

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 519.67 : 681.327.12 : 629.78

В. С. Киричук, Н. С. Яковенко

(Новосибирск)

АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОИСКА
МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Предложен алгоритм поиска точечных объектов на цифровых изображениях, получаемых сканирующими линейками. Описана методика, базирующаяся на методе максимального правдоподобия и сводящаяся к двукратной фильтрации изображения одномерными фильтрами: вдоль оси сканирования фильтром с постоянными коэффициентами, а в ортогональном направлении адаптивным фильтром, учитывающим взаимное расположение объекта и датчиков. Приведены результаты применения методики на модельных и реальных данных.

Постановка задачи. Пусть $D(x_i, y_j)$ — изображение, получаемое сканированием анализируемой сцены фотоприемной линейкой. Предполагаем, что линейка ориентирована по оси X и содержит N элементов ($x_i, i = 1, N$ — координаты центров элементов, N — их число), перемещение линейки осуществляется по оси Y и в заданных координатах $y_j, j = 1, M$, происходит опрос всех датчиков линейки (M — число опросов). Специфика поиска малоразмерных (точечных) объектов на цифровых изображениях обусловлена тем, что форма объекта изменяется в зависимости от расположения объекта относительно датчиков линейки. Под точечным понимается объект, геометрические размеры проекции которого на поверхность сканирующей линейки порядка размеров датчика линейки. В первую очередь изменение формы зависит от смещения центра объекта от центра датчика вдоль оси линейки. Например, при расположении центра объекта в точке $(x_{i-1} + x_i)/2$ (рис. 1, *a*) датчики с номерами $i - 1$ и i регистрируют одинаковый сигнал, а при его расположении в точке x_i (рис. 1, *b*) значительная часть энергии объекта попадает в i -й датчик.

Изменение отклика объекта вдоль направления сканирования существенно слабее зависит от отклонения центра объекта от центра датчика. В силу физических свойств датчиков и при наличии интегральных звеньев в системе «предварительной» обработки в реальных системах происходит «рас-

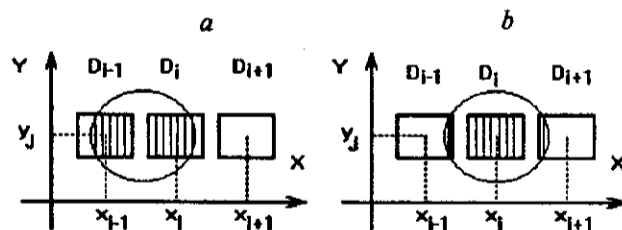


Рис. 1

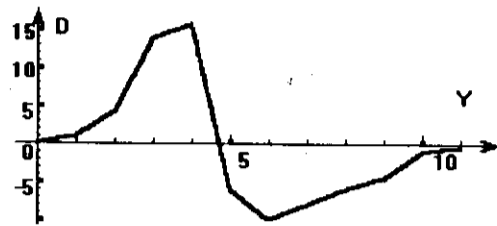


Рис. 2

тягивание» отклика от объекта на 10—20 отсчетов. На рис. 2 приведено типичное изменение «яркости» сигнала вдоль направления сканирования. Этими же свойствами определяется и анизотропность поведения статистических характеристик анализируемых сцен: корреляция значений отсчетов вдоль оси Y существенно более значима, чем вдоль оси X .

В первом приближении отклик $D(x_i, y_j)$ системы регистрации на случайную сцену, содержащую точечные объекты, можно представить в виде

$$D(x_i, y_j) = b + \sum_{l=1}^k a_l f_l(x_i - \xi_l, \delta_l, y_j - \eta_l) + h(x_i, y_j), \quad (1)$$

где (x_i, y_j) — координаты узлов дискретной решетки, в которых регистрируется изображение; b — среднее значение сигнала; k — число отыскиваемых объектов; f_l — дискретная функция, описывающая форму отклика на l -й объект; a_l — амплитуда отклика; ξ_l, η_l — координаты узла ближайшего к центру l -го объекта; δ_l — отклонение по оси X центра объекта от ближайшего узла; $(-\Delta x/2 \leq \delta_l < \Delta x/2, \Delta x$ — расстояние между датчиками); $h(x_i, y_j)$ — результат преобразования исходной сцены системой регистрации.

Как показывает опыт работы с реальными сканирующими системами различных типов, допустимыми являются предположения о разделимости описания объекта и корреляционной функции K_h :

$$f_l(x_i - \xi_l, \delta_l, y_j - \eta_l) \approx \varphi(x_i - \xi_l, \delta_l) \psi(y_j - \eta_l), \quad K_h = K_x \otimes K_y, \quad (2)$$

где \otimes — символ прямого кронекеровского произведения; функции $\varphi(x_i - \xi_l, \delta_l)$ описывают изменения яркости отклика по оси X ; $\psi(y_j - \eta_l)$ — по оси Y .

При такой математической модели сигнала необходимо по измерениям $D(x_i, y_j)$ проверить гипотезу о наличии объектов на анализируемой сцене, а при ее выполнении определить местоположения и амплитуды объектов.

Критерий. Классический подход к проблеме обнаружения объектов [1] заключается в проверке в каждой точке поля гипотезы H_0 об отсутствии объекта при альтернативе его наличия. При сделанных предположениях описание объекта имеет вид:

$$D_i = bI + \alpha \psi \varphi_i(\delta) + h_i,$$

где $D_i = \begin{Bmatrix} D_{i1} \\ \vdots \\ D_{in} \end{Bmatrix}$, $\psi = \begin{Bmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_n \end{Bmatrix}$, $\varphi_i(\delta) = \varphi(x_i - \xi_l, \delta_l)$, $h_i = \begin{Bmatrix} h_{i1} \\ \vdots \\ h_{in} \end{Bmatrix}$, I — единичный вектор; n — число точек по оси Y в описании объекта, находящегося в центре анализируемого фрагмента. В силу предположения (2)

$$M(h_i h_j^T) = \rho_x(|i - j|) K_y, \quad (3)$$

где $\rho_x(|i - j|) = \{K_x\}_{ij}$.

Для шумов, подчиняющихся экспоненциальным распределениям [2], РНМ-критерий строится на оценке амплитуды объекта. Несложно показать, что ММП приводит к оценкам:

$$\hat{a}_i = a\varphi_i(\delta) = (\hat{\psi}^T K_y^{-1} \hat{\psi})^{-1} \hat{\psi}^T K_y^{-1} D_i, \quad (4)$$

где $\hat{\psi} = \psi - \bar{\psi}I$.

Оценки a_i , $i = \overline{1, m}$ (m — число точек в описании объекта по оси X), в матричном виде принимают вид:

$$\hat{A} = \varphi(\delta)a + \xi, \quad M(\xi\xi^T) = (\hat{\psi}^T K_y^{-1} \hat{\psi})^{-1} K_x, \quad (5)$$

где $\{\hat{A}\}_i = \hat{a}_i$, $\{\varphi(\delta)\}_i = \varphi_i(\delta)$, $\{\xi\}_i = \xi_i = (\hat{\psi}^T K_y^{-1} \hat{\psi})^{-1} \hat{\psi}^T K_y^{-1} D_i$, и оценка амплитуды объекта определяется соотношением

$$\hat{a} = (\varphi^T(\delta) K_x^{-1} \varphi(\delta))^{-1} \varphi^T(\delta) K_x^{-1} \hat{A},$$

где δ находится из нелинейного уравнения:

$$\{\hat{A}^T K_x^{-1} \varphi'(\delta)\} \{\varphi^T(\delta) K_x^{-1} \varphi(\delta)\} = \{\varphi^T(\delta) K_x^{-1} \hat{A}\} \{\varphi^T(\delta) K_x^{-1} \varphi'(\delta)\}. \quad (6)$$

Нормированная оценка

$$W = \hat{a} / \sqrt{(\varphi^T K_x^{-1} \varphi)(\hat{\psi}^T K_y^{-1} \hat{\psi})} \in N(0, \sigma^2)$$

является статистикой, которая подлежит сравнению с выбранным пороговым уровнем.

Алгоритм. Таким образом, предлагаемая методика заключается в фильтрации изображения по оси Y одномерным фильтром с постоянными коэффициентами $\psi_i^* = \{K_y^{-1} \hat{\psi}\}_i / \sqrt{\hat{\psi}^T K_y^{-1} \hat{\psi}}$, а затем для полученного поля откликов D^* осуществляется фильтрация адаптивным фильтром $\varphi_i^* = \{K_x^{-1} \varphi(\delta)\}_i / \sqrt{\varphi^T(\delta) K_x^{-1} \varphi(\delta)}$, при этом параметр δ (смещение относительно центра) находится из решения нелинейного уравнения (6). В общем случае использование такого подхода, особенно в системах реального времени, вряд ли оправдано из-за большого объема вычислений. Для этих ситуаций в [3] описан подход, основанный на разложении возможных описаний объекта в ряд по собственным функциям и сводящийся к процедурам многоканальной линейной фильтрации. Однако для поиска точечных объектов, когда ширина отклика составляет 2—3 линейных размера датчика, вычислительная процедура резко упрощается. Как следует из соотношений (5) и (6), решение нелинейного уравнения инвариантно относительно изменения масштаба d_i^* и смещения на константу, т. е. если δ есть решение для набора $\{d_{-1}^*, d_0^*, d_1^*\}$ (центр объекта находится во 2-м датчике), то то же самое значение δ является решением и для $\{1, 0, \gamma_j\}$, где $\gamma_j = (d_{1j}^* - d_{0j}^*) / (d_{-1j}^* - d_{0j}^*)$, за исключением вырожденных случаев $d_{-1j}^* - d_{0j}^* = 0$, которые достаточно просто рассмотреть отдельно. Следовательно, решение уравнения (6) зависит только от величины γ_j и при задании таблично с требуемой точностью зависимости δ от γ снимается необходимость решения уравнения (6).

Экспериментальные результаты. Программная реализация предложенного алгоритма осуществлялась для задачи поиска точечных объектов на изображениях в ИК-диапазоне. Максимальный по ширине отклик на объект составлял три линейных размера датчика. Зависимость формы объекта от смещения δ достаточно хорошо аппроксимировалась выражениями:

$$\varphi_{-1}(\delta) = (0,5 - \delta)^2/2, \quad \varphi_0(\delta) = 0,75 - \delta^2, \quad \varphi_1(\delta) = (0,5 + \delta)^2/2. \quad (7)$$

Таблица 1

δ	0	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$
v постоянного фильтра	1,03	1,03	1,04	1,06	1,09	1,14
v адаптивного фильтра	1,03	1,04	1,06	1,11	1,21	1,41

В табл. 1 приведена теоретическая зависимость «качества» фильтрации от δ . Под качеством в данном случае принято изменение отношения сигнал/шум v . В первой строке таблицы приведены значения v при использовании фильтра с постоянными коэффициентами:

$$\varphi_{-1}(0) = 0,125,$$

$$\varphi_0(0) = 0,75,$$

$$\varphi_1(0) = 0,125,$$

а во второй строке для сравнения — при использовании адаптивного фильтра (7).

Проверка работоспособности и эффективности алгоритма также осуществлялась на модельных и экспериментальных данных.

Моделировалось двумерное

случайное поле, на которое нанесена 1000 точечных объектов с отношением $w = \text{«энергия объекта/шум»}$, равным 4, т. е.

$$\sum_i \sum_j a_i \varphi(x_i - x_j, \delta_i) \psi(y_j - \eta_j) / \sigma_{\text{шума}} = 4.$$

После проведения фильтрации по оси Y

$$w = \sum_i \hat{a}_i \varphi(x_i - x_i, \delta_i) / \sigma_{\text{шума}} \approx 6,7,$$

что эквивалентно диапазону отношения «сигнал/шум» $\approx 3,4 + 5,0$. Проведение адаптивной фильтрации по оси X позволило увеличить это отношение до $4,7 + 5,2$ и достаточно надежно выделить объекты. В табл. 2 приведена зависимость вероятности пропуска объектов α от вероятности ложной тревоги β для трех алгоритмов — пороговое выделение объектов, поиск объектов фильтром с постоянными коэффициентами и адаптивным фильтром.

ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что предлагаемый алгоритм обладает более высокой вероятностью обнаружения, но при этом требует более сложной системы обработки. Поэтому его использование оправдано в системах, где «стоимость» пропуска объекта достаточно высока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. — М.: Мир, 1982.
2. Леман Э. Проверка статистических гипотез. — М.: Наука, 1964.
3. Киричук В. С. Многоканальная линейная фильтрация // Автометрия. — 1988. — № 3.

Поступила в редакцию 14 января 1994 г.