

И. С. Грузман, К. В. Новиков
(Новосибирск)

**СЕГМЕНТАЦИЯ АНИЗОТРОПНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Предложен алгоритм сегментации анизотропных изображений и построения поля направлений, основанный на анализе интегральных характеристик локального энергетического спектра, вычисленного в скользящем окне. Приведены примеры, иллюстрирующие эффективность применения алгоритма для обработки изображений микрорельефа следов реальных объектов, идентифицируемых при трассологической экспертизе.

При проведении трассологической экспертизы исследуются изображения микрорельефа следов, оставленных различными инструментами, холодным или огнестрельным оружием и т. п. Типичные примеры таких изображений приведены на рис. 1. Их отличительной особенностью является наличие двух типов областей: анизотропных, представляющих собой изображение линейных трасс, оставленных идентифицируемыми объектами, и изотропных, являющихся изображением неинформативного фона. Чтобы автоматизировать процессы идентификации, необходимо, во-первых, сегментировать исследуемое изображение, т. е. разделить его на анизотропные и изотропные области, во-вторых, построить поле направлений линейных трасс.

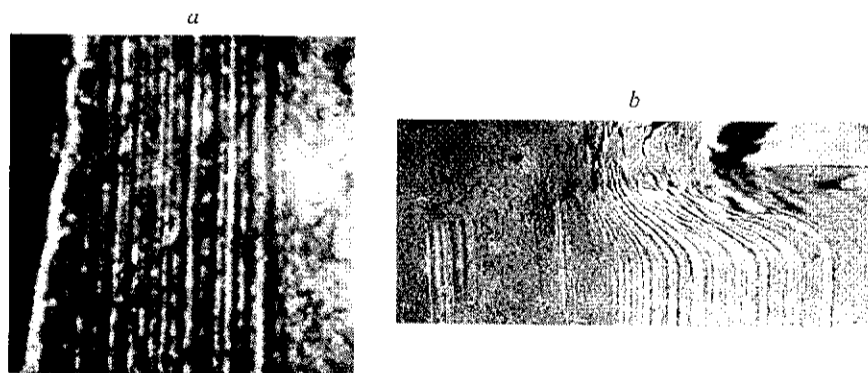


Рис. 1. Изображения микрорельефа: следов на пуле от нарезного оружия (а); царапин, оставленных отверткой на пластилине (б)

В работах [1–4] рассмотрены различные варианты оптических схем построения поля направлений на основе анализа спектральных характеристик изображений с помощью расположенного в фурье-плоскости пространственного фильтра, реализованного в виде секторной или круговой диафрагмы. При вращении диафрагмы последовательно вырезаются сегменты энергетического спектра и сканируются все направления линий, имеющих на изображении. По сути, в основе этих методов так же, как и цифровых спектральных методов построения поля направлений (например, метода локальной частоты [5] или метода выделения локальных анизотропных признаков [6, 7]), лежит математическая модель, описывающая изменение яркости произвольной локальной области изображения двумерной периодической функцией [5]. Поэтому данные методы позволяют успешно выявлять высокочастотные квазипериодические структуры.

Однако анизотропные области изображений трасс представляют собой линии, расстояние между которыми и их толщина могут существенно меняться, в результате чего в спектре анализируемого изображения отсутствует ярко выраженная основная гармоника. В этих условиях рассмотренные спектральные методы оказываются неэффективными.

Альтернативой спектральным методам являются высокоточные методы параметрической аппроксимации [5, 8], основанные на оценке угла поворота φ аппроксимирующей функции, например «цилиндра» [8]. При этом не требуется, чтобы аппроксимируемая функция яркости изображения была квазипериодической функцией, но эти методы обладают повышенной чувствительностью к шумам [5]. Они также оказываются неэффективными, если расстояние между линиями превышает 7–10 пиксел, так как в этом случае размеры скользящего окна должны быть относительно большими, а степень N аппроксимирующего полинома – высокой. Использование процедуры поиска оптимального значения угла поворота φ цилиндра методом прямого перебора при больших значениях N и размерах окна делает алгоритмы практически нереализуемыми из-за чрезмерно высоких вычислительных затрат, а беспереборный способ вычисления φ [8] не обладает требуемой точностью. Кроме того, оптимальное значение N сильно зависит от характеристик анизотропных областей, что затрудняет получение автоматической процедуры сегментации.

В данной работе предлагается цифровой алгоритм сегментации изображений и оценивания направлений трасс, сочетающий помехоустойчивость спектральных и точность аппроксимационных методов. Алгоритм построен на основе анализа интегральных характеристик локального энергетического спектра, вычисляемого в скользящем окне. Для его реализации не требуется процедуры поиска главной гармоники (как в спектральных методах) или угла поворота аппроксимирующего полинома (как в методе цилиндрической аппроксимации). Это обеспечивает приемлемую вычислительную сложность алгоритма, а отказ от полиномиальной цилиндрической аппроксимации снимает проблему выбора степени полинома N . Кроме того, использование интегральных характеристик энергетического спектра обеспечивает высокую помехоустойчивость алгоритма.

Энергетический спектр изображения анизотропной области представляет собой двумерную функцию, «вытянутую» вдоль направления $\alpha = \varphi - 90^\circ$, перпендикулярного линиям трасс. Причем чем сильнее выражена анизотропия, тем больше вытянут энергетический спектр. Для изображения фона ширина энергетического спектра, вычисленная вдоль двух произвольных пер-

пендикулярных направлений, практически одинаковая. Используем это свойство энергетического спектра для решения задач сегментации и построения поля направлений.

В работах [9, 10] показано, что ось симметрии эллипса постоянной вероятности совместно гауссовских коррелированных случайных величин x и y составляет с осью Ox угол, определяемый уравнением

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2K_{xy}}{\sigma_y^2 - \sigma_x^2}, \quad (1)$$

где K_{xy} – ковариационный момент; σ_x^2 и σ_y^2 – дисперсии случайных величин x и y соответственно. Длина осей эллипса пропорциональна дисперсиям

$$\begin{aligned} \sigma_\xi^2 &= \sigma_x^2 \cos^2 \alpha + \sigma_y^2 \sin^2 \alpha + 2K_{xy} \sin \alpha \cdot \cos \alpha, \\ \sigma_\eta^2 &= \sigma_x^2 \sin^2 \alpha + \sigma_y^2 \cos^2 \alpha - 2K_{xy} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

независимых гауссовских случайных величин ξ и η , полученных путем линейного преобразования случайных величин x и y [10].

Уравнения (1) и (2) обычно используются в цифровой обработке изображений для оценки угла поворота фигур в пространственной области [5, 11, 12]. Покажем, что эти уравнения можно применить для решения поставленной задачи. Пусть при вертикальном расположении линий трасс ($\varphi = 90^\circ$, $\alpha = 0^\circ$) энергетический спектр изображения представляет собой разделимую в прямоугольной частотной системе координат $\{\omega_x, \omega_y\}$ функцию

$$G(\omega_x, \omega_y) = G_1(\omega_x)G_2(\omega_y), \quad (3)$$

где $G_1(\omega_x)$ и $G_2(\omega_y)$ – одномерные энергетические спектры строк и столбцов изображения произвольного вида (не обязательно гауссовские). При повороте изображения на угол α его энергетический спектр также развернется на этот угол. В этом случае энергетический спектр повернутого изображения имеет вид

$$G_u(\omega_x, \omega_y) = G(\omega_x \cos \alpha + \omega_y \sin \alpha, -\omega_x \sin \alpha + \omega_y \cos \alpha). \quad (4)$$

Для оценки угла поворота α используем соотношение

$$\operatorname{tg} 2\hat{\alpha} = \frac{2\tilde{K}_{xy}}{\tilde{\sigma}_y^2 - \tilde{\sigma}_x^2}, \quad (5)$$

аналогичное (1), где

$$\tilde{\sigma}_x^2 = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \omega_x^2 G_u(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y, \quad (6)$$

$$\tilde{\sigma}_y^2 = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \omega_y^2 G_\alpha(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y, \quad (7)$$

$$\tilde{K}_{xy} = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \omega_x \omega_y G_\alpha(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y, \quad (8)$$

$$C = \left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_\alpha(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y \right)^{-1}. \quad (9)$$

Перейдем в новую прямоугольную систему координат $\{\omega_\xi O \omega_\eta\}$, повернутую относительно исходной прямоугольной системы координат $\{\omega_x O \omega_y\}$ на угол α . В соответствии с правилом замены переменных в двойных интегралах получим

$$\tilde{\sigma}_x^2 = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\omega_\xi \cos \alpha + \omega_\eta \sin \alpha)^2 G(\omega_\xi, \omega_\eta) d\omega_\xi d\omega_\eta, \quad (10)$$

$$\tilde{\sigma}_y^2 = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (-\omega_\xi \sin \alpha + \omega_\eta \cos \alpha)^2 G(\omega_\xi, \omega_\eta) d\omega_\xi d\omega_\eta, \quad (11)$$

$$\tilde{K}_{xy} = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\omega_\xi \cos \alpha + \omega_\eta \sin \alpha) (-\omega_\xi \sin \alpha + \omega_\eta \cos \alpha) G(\omega_\xi, \omega_\eta) d\omega_\xi d\omega_\eta. \quad (12)$$

Используя свойства разделимости двумерного энергетического спектра $G(\omega_\xi, \omega_\eta)$ и четности одномерных энергетических спектров $G_1(\omega_\xi)$ и $G_2(\omega_\eta)$, уравнения (10)–(12) приведем к следующему виду:

$$\tilde{\sigma}_x^2 = \tilde{\sigma}_\xi^2 \cos^2 \alpha + \tilde{\sigma}_\eta^2 \sin^2 \alpha, \quad (13)$$

$$\tilde{\sigma}_y^2 = \tilde{\sigma}_\xi^2 \sin^2 \alpha + \tilde{\sigma}_\eta^2 \cos^2 \alpha, \quad (14)$$

$$\tilde{K}_{xy} = \frac{1}{2} (\tilde{\sigma}_\eta^2 - \tilde{\sigma}_\xi^2) \sin 2\alpha, \quad (15)$$

где

$$\tilde{\sigma}_\xi^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega_\xi^2 G_1(\omega_\xi) d\omega_\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} G_1(\omega_\xi) d\omega_\xi}, \quad (16)$$

$$\tilde{\sigma}_\eta^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega_\eta^2 G_2(\omega_\eta) d\omega_\eta}{\int_{-\infty}^{\infty} G_2(\omega_\eta) d\omega_\eta}. \quad (17)$$

Подставив (13)–(15) в (5), получим

$$\operatorname{tg} 2\hat{\alpha} = \frac{2 \frac{1}{2} (\tilde{\sigma}_\eta^2 - \tilde{\sigma}_\xi^2) \sin 2\alpha}{(\tilde{\sigma}_\xi^2 \sin^2 \alpha + \tilde{\sigma}_\eta^2 \cos^2 \alpha) - (\tilde{\sigma}_\xi^2 \cos^2 \alpha + \tilde{\sigma}_\eta^2 \sin^2 \alpha)} = \operatorname{tg} 2\alpha.$$

Таким образом, уравнение (5) можно применить для оценки угла поворота линий трасс.

В качестве меры ширины одномерных энергетических спектров $G_1(\omega_\xi)$ и $G_2(\omega_\eta)$ используем параметры $\tilde{\sigma}_\xi^2$ и $\tilde{\sigma}_\eta^2$. Если анализируемое изображение представляет собой изображение линий трасс, то значения параметров $\tilde{\sigma}_\xi^2$ и $\tilde{\sigma}_\eta^2$ будут существенно отличаться из-за большого различия интервалов корреляции функций яркости изображения, вычисленных в продольном и поперечном направлениях по отношению к линиям трасс. Свойства изображения фона практически не зависят от направления, в этом случае значения параметров $\tilde{\sigma}_\xi^2$ и $\tilde{\sigma}_\eta^2$ будут примерно равны. Поэтому для сегментации изображения решающее правило можно представить в следующем виде: принимается решение о том, что анализируемое изображение является фоном, если

$$k \geq c, \quad (18)$$

где

$$k = \frac{\min(\tilde{\sigma}_\xi^2, \tilde{\sigma}_\eta^2)}{\max(\tilde{\sigma}_\xi^2, \tilde{\sigma}_\eta^2)}, \quad (19)$$

в противном случае принимается решение о том, что анализируемое изображение является изображением линий трасс.

Следует отметить, что k принимает значения от 0 до 1. Как показали экспериментальные исследования алгоритма, значение порога c в (18) целесообразно принять равным 0,5. С учетом (1) и (2) соотношение (19) можно выразить через интегральные параметры энергетического спектра (10)–(12) анализируемого изображения:

$$k = \frac{\tilde{\sigma}_x^2 + \tilde{\sigma}_y^2 - \sqrt{(\tilde{\sigma}_x^2 - \tilde{\sigma}_y^2)^2 + 4\tilde{K}_{xy}^2}}{\tilde{\sigma}_x^2 + \tilde{\sigma}_y^2 + \sqrt{(\tilde{\sigma}_x^2 - \tilde{\sigma}_y^2)^2 + 4\tilde{K}_{xy}^2}}. \quad (20)$$

Итак, алгоритм сегментации изображения и построения поля направлений состоит в следующем.

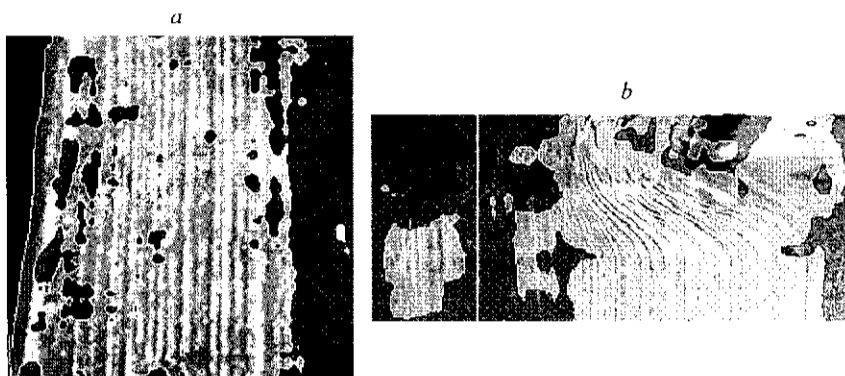


Рис. 2. Результаты сегментации изображений: микрорельефа следов на пуле от нарезного оружия (а): царапин, оставленных отверткой на пластине (b)

1. Для каждого положения скользящего окна, последовательно занимающего все возможные значения на плоскости аргументов анализируемого изображения, вычисляется оценка энергетического спектра $G_a(\omega_x, \omega_y)$.

2. В соответствии с (6)–(9) вычисляются интегральные параметры $\tilde{\sigma}_x^2$, $\tilde{\sigma}_y^2$ и \tilde{K}_{xy} . Для дискретных изображений интегралы заменяются на суммы, а область интегрирования определяется размерами скользящего окна.

3. По формуле (20) вычисляется коэффициент k и в соответствии с правилом (18) принимается решение об области принадлежности центральной точки скользящего окна.

4. Если принято решение, что в скользящем окне наблюдается анизотропное изображение, то в соответствии с (5) определяется оценка угла наклона линий трасс. Результат оценивания присваивается отсчету с координатами центральной точки скользящего окна.

Очевидно, что из-за дискретного характера анализируемого изображения и ограниченных размеров скользящего окна возникают ошибки сегментации и оценивания α , уровень которых тем меньше, чем больше размеры окна.

На рис. 2 представлены результаты сегментации изображений, приведенных на рис. 1, где более темные области соответствуют фону. Размер скользящего окна составлял 24×24 отсчета. Используя поле направлений, можно выделить трассы, идущие под определенным углом. Например, на рис. 3, а большую яркость имеют области линий трасс для $\hat{\alpha} \in [(-4) - 4^\circ]$, а на рис. 3, б – для $\hat{\alpha} \in [40 - 80^\circ]$.



Рис. 3. Результаты выделения областей с определенными направлениями линий трасс

Таким образом, предложенный алгоритм достаточно эффективно решает задачу сегментации изображений на области фона и области, содержащие линии трасс. Сегментация осуществляется на основе интегральных характеристик локального энергетического спектра, вычисленного в скользящем окне. Кроме того, алгоритм позволяет построить поле направлений линий трасс, а также выделить области изображений, на которых линии трасс идут под определенным углом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бачевский Р. С., Васильев С. А., Гаськевич Г. И. Использование метода оптической согласованной фильтрации для анализа ленинградских решеток // Голография и оптическая обработка информации в геологии и геофизике. Л.: ФТИ АН СССР, 1979.
2. Янутш Д. А., Ефимова Г. З., Скублова Н. В. Использование когерентной оптической обработки при геологическом дешифрировании аэрофотоснимков // Там же.
3. Алексеенко В. В., Бовин А. А., Зуевич А. В. и др. Некоторые результаты оптической обработки геологических данных // География и оптическая обработка информации в геологии. Л.: ФТИ АН СССР, 1980.
4. Сойфер В. А., Котляр В. В., Хонина С. Н. Оптический метод построения поля направлений // Автометрия. 1996. № 1. С. 31.
5. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2001.
6. Попов П. Г. Локальные анизотропные признаки изображений // Оптический журнал. 1994. № 2.
7. Попов П. Г., Борисова И. В. Практическое применение эффекта «отскока» в обработке изображений // Оптический журнал. 1999. № 4.
8. Сергеев В. В., Фролова Л. Г. Разработка и применение алгоритма цилиндрической полиномиальной аппроксимации изображения в скользящем окне // Автометрия. 1996. № 1. С. 22.
9. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1982.
10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Высш. шк., 1999.
11. Хорн Б. К. П. Зрение роботов. М.: Мир, 1989.
12. Путятин Е. П., Аверин С. И. Обработка изображений в робототехнике. М.: Машиностроение, 1990.

*Новосибирский государственный
технический университет,
E-mail: gruzman@ktor.ref.nstu.ru*

*Поступила в редакцию
13 марта 2003 г.*