

Ю. В. ОБИДИН, А. Н. ХЕГАЙ

(Новосибирск)

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕССОР ПОЭЛЕМЕНТНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Известные решения спецпроцессоров поэлементных операций (ППО) [1, 2] рассчитаны на системы обработки изображений, в которых ППО является главным, а зачастую и единственным специализированным вычислителем. В таких системах требования к ППО определяют не только структуру процессора, но и архитектуру всей системы. Мультипроцессорная система (МС) [3] ориентирована на применение широкого набора вычислительных средств, и известные ППО не совместимы с ней как в идеологическом плане, так и в конструктивном.

Целью данной работы является описание структуры и возможностей процессора поэлементных операций, рассчитанного на применение в МС.

Под поэлементными принято понимать операции, при которых значение каждого элемента результирующего изображения зависит только от яркостей соответствующих элементов исходных изображений и не зависит от их координат. Типичными примерами таких операций являются различные виды амплитудных преобразований, сложение (вычитание) двух изображений и т. п.

Наиболее часто указанные (и некоторые другие) виды поэлементных операций выполняются над одним или двумя изображениями. Так, если a_i , b_i и c_i являются соответственно амплитудными значениями точек изображений A , B и C , то обычно при выполнении поэлементных операций требуется вычислить функцию вида $c_i = F(a_i, b_i)$.

При общепринятом байтовом представлении элементов задача поэлементной обработки может быть выполнена с помощью таблицы емкостью 64 Кбайт, содержимое которой и определяет вид преобразования. Реализация такого подхода сталкивается с двумя трудностями: во-первых, она требует большого объема оперативной памяти, а во-вторых, для каждого вида преобразования необходима перезагрузка этой оперативной памяти.

Альтернативным вариантом является фиксация набора необходимых преобразований и переход от двумерной функции преобразования к одномерным:

$$c_i = F_3(F_1(a_i) \oplus F_2(b_i)). \quad (1)$$

Здесь символ \oplus обозначает набор выбранных преобразований; F_1 , F_2 , F_3 — функции амплитудных преобразований. В большинстве практических задач набор преобразований, обозначенный знаком \oplus , составляют арифметические (сложение и вычитание) и некоторые булевы (И, ИЛИ, исключаящие ИЛИ и т. п.) операции.

Следует отметить, что исключение операций умножения, деления, возведения в степень и т. п. из \oplus не ограничивает возможностей применения (1), так как упомянутые операции могут быть осуществлены специальным выбором функций F_1 , F_2 (например, логарифмированием).

Рассмотрим ошибки преобразования (1) в сравнении с идеальным табличным преобразованием. Для этого представим последнее в виде

$$c_i = F(a_i, b_i) = F_3(F_1^*(a_i) \oplus F_2^*(b_i)), \quad (2)$$

где $F_1^*(a_i)$, $F_2^*(b_i)$ — вещественные значения, а $F_1(a_i)$, $F_2(b_i)$ — их целочисленное приближение.

Пусть разрядность a_i , b_i и c_i равна 8, разрядность $F_1(a_i)$, $F_2(b_i)$ — $8 + m$, тогда для зафиксированного нами набора преобразований \oplus разрядность входных значений F_3 составит $9 + m$. В случае идеального таб-

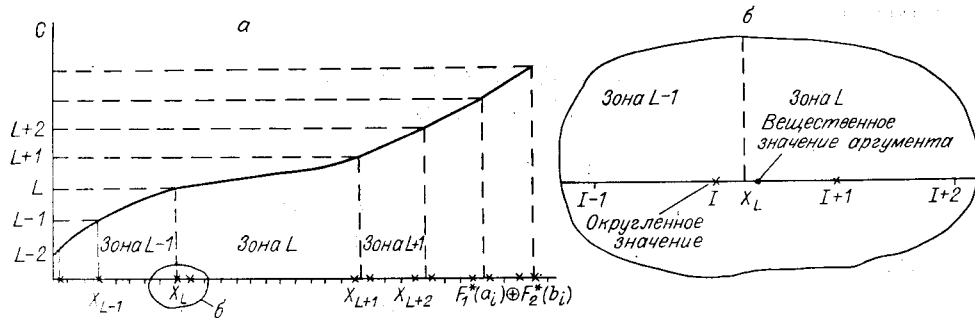


Рис. 1

личного преобразования (2) вся вещественная область входных значений F_3 разбивается на 256 зон таким образом, чтобы граница каждой зоны отображалась преобразованием F_3 на целочисленное значение C (рис. 1, а). Тогда при попадании аргумента в L -ю зону данной точке присваивается значение L :

$$c_i = L, \text{ если } X_L \leq F_1^*(a_i) \oplus F_2^*(b_i) < X_{L+1}, \quad (3)$$

где X_L, X_{L+1} — границы L -й зоны.

Поскольку в преобразовании (1) значение аргумента функции F_3 является приближенным, то при замене в правиле (3) вещественного значения $F_1^*(a_i) \oplus F_2^*(b_i)$ на его целочисленное приближение возникает вероятность неправильного выбора зоны для тех значений аргумента, которые лежат вблизи границы зоны.

В силу ошибок округления

$$F_1^*(a_i) \oplus F_2^*(b_i) = F_1(a_i) \oplus F_2(b_i) + \xi_1 + \xi_2.$$

Здесь ξ_1 и ξ_2 — ошибки округления, распределенные по равномерному закону от $-1/2$ до $+1/2$. Суммарная ошибка $\eta = \xi_1 + \xi_2$ подчинена треугольному закону распределения и лежит в диапазоне -1 — $+1$. Так как $|\eta| \leq 1$, то вероятность неправильного выбора зоны отлична от нуля только для тех значений $F_1(a_i) \oplus F_2(b_i)$, которые являются граничными. Граничной точкой назовем ближайшее к границе зоны целочисленное значение аргумента (на рис. 1, а, б граничные точки помечены крестиками). Несложно показать, что вероятность неправильного выбора зоны для граничных точек $P = 1/8$.

Для дальнейшего анализа необходимо привлечение сведений о характере поведения функций F_1, F_2 и F_3 . Пусть v_j — вероятность принятия аргументом $F_1(a_i) \oplus F_2(b_i)$ значения j ($j = 1, 2, 3, \dots, 2^{9+m} - 1$); Ω_l — количество левых, а Ω_r — правых граничных точек, тогда дисперсия разности между преобразованиями (1) и (2) составит:

$$\sigma^2 = \frac{1}{8} \sum_{\Omega_l} v_j (L_j - L_{j-1})^2 + \frac{1}{8} \sum_{\Omega_r} v_j (L_{j+1} - L_j)^2 \quad (4)$$

при условии, что $\sum_{j=1}^{2^{9+m}-1} v_j = 1$.

Рассмотрим для наглядности случай, когда распределение аргумента подчиняется равномерному закону:

$$\sigma^2 = \frac{v}{8} \{n_l (\overline{\Delta L^2}) + n_r (\overline{\Delta L^2})\} = (\overline{\Delta L^2}) \frac{(n_l + n_r)}{2^{m+12}}.$$

Так как для монотонной функции F_3 $(n_l + n_r) \leq 512$, то

$$\sigma^2 = (\overline{\Delta L^2}) / 2^{m+3}, \quad (5)$$

т. е. дисперсия разности определяется средним квадратом целочисленной производной и разрядностью выбранных преобразований.

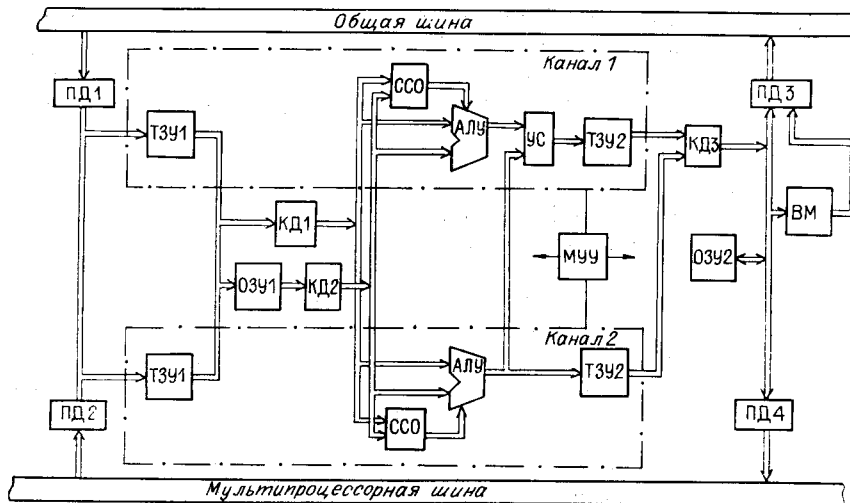


Рис. 2

При аппаратной реализации преобразований (1) выбор числа дополнительных разрядов m для преобразований F_1 и F_2 необходимо производить исходя из выражений (4) и (5). В данном процессоре число дополнительных разрядов $m = 0$, т. е. он рассчитан на достаточно гладкие преобразования F_3 , для которых $(\overline{\Delta L^2}) \approx 1$.

Процессор позволяет выполнять следующие типы операций:

а) поэлементные операции вида (1) над двумя 8-разрядными изображениями A и B ;

б) операции над 16-разрядными изображениями (накопление и нормировка):

$$d_i = F_1(a_i) \pm d_i; \quad (6)$$

$$c_i = d_i/K, \quad (7)$$

где d_i — 16-разрядный элемент изображения D ; K — целая константа $1 \leq K < 256$;

в) запоминание координат тех точек, для которых выражение $[F_1(a_i) \& K]$ истинно, где $\&$ — операция сравнения: ($>$, $<$, $=$, \neq);

г) формирование нового изображения по результатам сравнения элементов двух исходных изображений:

$$c_i = \begin{cases} u_i, & \text{если } F_1(a_i) < F_2(b_i); \\ v_i, & \text{если } F_1(a_i) = F_2(b_i); \\ w_i, & \text{если } F_1(a_i) > F_2(b_i), \end{cases} \quad (8)$$

где $u_i, v_i, w_i \in \{0, 255, F_1(a_i), F_2(b_i)\}$;

д) построение гистограмм для результирующего изображения в процессе его формирования.

Приведенный выше список операций был выделен с учетом опыта, полученного в ИАиЭ СО АН СССР при решении широкого круга научных и прикладных задач по цифровой обработке изображений.

На структуру процессора существенное влияние, как было уже упомянуто выше, оказывает архитектура МС. Различная длина слов мультипроцессорной и общей шин, наличие операций двойной точности (6), (7) привели к созданию двухканальной структуры процессора (рис. 2). Каналы работают синхронно, обрабатывая одновременно два соседних элемента (в канале 1 обрабатываются нечетные элементы, а в канале 2 — четные).

В состав каждого из каналов процессора входят: два табличных запоминающих устройства (ТЗУ1 и ТЗУ2), арифметическое логическое устройство (АЛУ), схема сравнения операндов (ССО).

Общими узлами для обоих каналов являются: оперативные запоминающие устройства (ОЗУ1 и ОЗУ2); коммутаторы (КД1, КД2 и КД3); устройство сдвига (УС); приемники и передатчики данных (ПД1,, ПД4). Управление работой процессора осуществляет микропрограммное устройство управления (МУУ).

Амплитудные преобразования F_1 , F_2 реализуются ТЗУ1, которое выполнено на микросхемах 132РУ8 и имеет емкость 1024 8-разрядных слова. В оба канала загружаются одинаковые таблицы преобразований. Емкость ТЗУ1 дает возможность разместить в нем по два варианта функций F_1 и F_2 , что позволяет во многих случаях реже выполнять перезагрузку функций. Данные a_i поступают на адресный вход ТЗУ1 из общей шины (ОШ) или мультипроцессорной шины (МШ) через ПД1 и ПД2. По адресу a_i из ТЗУ1 выбирается преобразовательное значение $F_1(a_i)$, которое запоминается в ОЗУ1. Емкость ОЗУ1 позволяет накапливать 1 К 16-разрядных слов. После заполнения ОЗУ1 или окончания фрагмента (о чем сообщает адресный процессор) МУУ включает преобразование F_2 и запрашивает через МШ очередные элементы изображения B . Далее на входы АЛУ одновременно с элементами $F_2(b_i)$ из ОЗУ1 подаются элементы $F_1(a_i)$.

Основу АЛУ составляют интегральные схемы (ИС) 155ИПЗ. Список арифметических и логических операций, реализуемых ИС 155ИПЗ, известен и вполне удовлетворяет п. а требований к процессору.

ССО по результатам сравнения операндов $F_1(a_i)$ и $F_2(b_{i+n})$ устанавливает один из трех заранее заданных режимов АЛУ, обеспечивая тем самым формирование изображения в соответствии с выражением (8).

ТЗУ2, как и ТЗУ1, имеет емкость 1024 8-разрядных слова и соответственно хранит два варианта преобразования F_3 .

Результирующее изображение накапливается в ОЗУ2, имеющем такую же емкость, как и ОЗУ1. Одновременно с накоплением элементов c_i видеометр (ВМ) накапливает гистограмму всех нечетных (прошедших через канал 1) элементов. Накопление четных элементов происходит в процессе выгрузки изображения C в МШ или в ОШ. Схема видеометра может накапливать до 10^6 элементов одинаковой яркости.

Коммутатор КД2 в режиме накопления изображений (6) производит преобразование 8-разрядных элементов в 16-разрядные, дополняя старший байт нулями. В этом режиме два байтовых канала ППО объединяются в один 16-разрядный. Соответственно скорость работы ППО снижается вдвое.

Устройство сдвига предназначено для деления d_i на число 2^k , где k задается. Совместно с ТЗУ2 УС осуществляет операцию нормировки (8). На каждом такте нормировки из 16-разрядного элемента исходного изображения получается один байт результата. Для его записи в 16-разрядное ОЗУ2 служит коммутатор КД3.

Для запоминания координат особых точек используется способность ВМ накапливать 256 сумм. В процессе обработки содержимое первой ячейки памяти ВМ инкрементируется до тех пор, пока не встретится особая точка. Далее счет обработанных точек ведется во второй ячейке ВМ до следующей особой точки. После обнаружения 256 особых точек ППО останавливается для передачи в ЭВМ накопленных расстояний между точками.

Конвейерный принцип обработки позволяет вести вычисления одновременно и синхронно с загрузкой и выгрузкой. При такой организации процесса вычислений время обработки (включая загрузку и выгрузку) равно времени обмена данными.

Предложенная структура процессора обеспечивает широкие функциональные возможности при выполнении поэлементных операций, допускает работу со словами двойной длины при накоплении. Кроме того, процессор осуществляет такие операции, как поиск особых точек; перезапись оперативной памяти системы со сдвигом на 1—3 байта или с переходом от 8-разрядного представления к 16-разрядному и обратно;

накопление гистограммы результирующего изображения одновременно с основной операцией.

ППО содержит 257 корпусов ИС, выполнен на 6-слойной печатной плате с двумя накладными разъемами и потребляет мощность 57 Вт.

Реальное время поэлементной обработки двух изображений форматом (256×384) составляет менее 0,2 с. Определение координат точек, значение которых превышает заданный порог, производится вдвое быстрее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Меркулов А. Н., Любимов Б. О., Тупикин А. Н., Губко В. Д. Специализированный дисплейный процессор «Нейрон Н-852» // Техника средств связи.— 1984.— Вып. 3.
2. Борисенко В. И., Труль Ю. В., Халтурин А. Ю. и др. Комплекс цифровой обработки видеoinформации СВИТ // Обработка изображений и дистанционные исследования: Тез. докл. Всесоюз. конф.— Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984.
3. Киричук В. С., Косых В. П., Обидин Ю. В. и др. Система цифровой обработки изображений с двухшинной архитектурой // Автометрия.— 1989.— № 2.

Поступила в редакцию 6 января 1988 г.

УДК 621.391 : 681.3.01

В. М. ЕФИМОВ, В. С. КИРИЧУК, А. И. ПУСТОВСКИХ,
А. Л. РЕЗНИК
(Новосибирск)

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СЕРИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Бурное развитие систем восприятия изображений поставило задачу совместного анализа серий изображений одной и той же сцены. Цель такого анализа обычно заключается в точном оценивании стационарного фона либо в поиске динамических объектов, действие которых на изображении сводится к локальным изменениям фона.

В процессе регистрации изображений в силу неидеальности и дискретности систем считывания, вариаций условий регистрации и особенностей переноса реальной (объемной) сцены на плоское изображение возникает ряд мешающих факторов, которые в общем случае сводятся к следующему: 1) искажение геометрии изображений; 2) амплитудное преобразование плотности изображений; 3) наличие в каждом кадре шума, практически некоррелированного от кадра к кадру:

$$D_l(x_i, y_j) = F_l\{M\{\varphi_l(x_i, y_j)\psi_l(x_i, y_j)\}, x_i, y_j\} + \Xi_l(x_i, y_j), \quad l = 1, n; \quad (1)$$

$$D_{n+1}(x_i, y_j) = M(x_i, y_j) + W(x_i, y_j) + \Xi_{n+1}(x_i, y_j), \quad i = 1, N_x, \quad j = 1, N_y.$$

Здесь F_l — функция амплитудного преобразования; φ_l, ψ_l — функции преобразования координат (геометрии изображений); Ξ_l — шумы, сопровождающие измерения; M — непосредственно регистрируемое изображение; W — функция, описывающая локальные изменения в $n + 1$ кадре:

$$W(x_i, y_j) = \sum_{l=1}^k A_l f_l(x_i - x_l, y_j - y_l),$$

где A_l — амплитуды, а f_l — формы объектов.

Следует отметить, что даже в такой неполной формулировке (не учтены свойства считывающего датчика, введена аддитивность шума) задача принципиально неразрешима (число неизвестных больше числа измерений), поэтому необходимы различные ограничения на все виды перечисленных искажений. Такие ограничения, конечно, определяются