реализации измерителя. Кроме того, найденные формулы для характеристик оценки (7), (8), (12), (13) позволяют сформулировать требова-

2. Нечаев Е. П., Трифонов А. П. Оценка площади пропадающего оптического изображения на фоне шумов // Автометрия.— 1987.— № 3.
3. Федосеев В. И., Широков В. Ф. Обнаружение и оценка положения источника сигнала, модулирующего пуассоновское случайное поле // Изв. вузов. Сер. Радиофизика.— 1975.— 18, № 2.
4. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника.— М.: Радио и связь, 1982.
5. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех.— М.: Радио и связь, 1986.
6. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех.— М.: Сов. радио, 1978.

Поступила в редакцию 22 июля 1988 г.

УДК 519.68

В. А. ГОРОХОВАТСКИЙ, В. И. СТРЕЛЬЧЕНКО

(Харьков)

ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ

В системах технического зрения распространены алгоритмы анализа изображений, основанные на иерархическом подходе [1]. Характерной особенностью этого подхода является сжатие информации на каждом уровне иерархии. На нижнем уровне осуществляется отображение изображения на множество локальных признаков, характеризующих изображение на некоторых участках. На других уровнях на основе топологического анализа преобразуются и интерпретируются наборы признаков предыдущих уровней. Иерархический подход позволяет создать эффективные по быстродействию и помехозащищенности алгоритмы с высоким уровнем распараллеливания.

В [2] предложен алгоритм для выделения из фона объектов, характеризующихся скачком градиента на границе. В этом алгоритме на нижнем уровне иерархии обработка двумерного изображения сведена к одномерной. Основной операцией при этом является выделение (обнаружение) участка одномерного сигнала, принадлежащего объекту. Решение о наличии сигнала принимается по величине скачка первой производной в граничных точках объекта. Простейшим фильтром, реализующим эту процедуру, является дифференциальный согласованный фильтр [3]. К его недостаткам следует отнести неустойчивость к флуктуационным шумам и жесткую избирательность к длине обнаруживаемого сигнала. Устранить эти недостатки можно введением в этот фильтр низкочастотного сглаживающего фильтра, обеспечивающего заданное соотношение сигнал/шум на выходе. Отклик фильтра на сигналы заданной длительности должен превышать некоторый порог.

Настоящая работа посвящена обоснованию алгоритма выделения одномерных сигналов как признаков объектов на основе статистических решающих правил.

Одномерный сигнал, полученный в результате развертки изображения, можно представить в виде аддитивной смеси функции яркости и флуктуационного шума, т. е.

$$S(x)=S_0(x)+n(x), \tag{1}$$

где $n(x)$ — дельта-коррелированный гауссов процесс. В силу физических свойств изображения $S_0(x)$ — гладкая функция, имеющая скачки градиента в точках, соответствующих краям объектов, теней и областей, где коэффициент отражения резко меняется.

Введем некоторые определения.

1. Граничными точками функции яркости $S_0(x)$ будем называть точки локального экстремума производной $S_0'(x)$, в которых выполняется условие $|S_0'(x)|\geqslant\delta_1$, где δ_1 — порог.

2. Локальным контрастом функции яркости в точке x будем называть функцию

$$q(x,h)=\max_{x_1,x_2\in(x-h,x+h)}|S_0(x_1)-S_0(x_2)|.$$

Величина локального контраста определяет перепад функции яркости в заданном интервале длиной $2h$.

3. Соотношением сигнал/шум по контрасту в окрестности граничной точки назовем функцию

$$\mu_q(x,\ h)=q(x,\ h)/\sigma,$$

где σ — среднеквадратичное отклонение шума $n(x)$.

4. Соотношение сигнал/шум по амплитуде определим как функцию

$$\mu_A(x,h)=\max_{y\in(x-h,x+h)}|S_0(y)|/\sigma.$$

Рассмотрим фильтр для выделения фрагментов объектов, характеризующихся разнополярными скачками первой производной на краях. Импульсная функция отклика (ИФО) такого фильтра имеет вид

$$\begin{aligned}&\varphi_2(x)=\varphi_1(x-l_0/2)-\varphi_1(x+l_0/2);\\&\varphi_1(x)=D\varphi_0(x),\end{aligned} \tag{2}$$

где l_0 — средний размер длительностей выделяемых фрагментов; D — оператор дифференцирования; $\varphi_0(x)$ — ИФО низкочастотного фильтра. Функцию $\varphi_0(x)$ выберем такой, чтобы при входном сигнале с соотношением сигнал/шум μ_q, удовлетворяющим условию $\mu_q(x,\ h)\geqslant\mu_q{}^0$, $x\in\Gamma$ (Γ — множество граничных точек), на выходе фильтра $\varphi_2(x)$ во всех точках, соответствующих граничным, выполнялось неравенство $\mu_A(x,\ h)\geqslant\mu_A{}^0$. Величины $\mu_q{}^0$, $\mu_A{}^0$ — это заданные нижние пределы соотношений сигнал/шум.

Для всех длительностей фрагментов, лежащих в интервале ($l_{\min}$, $l_{\max}$), модуль отклика фильтра φ_2 в заданной точке x^0 должен превышать порог δ_2, т. е.

$$|S_0(x^0)*\varphi_2(x)|\geqslant\delta_2,$$

где $*$ — символ операции свертки. Порог δ_2 определяет наличие фрагментов заданной длительности в точке x^0.

Проанализируем соотношение сигнал/шум на выходе фильтра $\varphi_1(x)$. В точках, соответствующих граничным,

$$\mu_A^1(x,h)=\frac{|S_0(x)*D\varphi_0(x)|}{\sigma\left(\int\limits_{-\infty}^{+\infty}[D\varphi_0(x)]^2\,dx\right)^{1/2}}.$$

Учитывая, что $S_0(x)*D\varphi_0(x)\equiv DS_0(x)*\varphi_0(x)$, а также низкочастотный характер пространственного спектра изменений яркости фона, на котором наблюдается объект, считаем справедливым приближенное равенство

$$\mu_A^1(x,h)\approx\frac{q(x,h)\,\varphi_0(0)}{\sigma\left(\int\limits_{-\infty}^{\infty}[D\varphi_0(x)]^2\,dx\right)^{1/2}}=\mu_q(x,h)\,\varphi_0(0)\Bigg/\left(\int\limits_{-\infty}^{\infty}[D\varphi_0(x)]^2\,dx\right)^{1/2}. \quad (3)$$

Аналогично на выходе фильтра с ИФО $\varphi_2(x)$ при длине фрагмента l_0

$$\mu_A^2(x^0,h)\approx\frac{\left[q\left(x^0-l_0/2,h\right)+q\left(x^0+l_0/2,h\right)\right]\varphi_0(0)}{\sigma\left(\int\limits_{-\infty}^{\infty}\varphi_2^2(x)\,dx\right)^{1/2}}. \quad (4)$$

Принятие решения о наличии локального признака (фрагмента заданных размеров) производим по превышению порогового значения.

Так как фрагмент, определяемый двумя граничными точками, имеет в этих точках производные с разными знаками в зависимости от того, что ярче: объект или фон, отклик фильтра может быть положительным или отрицательным.

Как видно, фильтр (2) сглаживает флуктуационные шумы и обладает требуемой избирательностью по длине одномерных фрагментов. Одновременно он обладает устойчивостью к малоконтрастным перепадам яркости и простотой реализации. Соотношения сигнал/шум $\mu_A{}^1$, $\mu_A{}^2$ на выходе фильтров φ_1, φ_2 могут быть получены по формулам (3), (4) через исходный контраст объектов.

Рассмотрим на основе статистического анализа процедуру выбора порогов, которые используются для принятия решений на выходе фильтров с ИФО $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$. Если шум $n(x)$ в модели (1) имеет нулевое математическое ожидание и дисперсию σ^2, то в силу линейности преобразований дисперсии на выходе фильтров φ_1 и φ_2 можно определить как $\sigma_1{}^2=a\sigma^2$, $\sigma_2{}^2=2a\sigma^2$ (предполагаем, что значения отклика фильтра φ_1 на расстоянии l_0 не коррелированы), где $a=\int\limits_{-\infty}^{\infty}[D\varphi_0(x)]^2\,dx$.

Математическое ожидание откликов фильтра φ_1 в точках, соответствующих граничным, определим через математическое ожидание величин локального контраста. Пусть

$$m_1\approx\varphi_0(0)\underset{x\notin\Gamma_+}{M}\{q(x,h)\},\ m_2=0\quad(x\notin\Gamma),$$

$$m_3\approx-\varphi_0(0)\underset{x\in\Gamma_-}{M}\{q(x,h)\},$$

причем $\Gamma=\Gamma_+\cup\Gamma_-$, где $M\{\cdot\}$ — операция математического ожидания, Γ_+ и Γ_- — множества граничных точек с положительными и отрицательными значениями отклика. Положим вероятность принадлежности точки x множеству Γ_+ равной p_1, множеству Γ_- — p_3, а множеству точек, не являющихся граничными,— p_2, $p_1+p_2+p_3=1$. Таким образом, сигнал на выходе фильтра φ_1 — это значения одной из трех случайных нормальных величин, априорные вероятности которых заданы. Учитывая соотношение $m_3<m_2<m_1$ и имеющиеся априорные сведения, применим критерий максимума апостериорной вероятности [4].

Определим следующие гипотезы:

$$H_1: x\in\Gamma_+;\ H_2: x\notin\Gamma;\ H_3: x\in\Gamma_-.$$

При этом пороги для принятия одной из гипотез равны

$$\delta_+=\max_{j=2,3}\left\{\frac{m_1+m_j}{2}+\frac{\sigma_1^2\ln(p_j/p_1)}{m_1-m_j}\right\};$$
$$\delta_-=\min_{j=1,2}\left\{\frac{m_3+m_j}{2}-\frac{\sigma_1^2\ln(p_j/p_3)}{m_j-m_3}\right\}. \quad (5)$$

Если выполняется неравенство

$$[S(x)*\varphi_1(x)]\geqslant\delta_+, \tag{6}$$

то принимается гипотеза H_1, если $[S(x)*\varphi_1(x)]\leqslant\delta_-$, принимается H_3.

Правило (6) минимизирует полную вероятность ошибки при решении в пользу i-й гипотезы. Для гипотезы H_1 вероятность ошибки имеет вид

$$P_{\text{ош}}=p_1\int_{-\infty}^{\delta_+}f_1(x)\,dx+\sum_{j>1}p_j\int_{\delta_+}^{\infty}f_j(x)\,dx, \tag{7}$$

где f_j — плотность распределения. В выражении (7) первое слагаемое соответствует событию пропуска, а второе — ложной тревоге.

Учитывая соотношение (2), по величине отклика фильтра φ_2 множество значений его аргумента можно разделить на пять подмножеств. Принятие решения о принадлежности одному из подмножеств осуществляется путем проверки пяти гипотез. Математические ожидания откликов фильтра φ_2 в точках, соответствующих каждому из подмножеств, соответственно равны m_1-m_3, m_1, m_2, m_3, m_3-m_1. Априорные вероятности гипотез определяются как

$$\begin{gathered}p_1'=p_1p_3,\quad p_2'=p_2(p_1+p_3),\\ p_3'=p_1^2+p_2^2+p_3^2,\quad p_4'=p_2(p_1+p_3),\quad p_5'=p_1p_3.\end{gathered} \tag{8}$$

Сигнал на выходе фильтра φ_2 — это значение одной из пяти случайных нормальных величин с заданными математическими ожиданиями и дисперсией $\sigma_2^2=2\sigma_1^2$. Так как нас интересует случай, когда первый и второй отклики фильтра φ_1 отличаются знаком, то из пяти гипотез выбираем первую и последнюю. В результате пороги принятия решений ищутся по формулам (5), где в качестве матожиданий и вероятностей используются величины из (8), а вместо σ_1 подставляется σ_2. Максимум ищется по $j=\overline{2,5}$, а минимум — по $j=\overline{1,4}$. Полная вероятность ошибки определяется по формуле (7), где вместо p_j подставляется p_j'.

В качестве примера на ЭВМ были рассчитаны пороги принятия решений (5) и вероятности пропуска ложной тревоги и ошибки (7) для фильтров φ_1 и φ_2. Сигнал с величиной локального контраста $q=4$ зашумлялся гауссовым шумом с $\mu_q=\{3,\ 5,\ 7\ \ 9,\ 11\}$. Априорные вероятности равны $p_1=p_3=0{,}05$; $p_2=0{,}9$.

Как показали вычисления полной вероятности ошибки (7), правило, основанное на фильтре φ_2, оказывается более эффективным, чем правило, в основе которого лежит фильтр φ_1. Во всем диапазоне изменения μ_q величина $P_{\text{ош}}$ для фильтра φ_1 была на порядок меньше величины $P_{\text{ош}}$ для фильтра φ_1. Конкретно, например, при $\mu_q=3$ величина ошибки составила 0,004 для φ_2 и 0,054 для φ_1. Снижение вероятности ошибки происходит в основном за счет уменьшения вероятности ложной тревоги. Для φ_1 в данном примере она составила 0,046, для φ_2 — 0,003. Это объясняется тем, что для φ_2 принятие решения осуществляется по двум граничным точкам, что увеличивает достоверность.

Фильтр (2) отличается простотой и удобен при технической реализации. В [2] в качестве фильтра φ_0 (как одного из элементов φ_2) используется сверточная аппроксимация фильтра с ИФО типа гауссианы, поэтому цифровая реализация связана лишь с операциями сложения и вычитания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Павлидис Т.** Иерархические методы в структурном распознавании образов // ТИИЭР.— 1979.— 2, № 5.
2. **Путятин Е. П., Гороховатский В. А., Ересько Ю. И., Стрельченко В. И.** Метод экстремально-логической фильтрации в задачах автоматической сегментации изо-

бражений // АСУ и приборы автоматики.— 1987.— Вып. 83.
3. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики.— М.: Наука, 1971.
4. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники.— М.: Сов. радио, 1975.— Кн. 2.

Поступила в редакцию 13 июля 1988 г.

ВЫЧИСЛЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ГИСТОГРАММЫ

Многие методы цифровой обработки одномерных и двумерных сигналов, например дискретизованных звуковых сигналов или изображений, основаны на предварительном вычислении гистограммы и порядковых статистик по скользящему фрагменту вокруг обрабатываемого элемента, значения которых в дальнейшем используются для определения параметров преобразования [1—3]. Из порядковых статистик наиболее часто используется медиана [4]. Быстродействие известных алгоритмов, обеспечивающих такие вычисления [5—9], недостаточно высоко и существенно зависит от размеров фрагмента [10]. Одним из подходов к достижению высокой скорости вычислений является разработка процессоров на основе сортирующих сетей [10, 11], однако для построения они требуют использования большого числа сортирующих элементов.

Ниже предлагается достаточно простой параллельный алгоритм, который при мультипроцессорной реализации обеспечивает вычисление гистограммы и порядковых статистик цифрового сигнала за конечное и сравнительно небольшое число операций, не зависящее от размеров фрагмента.

В дальнейшем будем рассматривать двумерный цифровой сигнал, квантованный на K уровней, однако описываемый алгоритм может быть применен и для аналогичного одномерного сигнала.

Пусть каждый элемент цифрового сигнала принимает значение, равное одному из K уровней квантования в диапазоне $0 \leqslant k < K$. Скользящая гистограмма $G(W_{mn};\ k)$ представляет собой дискретную функцию от k, указывающую число элементов исходного сигнала уровня k, попадающих в прямоугольный фрагмент W_{mn}, размеры которого H строк по L элементов в строке (реальные H и L могут составлять величину до 20—50 и более). Положение фрагмента определяется координатами текущего обрабатываемого элемента; для простоты будем считать, что оно задается координатами левого верхнего угла фрагмента $(m,\ n)$. Под интегральной гистограммой $F(W_{mn};\ k)$ понимается сумма

$$F(W;\ k) = \sum_{i=0}^{k} G(W;\ i), \tag{1}$$

а порядковые статистики $R(W;\ q)$, где $0 \leqslant q \leqslant HL$, представляют собой зависимость вида

$$R(W;\ q) = k, \text{ если } F(W;\ k-1) < q \leqslant F(W;\ k). \tag{2}$$

Формирование гистограммы по фрагменту W_{mn} требует, вообще говоря, HL операций на элемент сигнала. Значительно более быстродействующими являются способы скользящего формирования гистограммы, в ко-