi(i_1, i_2; \tilde{\alpha}_{k+1}^*) - \Psi(i_1, i_2; \tilde{\alpha}_{k-1}^*)}{2(\Psi(i_1, i_2; \tilde{\alpha}_{k+1}^*) + \Psi(i_1, i_2; \tilde{\alpha}_{k-1}^*) - 2\Psi(i_1, i_2; \tilde{\alpha}_k^*))} \Delta_\alpha. \end{aligned} \quad (17)$$

**Оценка времени решения задачи построения ПН.** Время решения задачи построения ПН с помощью быстрых проекционно-дисперсионных алгоритмов на основе сверточных методов вычисления дисперсий  $D(x, y; \alpha)$  и

**Время решения задачи построения ПН  
для одного элемента наблюдаемого изображения**

Способ реализации алгоритмов построения ПН	Время решения, с		
	11 × 11	15 × 15	25 × 25
Исходный алгоритм на основе вращения скользящего окна $W'_\alpha$	0,44	0,46	0,49
Алгоритм (16). Свертка реализована путем векторного представления изображения и ИХ	$4,97 \cdot 10^{-5}$	$6,84 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-4}$
Алгоритм (16). Свертка реализована с использованием БПФ	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$

$D^*(x, y; \alpha)$  зависит от вычислительной сложности алгоритмов, производительности компьютера, а также от размеров обрабатываемого изображения и апертуры ИХ.

Для сравнительного анализа проекционно-дисперсионные алгоритмы были реализованы в пакете MATLAB7. Обработка изображений проводилась на компьютере с процессором Intel Celeron CPU с тактовой частотой 1,7 ГГц и оперативной памятью объемом 1,5 Гбайт. В таблице приведены оценки времени решения задачи построения ПН для различных размеров скользящего окна  $W'_\alpha$  и ИХ  $h(i_1, i_2; \alpha)$ : 11 × 11, 15 × 15 и 25 × 25 элементов. Замеры времени проводились с помощью стандартных функций tic и toc пакета MATLAB7. Оценка ПН выполнялась для  $K = 36$  ( $\Delta_\alpha = 5^\circ$ ). Скользящее окно  $W'_\alpha$  также поворачивалось  $K$  раз в каждой точке наблюдаемого изображения.

Из приведенных данных следует, что выигрыш во времени при реализации быстрых проекционно-дисперсионных алгоритмов на основе двумерной свертки составляет несколько тысяч раз. Следует отметить, что время построения ПН быстрым алгоритмом (17) практически то же, что и алгоритмом (16).

**Экспериментальные исследования быстрых проекционно-дисперсионных алгоритмов построения ПН.** Анализ точности алгоритмов построения ПН проводился методом компьютерного моделирования по тестовым изображениям со спектральной плотностью мощности (СПМ)

$$G(f_x, f_y) = \exp(-\beta_1(f_x \cos \alpha - f_y \sin \alpha)^2 - \beta_2(f_x \sin \alpha + f_y \cos \alpha)^2), \quad (18)$$

где параметры  $\beta_i, i=1,2$ , определяют эффективную ширину спектров  $\Delta f_i = (2\sqrt{\pi\beta_i})^{-1}$  одномерных сечений СПМ вдоль осей  $f_x$  и  $f_y$  при  $\alpha = 0$ . Вычисление погрешности оценивания ПН

$$\varepsilon^\circ = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{i_1=1}^N \sum_{i_2=1}^N (\alpha(i_1, i_2) - \tilde{\alpha}(i_1, i_2))^2}$$

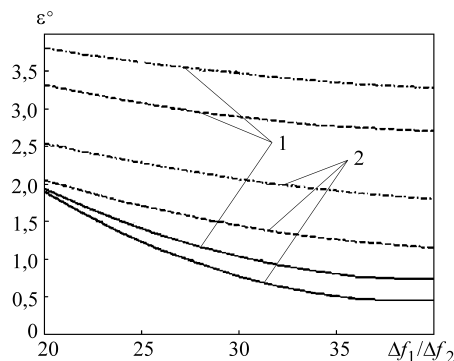


Рис. 2

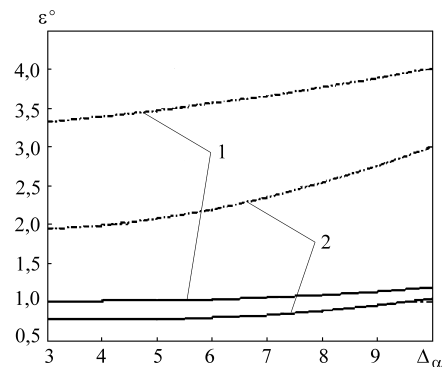


Рис. 3

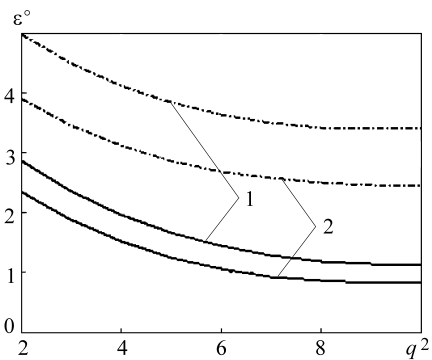


Рис. 4

выполнялось путем усреднения 100 тестовых изображений размером  $128 \times 128$  элементов. В пределах одного тестового изображения ПН было постоянным и менялось случайным образом от изображения к изображению в диапазоне  $[0, 180^\circ]$ . На рис. 2–4 кривые 1 обозначают зависимости погрешности оценивания ПН для проекционно-дисперсионных алгоритмов на основе выборочной дисперсии  $D(i_1, i_2; \alpha)$ , а кривые 2 – на основе статистики  $\Psi(i_1, i_2; \alpha)$ .

Штрихпунктирные линии соответствуют алгоритмам оценивания ПН (14) и (15) с ИХ (12), штриховые – алгоритмам (16) и (17) также с ИХ (12), сплошные – алгоритмам (16) и (17) с билинейной интерполяцией ИХ (13).

На рис. 2 приведены зависимости  $\varepsilon^\circ$  от  $\Delta f_1/\Delta f_2$  при  $\Delta f_1 = 0,3$ ,  $\Delta_\alpha = 5^\circ$ ,  $2N'+1=15$ ; на рис. 3 – зависимости  $\varepsilon^\circ$  от величины шага квантования  $\Delta_\alpha$  при  $\Delta f_1/\Delta f_2 = 30$ ; зависимости на рис. 4 иллюстрируют помехоустойчивость алгоритмов оценивания ПН при  $\Delta f_1/\Delta f_2 = 30$  и  $\Delta_\alpha = 5^\circ$ , где  $q^2 = \sigma_\lambda^2/\sigma_\eta^2$  – отношение сигнал/шум ( $\sigma_\lambda^2$  и  $\sigma_\eta^2$  – дисперсии наблюдаемого изображения  $\Lambda$  и аддитивного дискретного белого шума соответственно).

Из приведенных данных следует, что применение билинейной интерполяции импульсной характеристики и параболической интерполяции дискретных функций  $D(i_1, i_2; \alpha_k)$  и  $\Psi(i_1, i_2; \alpha_k)$ ,  $k=1, K$ , с одной стороны, позволяет существенно повысить точность оценки ПН, а с другой – увеличить шаг дискретизации по углу  $\alpha$  в 3 раза и соответственно повысить скорость обработки наблюдаемого изображения, при этом погрешность оценивания ПН  $\varepsilon^\circ$  возрастет лишь на 15–20%. Однако даже в этом случае она будет почти в 2 раза меньше, чем для алгоритмов без интерполяции. Полученные быстрые алгоритмы сохраняют свою работоспособность при больших уровнях аддитивного дискретного белого шума. Для всех проведенных экспериментов оценка построения ПН на основе статистики  $\Psi(i_1, i_2; \alpha)$  обладает меньшей  $\varepsilon^\circ$ , чем оценка на основе дисперсии проекции Радона  $D(i_1, i_2; \alpha_k)$ .



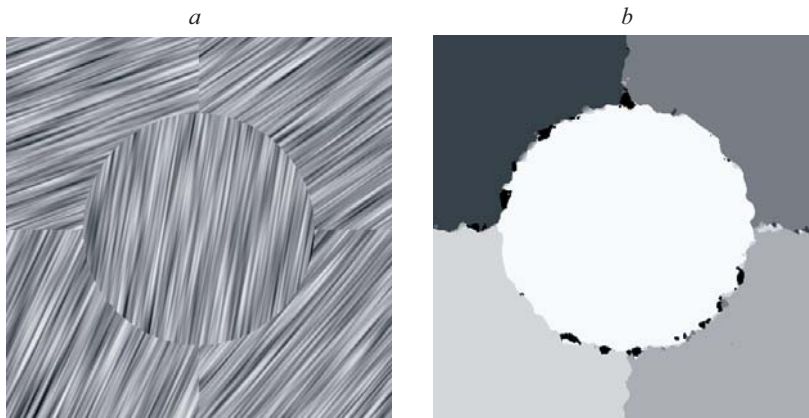


Рис. 5

Полученные алгоритмы построения ПН могут использоваться для сегментации анизотропных изображений по направлению или для сегментации на изотропные и анизотропные области изображений независимо от направления анизотропных областей.

На рис. 5, *a* показано тестовое изображение, где анизотропные области представляют собой реализации случайного поля с СПМ (18) при  $\Delta f_1 = 0,01$ ,  $\Delta f_2 = 0,25$  и  $\alpha_k = 20^\circ + 15^\circ(k-1)$ ,  $k = \overline{1,5}$ . На рис. 5, *b* представлены результаты сегментации тестового изображения по направлению, полученные в соответствии с правилом

$$V_1 = \left\{ v_1(i_1, i_2) = \begin{cases} k, & \text{если } (12,5^\circ + 15^\circ(k-1)) \leq \\ \leq \tilde{\alpha}^*(i_1, i_2) < (12,5^\circ + 15^\circ k), & k = \overline{1,5}, \quad i_1 = \overline{1, N}, \quad i_2 = \overline{1, N} \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \right\},$$

где оценка ПН  $\tilde{\alpha}^*(i_1, i_2)$  вычислялась при  $2N'+1=19$  и  $\Delta_\alpha = 5^\circ$ .

Изображение микрорельефа царапин, оставленных кромкой отвертки, дано на рис. 6, *a*, результаты его сегментации на две области (изотропную и анизотропную) приведены на рис. 6, *b*. Более темные области на рис. 6, *b* соответствуют изотропному фону. Пороговая обработка выполнялась по следующему правилу:

$$V_2 = \left\{ v_2(i_1, i_2) = \begin{cases} 1 \text{ (анизотропная область),} & \text{если } \Psi(i_1, i_2; \tilde{\alpha}^*) > P, \\ 0 \text{ (изотропная область),} & \text{если } \Psi(i_1, i_2; \tilde{\alpha}^*) \leq P, \end{cases} \quad i_1 = \overline{1, N}, \quad i_2 = \overline{1, N} \right\},$$

где порог  $P = 0,49$  соответствовал минимуму бимодальной гистограммы ПН, находящемуся между двумя ее пиками [8]. Оценка ПН  $\tilde{\alpha}^*(i_1, i_2)$  вычислялась при  $2N'+1=15$  и  $\Delta_\alpha = 5^\circ$ .

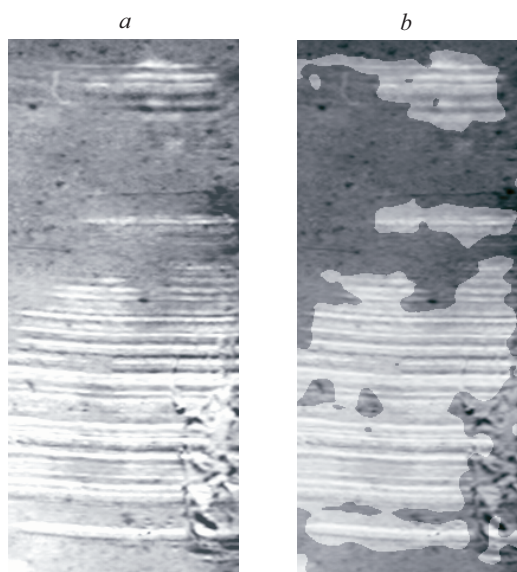


Рис. 6

**Заключение.** В данной работе рассмотрен метод построения быстродействующих алгоритмов оценивания ПН на основе локальных проекций Радона. Ключевым моментом, обеспечивающим значительное повышение скорости обработки анизотропных изображений, является предложенный способ вычисления выборочных дисперсий проекций Радона  $\{D(x, y; \alpha), (x, y) \in W\}$  и  $\{D^*(x, y; \alpha), (x, y) \in W\}$  на основе двумерной свертки. Для повышения точности проекционно-дисперсионных алгоритмов предложено применять методы билинейной интерполяции ядра свертки и полиномиальной интерполяции дискретных оценок ПН в области их максимума. Показано, что при одновременном использовании методов двумерной свертки и интерполяции одномерной свертки с повышением скорости обработки в несколько тысяч раз возрастает точность оценивания ПН более чем в 2 раза. Это обеспечивает возможность качественного решения широкого круга прикладных задач, связанных с текстурным анализом анизотропных изображений. Экспериментальные исследования показали, что полученные алгоритмы обладают хорошей помехоустойчивостью и могут успешно использоваться для решения задач сегментации анизотропных изображений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.
2. Jahne В. Digital Image Processing. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 607 p.
3. Методы компьютерной обработки изображений /Под ред. В. А. Сойфера. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.
4. Hejazi M., Shevlyakov G., Ho Y. S. Modified discrete Radon transforms and their application to rotation-invariant image analysis // IEEE 8th Workshop on Multimedia Signal Processing. Victoria, BC, Canada, 2006. P. 429–434.

5. **Heizmann M.** Techniques for the segmentation of striation patterns // IEEE Trans. Image Processing. 2006. **15**, N 3. P. 624–631.
6. **Баранов В. Г., Храмов А. Г.** Дискретное вейвлетное преобразование Радона в задаче выделения центров ветвей сетчатых структур // Компьютерная оптика. 2002. Вып. 23. С. 44–47.
7. **Warrick A. L., Delaney P. A.** Detection of linear features using a localized Radon transform // Proc. of the 30th Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove. CA, USA, 1996. Vol. 2. P. 1245–1249.
8. **Pratt W. K.** Digital Image Processing. USA: Wiley-Interscience, 2007. 807 p.
9. **Хуанг Т. С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Г. Дж. и др.** Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений /Под ред. Т. С. Хуанга. М.: Радио и связь, 1984. 224 с.
10. **Ярославский Л. П.** Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: введение в цифровую оптику. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.

*Поступила в редакцию 28 марта 2008 г.*

---