

УДК 621.372.542

ИКОНИКА

КНИГА IV

АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

**РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ
НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ**

В. Ф. ЗАХАРЕНКОВ, М. В. СМИРНОВ

Одной из актуальных проблем автоматического анализа изображений с применением ЭВМ является задача распознавания объектов. Наибольшее распространение получили методы корреляционного сравнения с эталоном и методы согласованной пространственной фильтрации [1—3]. При решении задачи автоматического распознавания изображений в последнее время применяется также структурный или синтаксический подход к распознаванию объектов [4, 5]. Хотя этот метод отличается от традиционных, он включает в себя общепринятую процедуру предварительного преобразования, роль которого в большин-

стве случаев сводится к повышению качества анализируемых изображений [6].

Эффективность распознавания автоматической системой во многом зависит от условий регистрации изображений объектов. На практике изображения одного и того же объекта, полученные в разное время или различными датчиками, могут значительно отличаться одно от другого. Часто это обусловлено неравномерностью внешней освещенности, а также тенями от других объектов. Неравномерность освещенности связана с метеоусловиями, зависит от времени суток, сезонности съемки. Примером этого может служить регистрация изображений при проведении геолого-геофизических исследований.

Неравномерность внешней освещенности и чувствительности приемников приводит к непостоянству сигнала изображения одних и тех же объектов или участков местности. Для компенсации искажений интенсивности необходимо предварительное преобразование изображения. При этом качество предварительной обработки оказывает не меньшее влияние на эффективность распознавания, чем собственно алгоритм распознавания [7].

При распознавании изображений для компенсации неравномерной освещенности применяют такие методы, как согласованно-избирательная фильтрация [8], гомоморфная фильтрация [9, 10], нелинейное преобразование шкалы интенсивностей (эквализация) [11].

Наибольшее распространение получила согласованно-избирательная фильтрация. При ее использовании, как известно, распознаванию подлежат не сами объекты, а их контуры. Согласованные фильтры, применяемые при распознавании по контурам, получили также название градиентно-согласованных фильтров. Действие согласованного фильтра с передаточной функцией

$$H(\omega_x, \omega_y) = (\omega_x^2 + \omega_y^2) S^*(\omega_x, \omega_y), \quad (1)$$

где (ω_x, ω_y) — пространственные частоты, а $S^*(\omega_x, \omega_y)$ — комплексно-сопряженный спектр объекта $s(x, y)$, на изображение $g(x, y)$ эквивалентно последовательному воздействию на изображение $g(x, y)$ дифференциального оператора

$$\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2,$$

роль которого заключается в повышении контраста контуров на изображении и в фильтрации обычным согласованным фильтром.

Операция пространственного дифференцирования обеспечивает подавление постоянной составляющей сигнала изображения и устранение, тем самым, фоновой засветки. Вместе с тем метод не обеспечивает одинаковой интенсивности сигнала на контурах одних и тех же объектов при различных уровнях освещенности.

В основе гомоморфной фильтрации лежит предположение о том, что интенсивность изображения $g(x, y)$ приближенно равна произведению освещенности $E(x, y)$ на коэффициент отражения объектов $r(x, y)$:

$$g(x, y) = E(x, y) r(x, y). \quad (2)$$

Гомоморфная фильтрация, разработанная в рамках обобщенного принципа суперпозиции [10], предусматривает операцию логарифмирования:

$$\log g(x, y) = \log E(x, y) + \log r(x, y).$$

Отсюда видно, как гомоморфная обработка обеспечивает согласование мультипликативной структуры изображения (2) с линейной структурой фильтрации. Если компонента $E(x, y)$ сосредоточена в низкочастотной области спектра изображения, то линейная высокочастотная фильтрация позволяет выделять контуры объектов более или менее независимо

от освещенности. Таким образом, гомоморфная фильтрация эффективна только в том случае, когда изменение внешней освещенности представляет собой медленно изменяющуюся функцию.

Метод эквализации гистограммы интенсивности заключается в том, что функцию преобразования интенсивности подбирают таким образом, чтобы преобразованное изображение имело равномерную гистограмму распределения интенсивностей. Однако метод эквализации может приводить к значительным нелинейным искажениям формы сигнала $g(x, y)$.

Общим недостатком рассмотренных методов компенсации неравномерной освещенности является то, что они не обеспечивают приведение сигналов исследуемых объектов к одному масштабу по интенсивности относительно сигнала изображения эталонного объекта. Вместе с тем из корреляционного анализа известно, что для того чтобы несовпадение оптических параметров не оказывало влияние на процесс отождествления изображений, сравниваемые функции должны быть нормированы и центрированы. В этом случае вычисляется функционал (скользящий коэффициент корреляции)

$$A = (u, v) \frac{\sum_{x=1}^{L_1} \sum_{y=1}^{L_2} (s(x, y) - a_s)(g(x-u, y-v) - a_g)}{\sqrt{\sum_{x=1}^{L_1} \sum_{y=1}^{L_2} (s(x, y) - a_s)^2} \sqrt{\sum_{x=1}^{L_1} \sum_{y=1}^{L_2} (g(x-u, y-v) - a_g)^2}}, \quad (3)$$

где a_s и a_g — средние значения сигналов эталона $s(x, y)$ и текущего участка изображения $g(x, y)$ в пространственном интервале $[L_1 \times L_2]$, где L_1 и L_2 — линейные размеры эталона $s(x, y)$. Будем считать, что функцию интенсивности $g(x, y)$ можно представить в виде суммы

$$g(x, y) = \hat{g}(x, y) + N(x, y),$$

где $N(x, y)$ — функция случайного шума, $\hat{g}(x, y)$ — неискаженное шумом изображение. Однако на практике вычисление функционала (3) приводит к значительным затратам машинного времени. Положение усугубляется также неинвариантностью оператора (3) к повороту и масштабу.

Целью настоящей работы является разработка метода предварительного преобразования изображения, обеспечивающего компенсацию неравномерной освещенности. Он заключается в масштабировании величины сигнала исследуемого объекта относительно величины сигнала изображения эталонного объекта. При этом коэффициент масштабирования определяется с помощью разностного алгоритма корреляционного сравнения [12]. Рассмотрим этот алгоритм:

$$R(u, v) = \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{x=1}^{L_1} \sum_{y=1}^{L_2} [s(x, y) - g(x-u, y-v)]^2. \quad (4)$$

Для компенсации искажений интенсивности изображения $g(x, y)$ введем масштабный параметр $K(x, y)$. В этом случае выражение (4) примет вид

$$R(u, v) = \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{x=1}^{L_1} \sum_{y=1}^{L_2} [s(x, y) - K(u, v) g(x-u, y-v)]^2. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что задача сводится к минимизации этого функционала по параметру $K(u, v)$. Введем обозначение

$$R = \langle [S - Kg]^2 \rangle, \quad (5a)$$

где $\langle \cdot \rangle$ — операция пространственного усреднения по окрестности $[L_1 \times L_2]$. Оптимальное значение $K_{\text{опт}}$ можно получить, приравнявая

нулю производную $R(u, v)$ по параметру $K(u, v)$. Будем предполагать, что среднее значение шума равно нулю и он не коррелирован с сигналом $\hat{g}(x, y)$ [13], т. е.

$$\langle \hat{g}(x, y) N(x, y) \rangle = \langle \hat{g}(x, y) \rangle \langle N(x, y) \rangle = 0.$$

В итоге получим

$$K_{\text{опт}} = \langle sg \rangle / \langle g^2 \rangle. \quad (6)$$

Из (6) видно, что определение $K_{\text{опт}}$ предполагает корреляционное сравнение между собой эталона s и участка изображения g . Поэтому выражение (6) ненамного проще формулы (3). Можно показать, что функционал (5) стремится к $\langle N^2 \rangle$ как в случае (6), так и в случае

$$K = \langle s \rangle / \langle g \rangle. \quad (7)$$

Для этого преобразуем (5 а) к виду

$$R = \langle [s - Kg]^2 \rangle = \langle [s - K\hat{g}]^2 \rangle + K^2 \langle N^2 \rangle = \hat{R} + K^2 \langle N^2 \rangle,$$

где

$$\hat{R} = \langle [s - K\hat{g}]^2 \rangle. \quad (8)$$

При условии полного совпадения исследуемого объекта с эталоном функционал (8) обращается в нуль при подстановке как (6), так и (7). Следовательно, функционал (5) должен принимать приблизительно одинаковые значения в этих двух случаях, но вычисление параметра K по формуле (7) значительно проще. Последнее иллюстрируется на рис. 1. На рис. 1, а представлено изображение, зарегистрированное так, что на часть объектов падает тень. Эталоном при распознавании слу-



Рис. 1: а — исходное изображение, искаженное тенью; б — результат корреляционного сравнения с использованием формулы (6); б' — результат корреляционного сравнения с использованием формулы (7)

жит буква a (указана стрелкой) верхней строки печатного текста. Корреляция осуществляется с буквами нижней строки. Размерность $[L_1 \times L_2] = 16 \times 18$ дискретных элементов при полной размерности изображения 256×256 точек. Вычисление корреляции производится по формуле (5) и предусматривает определение обратной величины, т. е. $R^{-1}(u, v)$. На рис. 1, б приведен результат корреляционного сравнения

с использованием формулы (6), а на рис. 1, в — с использованием формулы (7). Сравнение результатов эксперимента, представленных на рис. 1, б и рис. 1, в, показывает, что результаты вычисления функционала (5) при K_{opt} и $K = \langle s \rangle / \langle g \rangle$ практически одинаковы. Следовательно, в качестве процедуры предварительного преобразования изображения целесообразно масштабирование интенсивности исходного изображения путем умножения на коэффициент, определяемый формулой (7):

$$\tilde{g}_m(x, y) = K(x, y) g(x, y) = a_s g(x, y) / a_g(x, y), \quad (9)$$

где

$$a_s = \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{x=1}^{L_1} \sum_{y=1}^{L_2} s(x, y),$$

$$a_g(u, v) = \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{x=1}^{L_1} \sum_{y=1}^{L_2} g(x-u, y-v).$$

Результаты преобразования (9) показаны на рис. 2. На рис. 2, а сюжет искажен тенью, а на рис. 2, б представлено изображение, преобразованное по формуле (9).

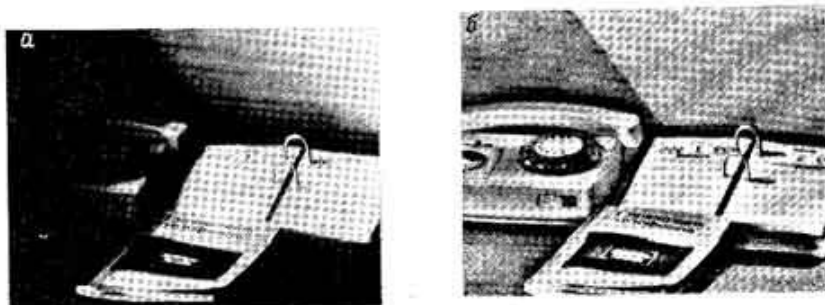


Рис. 2: а — исходный сюжет, искаженный тенью; б — изображение, преобразованное по формуле (9)

Таким образом, при использовании предлагаемого метода распознавания анализируемое изображение сначала преобразуется по формуле (9), а затем фильтруется согласованно-избирательным фильтром (1). Преимущества этого метода иллюстрируются на рис. 3 и 4. На рис. 3, а показано исходное изображение, а на рис. 3, б — результат согласованно-избирательной фильтрации без предварительного преобразования. На рис. 4, а представлено изображение, преобразованное по формуле (9), а на рис. 4, б — результат согласованно-избирательной фильтрации. Эксперименты предусматривали определение отношения сигнал/шум ψ на выходе согласованно-избирательного фильтра при изменении относительного динамического диапазона ΔG_0 сигнала изображения на входе фильтра. Текущий динамический диапазон на объекте определяется формулой

$$\Delta G_T = (g_{\max}(x, y) - g_{\min}(x, y)) / B$$

по окрестности $[L_1 \times L_2]$, где $B = 256$ — число уровней квантования интенсивности $g(x, y)$. Относительный динамический диапазон определяется как

$$\Delta G_0 = \Delta G_r / \Delta G_s,$$

где ΔG_s — динамический диапазон сигнала на эталонном объекте. Из сравнения рис. 3, б и 4, б ясно, что пики корреляции на рис. 3, б при снижении динамического диапазона до $\Delta G_0 = 0,3$ не превышают значений шумовых сигналов. Отношение сигнал/шум определялось по фор-



Рис. 3: а — исходное изображение текста, искаженное тенью; б — результат согласованно-избирательной фильтрации без предварительного преобразования



Рис. 4: а — изображение текста, преобразованное по формуле (9); б — результат согласованно-избирательной фильтрации после предварительного преобразования

муле $\psi = \xi^2 / \sigma^2$, где ξ — пиковое значение, совпадающее с положением искомого объекта; σ^2 — дисперсия реализации на выходе фильтра.

На рис. 5 показана зависимость $\sqrt{\psi(\Delta G_0)}$ для двух случаев: обычной согласованно-избирательной фильтрации и согласованно-избирательной фильтрации с предварительной обработкой по формуле (9). Из графика следует, что предложенный подход в условиях снижения динамического диапазона сигнала обеспечивает повышение отношения сигнал/шум на выходе согласованно-избирательного фильтра. При половинном значении относительного динамического диапазона, т. е. при $\Delta G_0 = 1/2$, достигается увеличение отношения сигнал/шум в 2,4 раза.

Метод согласованно-избирательной фильтрации обеспечивает центрирование сигнала исходного изображения $g(x, y)$. В том случае, когда используются другие методы распознавания, например обычная согласованная фильтрация или методы, основанные на структурном подходе, необходимо предусмотреть центрирование значений интенсивности $g(x, y)$. В этом случае масштабный коэффициент $K(x, y)$ определяется по формуле $K = \sigma_s / \sigma_g$, где σ_s^2 и σ_g^2 — дисперсии эталонного и анализируемого участков изображения соответственно.

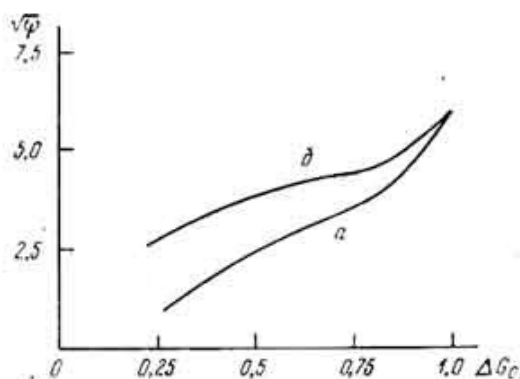


Рис. 5. Графики отношения сигнал/шум на выходе согласованно-избирательного фильтра при изменении динамического диапазона сигнала изображения; а — обычная согласованно-избирательная фильтрация, б — согласованно-избирательная фильтрация с предварительной обработкой по формуле (9)

Выводы

Метод предварительного преобразования изображения обеспечивает существенное повышение отношения сигнал/шум при распознавании объектов в условиях неравномерной освещенности. Достигается повышение эффективности согласованно-избирательной фильтрации. Эта эффективность выражается в увеличении отношения сигнал/шум более чем в 2 раза при снижении динамического диапазона до 0,5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Монахан М. А., Бромли К., Боккер Р. П. Некогерентные оптические корреляторы. — ТИИЭР, 1977, т. 65, № 1, с. 148—157.
2. Ван дер Люгт А. Когерентная оптическая обработка информации. — ТИИЭР, 1974, т. 62, № 10, с. 5—28.
3. Кейсесент Д., Платис Д. Новые методы оптических преобразований для распознавания образов. — ТИИЭР, 1977, т. 65, № 1, с. 92—100.
4. Горелик А. Л., Гуревич И. Б., Скрипкин В. А. Современное состояние проблемы распознавания. М.: Радио и связь, 1985. 160 с.
5. Parvin B. A structural classifier for ship targets. — 7th International Conference on Recognition, Montreal, 1984, vol. 1, p. 550—552.
6. Шафер У. Ф. Методы обработки, улучшающие качество изображений. — ТИИЭР, 1978, т. 66, № 1, с. 61—75.
7. Баблицкий В. К., Бочкарев А. М., Мусьяков М. П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. М.: Радио и связь, 1986. 216 с.
8. Василенко Г. И., Цибулькин Л. М. Голографические распознающие устройства. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.