

И.В.БОРИСОВА

**Спектральный и градиентные
методы определения перепада
яркости**

УДК 004.932.2

Филиал ОАО «ПО
«УОМЗ» - «Урал-
СибНИИОС»,
г. Новосибирск

Рассматривается зависимость между градиентными операторами выделения граничных точек и двумерным Фурье-преобразованием. Спектральный и градиентные методы используются для определения параметров локальных окрестностей изображения. Выделение контура рассматривается как разделение окрестностей на изотропные и анизотропные.

The relationship between gradient operators of extraction of boundary points and two-dimensional Fourier transform is considered. Spectral and gradient methods are used for determination of parameters of local vicinities of the image. The edge detection is considered as the division of vicinities on isotropic and anisotropic.

Ключевой вопрос задачи описания изображения и последующего обнаружения/распознавания объектов это выбор признаков. Наибольшее распространение в качестве признаков получили локальные неоднородности функции яркости или яркостные перепады. Модели неоднородности делятся на неоднородность первого рода - ступенчатые перепады яркости, разделяющие области с почти одинаковой яркостью, и неоднородность второго рода - точка изменения знака первой производной яркости. Наибольший интерес исследователей вызывает задача выделения ступенчатого перепада яркости [1]. В двумерном случае перепад яркости характеризуется углом наклона, высотой и ориентацией в плоскости координат. Пере-

пад существует, если его угол наклона и высота больше некоторого, заранее заданного порога.

Один из основных подходов к разработке надежных детекторов перепада, введенный Превитт в 1969 г., основывается на аппроксимации каждого локального окна (окрестности) изображения аналитической поверхностью. Метод аппроксимации локальной окрестности изображения аналитической поверхностью содержит три параметра: размер окна аппроксимации, параметрическая форма аппроксимирующей аналитической поверхности и критерий лучшего приближения поверхности к изображению. Например, выбор квадратного окна размером 3×3 , аппроксимация параметрической формы плоской поверхностью $z=ax+by+c$ и использование в качестве критерия наименьшей среднеквадратической ошибки приводит к приближению первой производной яркости изображения конечными разностями, т.е. к градиентным методам.

К градиентным методам относятся дифференциальные операторы и масочные операторы сопоставления с эталоном. Размеры окна обработки обычно выбираются 2×2 (оператор Робертса) и 3×3 , однако возможно и увеличение размера [3]. Тесная связь дифференциальных и масочных операторов, а также требования к правилам формирования масок градиентных операторов размером 3×3 были рассмотрены в [1,2]. Из наиболее известных операторов этим правилам удовлетворяют только маски операторов Превитт и Собела.

Дальнейшее развитие подход аппроксимации локальной окрестности аналитической поверхностью получил в фасетной модели Харалика и Ватсона [4]. Согласно фасетной модели, изображение разбивалось на двумерные фрагменты, в пределах которых функция яркости аппроксимировалась полиномиальной функцией нулевой, первой или второй степени по критерию наименьших квадратов. При аппроксимации полиномом первой степени каждому фрагменту изображения ставится в соответствие наклонная плоскость - фасет. Фасет составляет с горизонтальной плоскостью двугранный угол, который также как ступенчатый перепад яркости, характеризуется величиной угла наклона к горизонтали и ориентацией в плоскости координат.

Как указал Д.Габор [5], частотный спектр небольших участков, содержащих контуры объектов, оказывается анизотропным, т.е.

изображение имеет локально-анизотропную структуру. Величина угла наклона фасета к горизонтали характеризует степень анизотропии фрагмента изображения, для которого был построен фасет.

В данной работе рассматривается метод выделения перепадов яркости и определения параметров фасета на основе спектра Фурье локальной окрестности, а также взаимосвязь спектрального и градиентного подходов.

Градиентные методы

К градиентным методам относятся дифференциальные операторы и масочные операторы сопоставления с эталоном. В большинстве методов ограничиваются обработкой окном 2x2 или 3x3.

Дискретный массив изображения $V(k, l)$, $k, l = 0 \div r$ (r – размер окна) обрабатывается набором пространственных линейных операторов, или масок $\Psi_m(k, l)$, в результате чего получается набор градиентных функций

$$G_m(k, l) = V(k, l) \otimes \Psi_m(k, l),$$

где \otimes - пространственная свертка.

Затем для каждого элемента изображения градиентные функции $G_m(k, l)$ комбинируются нелинейным точечным оператором $\Theta\{G_m(k, l)\}$, обеспечивающим оценку величины градиента яркости.

Чтобы удовлетворять требованиям к правилам формирования масок 3x3, сформулированным в [1,2], маски должны иметь следующий вид:

$$\Psi_1 = \begin{bmatrix} A & 0 & -A \\ B & 0 & -B \\ A & 0 & -A \end{bmatrix}, \quad \Psi_2 = \begin{bmatrix} -A & -B & -A \\ 0 & 0 & 0 \\ A & B & A \end{bmatrix} \quad (1)$$

Этому виду соответствуют только маски операторов Превитт и Собела. Для оператора Превитт $A=1, B=1$. Для оператора Собела $A=1, B=2$.

От дифференциальных операторов Превитт и Собела легко перейти к трех- и пятиградационным операторам сопоставления с эталоном. Маски трехградационного оператора сопоставления с эталоном получаются при последовательном повороте на 45° маски

Ψ_1 оператора Превитт. Маски пятиградационного оператора получаются из маски оператора Собела аналогичным образом.

$$\Psi_1 = \begin{bmatrix} A & 0 & -A \\ B & 0 & -B \\ A & 0 & -A \end{bmatrix}, \quad \Psi_2 = \begin{bmatrix} 0 & -A & -B \\ A & 0 & -A \\ B & A & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Psi_3 = \begin{bmatrix} -A & -B & -A \\ 0 & 0 & 0 \\ A & B & A \end{bmatrix}, \quad \Psi_4 = \begin{bmatrix} -B & -A & 0 \\ -A & 0 & A \\ 0 & A & B \end{bmatrix}$$

Для дифференциальных операторов массив подчеркнутых контуров обычно формируют с помощью операторов, вычисляющих среднеквадратическое значение (SQR) или сумму абсолютных значений (ABS) градиентных функций:

$$\Theta\{G_m(k,l)\} = \left(\sum_m (G_m(k,l))^2 \right)^{1/2}, \quad \Theta\{G_m(k,l)\} = \sum_m |G_m(k,l)|, \quad m = 1,2$$

Для операторов сопоставления с эталоном градиент яркости определяется как максимальное значение по набору градиентных функций:

$$\Theta\{G_m(k,l)\} = \max_m \{G_m(k,l)\}, \quad m = \overline{1,4}$$

Решение о наличии контура принимается в результате сравнения амплитуды $\Theta\{G_m(k,l)\}$ с выбранным порогом.

Ориентацию контура для дифференциальных операторов можно получить из соотношения между вертикальной и горизонтальной составляющими градиентных функций:

$$\theta(k,l) = \text{arctg} \left[\frac{G_2(k,l)}{G_1(k,l)} \right],$$

а для операторов сопоставления с эталоном она соответствует направлению, при котором наблюдается максимальное значение градиента.

Таким образом, ориентация контура, получаемая при использовании пространственных дифференциальных операторов, непрерывна и лежит в интервале $-\pi/2 < \theta < \pi/2$. При использовании операторов сопоставления с эталоном ориентация определяется более грубо.

Возможно увеличение размеров окна пространственных операторов до 5-7 эл. Тем самым повышается помехоустойчивость, но возникает опасность обнаружения ложного контура и наблюдается расширение контуров.

Оператор на основе Фурье-преобразования

Двумерное дискретное преобразование Фурье $F(n_1, n_2)$ матрицы отсчетов изображения $V(k, l)$ определяется в виде двумерной свертки матрицы отсчетов изображения с матрицей F_{n_1, n_2} :

$$F(n_1, n_2) = F_{n_1, n_2} \otimes V,$$

$$F_{n_1, n_2} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \cos\left\{\frac{2\pi}{N}(n_1 \cdot 0 + n_2 \cdot 0)\right\} - & \cos\left\{\frac{2\pi}{N}(n_1 \cdot 0 + n_2(N-1))\right\} - \\ -j \sin\left\{\frac{2\pi}{N}(n_1 \cdot 0 + n_2 \cdot 0)\right\} & \dots -j \sin\left\{\frac{2\pi}{N}(n_1 \cdot 0 + n_2(N-1))\right\} \\ \vdots & \vdots \\ \cos\left\{\frac{2\pi}{N}(n_1(N-1) + n_2 \cdot 0)\right\} - & \dots \cos\left\{\frac{2\pi}{N}(n_1 + n_2)(N-1)\right\} - \\ -j \sin\left\{\frac{2\pi}{N}(n_1(N-1) + n_2 \cdot 0)\right\} & -j \sin\left\{\frac{2\pi}{N}(n_1 + n_2)(N-1)\right\} - \end{bmatrix},$$

где N - размерность матриц F и V , \otimes - оператор свертки, $j = \sqrt{-1}$.

Для нечетных N матрицы $F_{0,i}$ и $F_{i,0}$, $i = \overline{1, N-1}$ имеют вид:

$$F_{0,i} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} a_1 \cdots a_{N-1} & 1 & a_{N-1} \cdots a_1 \\ a_1 \cdots a_{N-1} & 1 & a_{N-1} \cdots a_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_1 \cdots a_{N-1} & 1 & a_{N-1} \cdots a_1 \end{bmatrix} - j \frac{1}{N} \begin{bmatrix} b_1 \cdots b_{N-1} & 0 & -b_{N-1} \cdots -b_1 \\ b_1 \cdots b_{N-1} & 0 & -b_{N-1} \cdots -b_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_1 \cdots b_{N-1} & 0 & -b_{N-1} \cdots -b_1 \end{bmatrix}$$

$$F_{i,0} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} a_1 & a_1 & \dots & a_1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{a_{N-1}}{2} & \frac{a_{N-1}}{2} & \dots & \frac{a_{N-1}}{2} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \frac{a_{N-1}}{2} & \frac{a_{N-1}}{2} & \dots & \frac{a_{N-1}}{2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_1 & a_1 & \dots & a_1 \end{bmatrix} - j \frac{1}{N} \begin{bmatrix} b_1 & b_1 & \dots & b_1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{b_{N-1}}{2} & \frac{b_{N-1}}{2} & \dots & \frac{b_{N-1}}{2} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{b_{N-1}}{2} & -\frac{b_{N-1}}{2} & \dots & -\frac{b_{N-1}}{2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -b_1 & -b_1 & \dots & -b_1 \end{bmatrix},$$

где $2 \sum_{t=1}^{(N-1)/2} a_t = -1$.

Легко заметить, что мнимые части матриц удовлетворяют правилам формирования масок градиентных операторов (1).

Для преобразования Фурье при $N=3$ мнимая часть матриц F_{n_1, n_2} , $n_1, n_2 = \overline{0, 2}$, за исключением матрицы $F_{0,0}$, с точностью до коэффициента есть маски трехградационного оператора сопоставления с эталоном. Реальная часть матриц представляет собой отклик Лапласиана на идеальную линию единичной ширины, использующийся в качестве детектора линий.

Для того чтобы выяснить какое влияние оказывает добавка в виде реальной части на определение степени анизотропии и ориентации окрестности, рассмотрим следующий оператор:

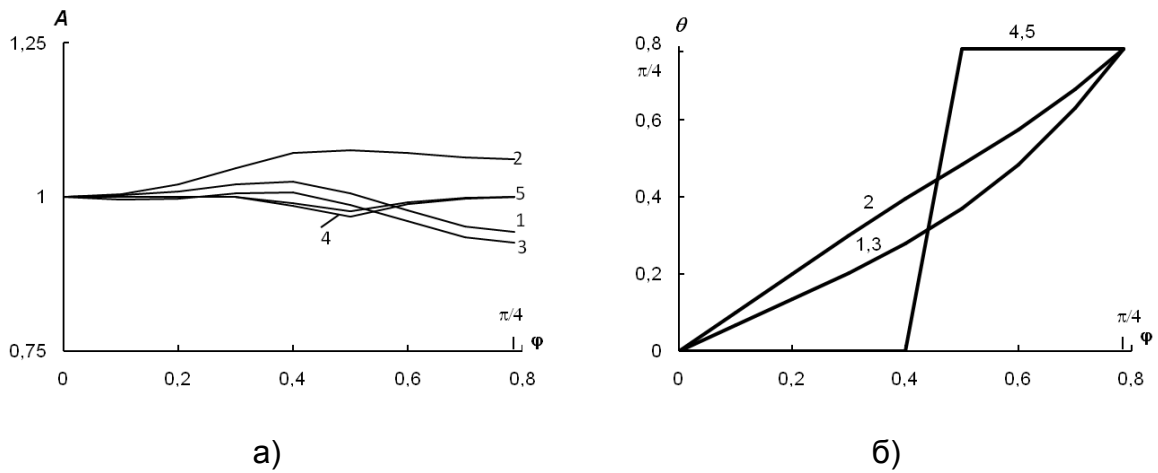
$$G_1^F = \sqrt{\sum_{i=1}^{N-1} (V \otimes F_{0,i})^2}, G_2^F = \sqrt{\sum_{i=1}^{N-1} (V \otimes F_{i,0})^2} \quad (2)$$

Для $N=3$

$$G_1^F = \sqrt{(V \otimes F_{0,1})^2 + (V \otimes F_{0,2})^2} = \sqrt{2(V \otimes \operatorname{Re} F_{0,1})^2 + 2(V \otimes \operatorname{Im} F_{0,1})^2}$$

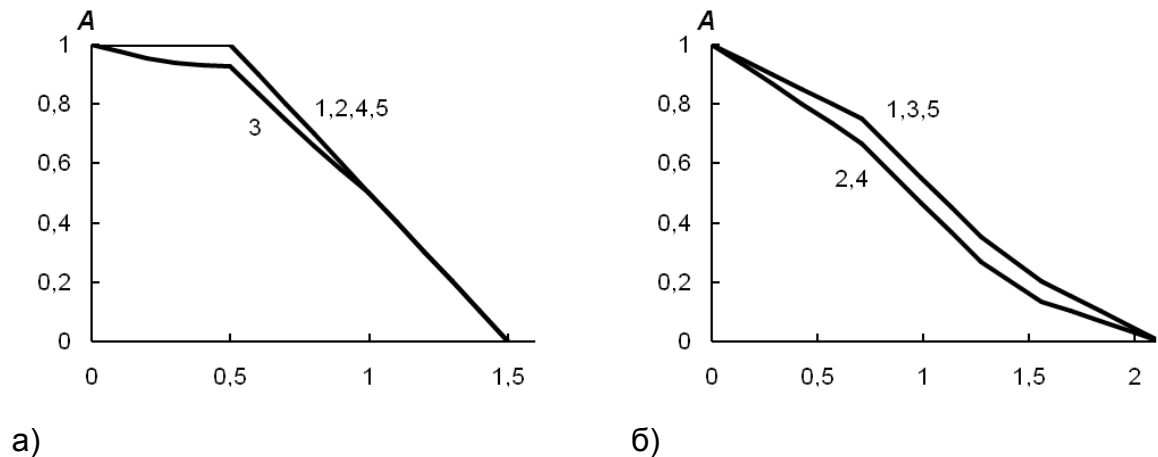
$$G_2^F = \sqrt{(V \otimes F_{1,0})^2 + (V \otimes F_{2,0})^2} = \sqrt{2(V \otimes \operatorname{Re} F_{1,0})^2 + 2(V \otimes \operatorname{Im} F_{1,0})^2}$$

В [1] был проведен анализ чувствительности градиентных операторов к изменению ориентации идеального ступенчатого перепада и его смещению относительно центра окна. Сравним оператор (2) с известными градиентными операторами.



а) амплитудного отклика на градиент
 б) оценки ориентации окрестности: 1 - Превитт, 2 - Собел, 3 - G^F , 4 - 3-градационный оператор, 5 - 5-градационный оператор
 Рис.1. Зависимость от истинной ориентации перепада

На рис.1 показана зависимость амплитудного отклика на градиент A ($A = \sqrt{\sum_m (G_m(k,l))^2}$) и оценки ориентации окрестности θ от истинной ориентации перепада φ . На рис.2 показана зависимость амплитудного отклика на градиент A от смещения перепада относительно центра окна (d) при горизонтальной и диагональной ориентации перепада. Значение амплитудного отклика нормировано на значение отклика для горизонтального перепада.



а) горизонтальный перепад; б) диагональный перепад: 1 - Превитт, 2 - Собел, 3 - G^F , 4 - 3-градационный оператор, 5 - 5-градационный оператор.

Рис. 2. Зависимость амплитудного отклика на градиент от смещения перепада относительно центра окна

Таким образом, также как градиентные методы оператор G^F обладает свойством относительной независимости амплитудной характеристики от истинной ориентации перепада, а оцененная ориентация перепада близка к истинной и совпадает с оценкой, полученной оператором Превитт.

Влияние реальной части проявляется в том, что при смещении горизонтально ориентированного перепада относительно центра окна амплитудный отклик на градиент оператора G^F убывает и при $d < 0,5$. Амплитудный отклик для диагонального перепада совпадает с откликом оператора Превитт и масочных операторов.

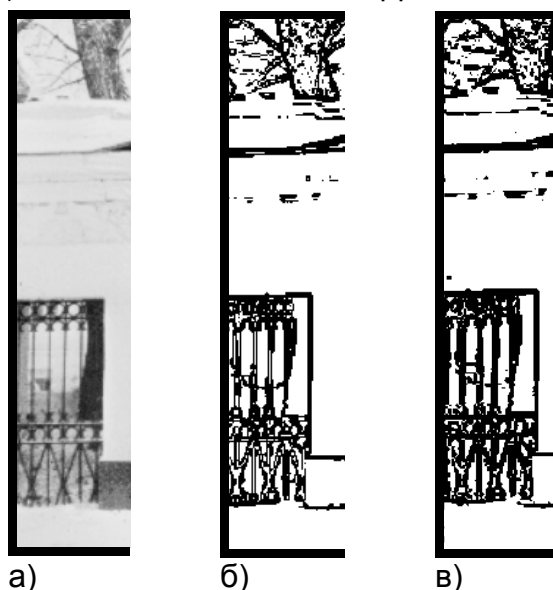
Рассмотрение влияния реальной и мнимой частей разложения Фурье на выделение перепадов яркости и проведенный количественный анализ показывают, что выделение перепадов определяется преимущественно видом мнимой части разложения Фурье.

Аналогично, на основе Фурье-преобразования можно построить оператор сопоставления с эталоном, введя еще 2 направления. Однако квадратная форма окна приводит к тому, что диагональные направления оказываются в неравноправном положении с вертикалями и горизонталями. Поэтому необходимо проводить дополнительное определение ориентации.

Что касается качества выделенного контура, то наличие в матрицах градиентных операторов центральных нулевых элементов приводит к появлению разрывов в середине выделенного контура тонких контрастных деталей. Оператор, построенный на основе Фурье-разложения, свободен от этого недостатка и дает контур с меньшим количеством точек разрыва. Пример построения контурного препарата приведен на рис. 3.

Следует отметить, что оператор G^F вводился автором не столько для бинаризации изображений, сколько для анализа локальных окрестностей и разбиения их на классы в зависимости от ориентации [6], и использовался в задачах обнаружения объектов. В зависимости от размеров интересующих объектов рассматривались операторы размером до 8×8 эл. Несмотря на дискретность значений ориентации перепада, определяемой операторами сопоставления с эталоном, этого вполне достаточно для разделения окрестностей на 4 анизотропных класса ($0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ к горизонтали). Для авто-

матического выбора порога, разделяющего изотропные и анизотропные окрестности, использовался метод отскока [6].



а) исходное изображение; б) оператор Превитт; в) оператор на основе Фурье-преобразования

Рис.3. Выделение контурного препарата

Литература

1. Бакут П.А., Колмогоров Г.С. Сегментация изображений: методы выделения границ областей // Зарубежная радиоэлектроника.1987.№ 10.С.25-47.
2. Foglein J. On edge gradient approximations // Pattern Recognition Letters.1983.V.1, № 5-6.Р.429-434.
3. Абду И.Э., Прэтт У.К. Количественный расчет детекторов контуров, основанных на подчеркивании перепадов яркости с последующим пороговым ограничением // ТИИЭР.1979.т.67, №5. С.59-70.
4. Haralick R.M., Watson L. A facet model for image data // Computer Graphics and Image Processing.1981.V.15, №.2.Р.113-129.
5. Gabor D. The smoothing and filtering of two-dimensional images// Progress in biocybernetics.1965.V.2.
6. Попов П.Г., Борисова И.В. Практическое применение эффекта “отскока” в обработке изображений // Оптический журнал.1999. т.66, №4.С.94-101.

E-MAIL: RENE_SANS@MAIL.RU