

ного изображения представляется 24-разрядным словом, черно-белого — байтом.

Экспериментальная проверка МС проводилась в процессе решения практических задач. Цель этой проверки — определение реального быстродействия, выяснение эффективности структурных и схемотехнических решений, перспектив развития и совершенствования системы.

Быстродействие МС проверялось на задачах совместной обработки двух изображений с целью выделения отличий (использовался алгоритм, описанный в [5]). Полный цикл обработки двух кадров размером 256×384 элемента система осуществляла за 7,5 с, тогда как эта же процедура на ЭВМ «Электроника 79» реализуется за 250 с. Проверка на других задачах (фильтрация, совмещение изображений, поиск объектов) дает сокращение времени анализа в 30—40 раз.

В результате опытной эксплуатации выяснилось, что система нуждается в совершенствовании. Существует необходимость включения в ее состав процессора нелинейной фильтрации (поиск точек экстремума и ранговая фильтрация) и замены имеющегося устройства отображения с увеличением информационной емкости экрана до 1024×1024 элемента.

Для повышения производительности МС необходимо пересмотреть структуру и состав СП, снабдить такие вычислители, как коррелятор, встроенной микроЭВМ, расширить функциональные возможности адресного процессора.

В настоящее время первый экземпляр системы успешно используется в ИАПЭ СО АН СССР для решения задачи обнаружения малых отличий в серии аэрокосмических изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цифровые системы обработки изображений. (Обзор) // Радиоэлектроника за рубежом.— 1983.— № 26.
2. Сугимото, Итиока. Быстродействующая система обработки изображений с шинной архитектурой // Приборы для науч. исслед.— 1986.— № 4.
3. Киричук В. С., Косых В. П., Нестерихин Ю. Е., Яковенко Н. С. Методы и средства оперативной цифровой обработки изображений // Автометрия.— 1984.— № 4.
4. Фастбас. Модульная быстродействующая система сбора данных для физики высоких энергий и других применений/ВЦП.— № Г-10863.— М., 1981.
5. Киричук В. С., Пуустовских А. И. Применение статистических методов в задаче оценивания стационарной части фона по серии изображений // Автометрия.— 1988.— № 3.

Поступила в редакцию 6 января 1988 г.

УДК 681.3.06 : 681.327

Г. И. ГРОМИЛИН, Н. С. ЯКОВЕНКО

(Новосибирск)

СИСТЕМНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО МНОГОПРОЦЕССОРНОГО КОМПЛЕКСА

Введение. Многопроцессорный комплекс (МПК) цифровой обработки изображений работает под управлением мини-ЭВМ «Электроника 79» с операционной системой (ОС) МДОС-РВ, имеет широкий набор спецпроцессоров (СП) с производительностью от 10^7 до 10^8 операций типа сложения или умножения в секунду и двухшинную архитектуру обмена данными (связь с ЭВМ осуществляется обычным для семейства «Электроника» образом — через общую шину (ОШ), а для обмена в МПК разработана системная шина (СШ), логический протокол которой аналогичен принятому в интерфейсе FASTBUS [1]). Прообразом МПК является комплекс цифровой обработки изображений (КЦОИ) [2, 3].

Состав комплекса. МПК, имеющий универсальную расширяемую структуру, содержит:

память комплекса (ПК) — от 1 до 16 страниц объемом по одному мегабайту, хранящих 8-разрядные изображения;

адресный процессор (АП), отвечающий за доступ компьютера и спецпроцессоров к памяти комплекса;

блок арбитража (приоритетное функционирование СП), индикации и контроля обмена по системной шине (АСШ);

межшинный интерфейс (МШИ), ускоряющий обмен между ПК и оперативной памятью (ОП) компьютера;

процессор фильтрации (ПФ) для осуществления нормированной линейной свертки двумерного изображения с ядром до 15×15 элементов;

корреляционный процессор (КП), производящий вычисления много-разрядных сумм элементарных произведений фрагментов двух изображений из ПК для осуществления «поиска эталонов» по корреляционным методикам;

поэлементный процессор (ПП), выполняющий арифметико-логические, табличные, сдвиговые операции, подсчет гистограмм, сравнения и т. п.;

геометрический процессор (ГП), осуществляющий полиномиальное преобразование координат и амплитуды изображений ПК;

морфологический процессор (МП), выполняющий операции математической морфологии [4], осуществляемые при помощи структурных элементов алфавита Голея над бинарными изображениями ПК;

видеобуфер (ВБ) на несколько кадров, позволяющий хранить и визуализировать изображения на черно-белые и цветные ТВ-мониторы.

Основой комплекса являются ПК, АП, АСШ, а для визуализации изображений комплекс содержит ВБ с одним или несколькими ТВ-мониторами. Каждый из спецпроцессоров КП, ПП, ГП и МП не зависит друг от друга и выполняет обработку изображений, хранящихся в ПК. Обмен данными между ПК, ОП и СП осуществляется АП по системной шине, а управление комплексом и обменом, а также сам обмен — ЭВМ по общей шине. Более подробное описание аппаратуры комплекса можно найти в [5].

Организация программного обеспечения. Разработка очередного СП начинается с его программной проработки. С этой целью либо создается эмулятор (например, [6]), который используется и в практических целях, либо только определяются параметры будущего СП.

После разработки и изготовления аппаратуры СП проходит отладку на рабочем месте разработчика, состоящем из специализированной аппаратуры, ЭВМ «Электроника 60», связанной с «Электроникой 79», крейта с настраиваемым СП и терминала. В ЭВМ «Электроника 60» загружается диагностическая программа, работающая без операционной системы. В случае автономного рабочего места («Электроника 60» с гибкими дисками) аналогичная программа работает под управлением ОС РАФОС. На этом этапе, кроме устранения ошибок разработки аппаратуры и выработки параметров интерфейса аппаратуры и программного обеспечения, создается основная управляющая программа спецпроцессора (УПС) — базовый ассемблерный модуль, управляющий всеми операциями. Такие модули, подгруженные в специальный раздел ОС, используются также в дальнейшем (после создания драйверов) в тестах и на первых этапах в практических задачах «однозадачного» режима работы ЭВМ.

Для функционирования диалогового тестового обеспечения «Электроника 60» без ОС разработана специальная библиотека, обеспечивающая работу фортран-программ. Она содержит подпрограммы ввода-вывода значений различного типа (байтового, целого, двойной точности в восьмеричном, десятичном, шестнадцатеричном виде), вывода регистров и буферов памяти.

В рабочем режиме устройства комплекса управляются разработанными драйверами нестандартных внешних устройств [7]. Обслуживание устройств через драйверы позволяет использовать системные средства буферизации запросов в очередях, обеспечивать работу в многозадачном режиме, уменьшать размер задачи. Все драйверы выполнены загружаемыми. Для ОС, в которых не реализован вариант загружаемых драйверов, тексты драйверов позволяют при генерации ОС делать их резидентными. Обращение к драйверам осуществляется стандартным для МДОС РВ способом через директивы QIO управляющей программы [8]. На запросы с ожиданием окончания ввода-вывода соответствующие библиотеки обеспечивают интерфейс с языками высокого уровня, использующий протокол передачи параметров, принятый в Фортране.

Программное обеспечение представляет собой трехуровневую структуру открытого типа: УПС и драйверы, обслуживающие работу элементов комплекса; библиотеки специализированных подпрограмм, обеспечивающие запросы к драйверам и УПС из задач или выполняющие функционально законченные вычислительные операции; тестовые и проблемно-ориентированные задачи, работающие в диалоговом или пакетном режиме.

Память комплекса и адресный процессор. ПК предназначена для хранения изображений. Она доступна как спецпроцессорам, так и непосредственно задаче в ЭВМ через специальное «окно». В первом случае происходит обмен прямоугольными фрагментами между ПК и локальной памятью СП по СШ при помощи адресного процессора, имеющего для этих целей 8 генераторов раstra (устройств PA0: — PA7:), работающих в псевдопараллельном режиме. Во втором случае после переустановки начала окна в области ПК (при помощи АП) весь интервал окна (от 8 до 32 Кбайт) доступен задаче так же, как ОП.

ПК имеет линейную организацию с доступом к двумерным прямоугольным фрагментам. Их размеры (NX, NY) ограничены логически шестнадцатью мегабайтами ($NX \times NY \leq 16$ Мбайт) и физически наличием конкретного количества страниц ПК. ПК линейна только по одной координате (для определенности по Y) и дискретна по другой (по X). Общий вид доступа к фрагменту можно записать следующим образом:

$$AD_{ij}^{(k)} = AD_0^{(k)} + i(NY^{(k)} + SY^{(k)}) + j,$$

где $k = 0, \dots, 7$ — номер раstra; i, j — координаты точки во фрагменте; $NX^{(k)}, NY^{(k)}$ — размер фрагмента; $AD_0^{(k)}$ — начало фрагмента (абсолютный адрес); $SY^{(k)}$ — смещение по Y (расстояние между соседними непрерывными интервалами ПК, принадлежащими фрагменту); $i = 0, \dots, NX^{(k)} - 1$; $j = 0, \dots, NY^{(k)} - 1$; $0 \leq AD_0^{(k)}, SY^{(k)} < 16$ Мбайт; $0 < NX^{(k)} \times NY^{(k)} \leq 16$ Мбайт.

Аппаратура АП не сообщает об окончании обхода фрагмента. Чтобы запрос от другой задачи не изменил параметров работающего раstra, на время его работы достаточно присоединить соответствующее из PA0: — PA7: устройств к задаче.

Основную функцию директивы QIO драйвер выполняет при загрузке параметров раstra: CALL WTQIO (<управляющая функция>, ..., <буфер параметров>), взяв $AD_0^{(k)}, SY^{(k)}, NX^{(k)}, NY^{(k)}$ из буфера параметров. При работе с окном (устройство PA10:), кроме смены начального адреса окна, можно разрешить или запретить коррекцию (по Хэммингу) ПК, разрешить работу с основными или корректирующими разрядами.

Диагностическая задача МРА тестирует через окно размером 32 Кбайт всю или часть имеющейся ПК. Тестирование заключается в записи, а затем в считывании с проверкой последовательных (или выборочных) ячеек памяти. Простой тест записывает в память блоки до 32 Кбайт. Блок состоит из последовательности чисел. После записи блока происходит считывание со сравнением (возможно, многократное). В блоках сложного теста хранится не просто возрастающая или убываю-

щая последовательность, а циклическая таблица, включающая до 85 различных кодов, содержащих смену битов (бегущая 1, бегущий 0 и др.). Программа имеет также возможность часто менять начальный адрес окна.

Программа MSM выполняет как в пакетном, так и в диалоговом режиме операции по обслуживанию ПК и ВБ совместно с файлами — взаимная пересылка и сравнение файлов, групп файлов малого формата (384 × 256) между дисками, ВБ и ПК, а также стирание или перестановка кадров в ВБ или ПК.

Основным недостатком ПК является кратность доступа к ней по СШ, равная четырем байтам.

Блок арбитража, индикации и контроля обмена по системной шине. Арбитраж заключается в приоритетной обработке запросов СП и компьютера к АП для ввода-вывода фрагментов ПК. Индикаторы, размещенные на плате, визуализируют данные и специальные сигналы, проходящие по СШ. Кроме стандартных функций (присоединить, отсоединить, отменить запрос ввода-вывода), у устройства АСП имеется основная функция (сброс и разрешение работы МПК) и специальная (получить состояние) для отладки и диагностики.

Межшинный интерфейс. Он не является необходимым устройством МПК и предназначен для ускоренного обмена между памятью комплекса и оперативной памятью ЭВМ. Обмен ведется в режиме прямого доступа к ОП по ОШ, а по СШ — под управлением одного из генераторов раstra. Кроме трех стандартных функций (присоединить, отсоединить, отменить запрос ввода-вывода), драйвер МШИ осуществляет чтение и запись логического (виртуального) блока. Параметрами передаются начальный адрес ОП (кратный двум), длина буфера (кратная четырем), номер раstra и номер блока на диске.

В драйвере МШИ имеется возможность использования ПК в качестве псевдодиска. На ЭВМ с небольшой ОП можно улучшить время реакции ОС, разместив на псевдодиске файл выгрузки. Для обменов в режиме псевдодиска резервируется генератор раstra с номером 0. Введение такого режима позволяет тестировать ПК с помощью системных средств (программы BAD, IOX, тестовый пакет UETP). Количество блоков на псевдодиске, их размер и другую информацию об устройстве можно получить при помощи директивы GLUN.

Процессор фильтрации [5]. Он реализует функцию вида

$$g_{kl} = \frac{1}{C} \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m h_{ij} f_{k+i, l+j}$$

где g — отфильтрованное поле; C — нормирующий множитель; h — ядро свертки; f — фильтруемое поле; $m, n = 1, \dots, 7$; $k = 1, 2, \dots$; $l = 1, \dots, l_0$; $l_0 = 28, 24, 20, 16$; $-128 \leq h \leq 127$; $0 \leq g, h \leq 255$. Отражая аппаратный процесс фильтрации, можно записать

$$g_{kl} = [\{S/2^p\} \langle 2^p/C \rangle] = S/C - \langle 2^p/C \rangle \xi_1 - \xi_2,$$

где S — двойная сумма; p — параметр ПФ (такой же, как m, n); $[\]$ — операция целочисленного округления с добавлением 0,5, так что $-0,5 \leq \xi_2 < 0,5$; $\{ \}$ — специализированная операция отбрасывания дробной части такая, что $0 \leq \xi_1 < 1$; $\langle \rangle$ — программно вычисляемая 12-разрядная константа.

УПС выполняет следующие операции: загрузку уровня арбитража, двух номеров растров под исходную и отфильтрованную полосу (k, l) (если фильтрация осуществляется не через ОШ, а через СШ); загрузку и чтение ядра h (размеры ядра могут отличаться); подгрузку и чтение двумерного основного буфера (ОБ) $f_{k'l'}$, где $l' = 1,32$ — постоянная ширина ОБ, $k' = 1, \dots$ — величина подгрузки ОБ (в случае работы по ОШ); вычисление множителя ($2^p/C$) и загрузку его вместе с показателем p ; пуск вычислителя на фильтрацию ОБ или всей полосы; чтение результата в случае ОШ или ожидание обработки полосы по СШ.

Кроме трех стандартных функций, а также функций загрузки параметров фильтра (растр, нормирующий множитель, показатель степени, ядро, размер ядра) и чтения результата (с предварительной записью исходных данных), в драйвере ПФ имеются специальные функции продолжения фильтрации с прежними параметрами, чтения содержимого ядра и ОБ. Директива GLUN сообщает уровень арбитража и размер буфера.

Диагностическая программа TSIFIL осуществляет проверку работы ПФ по ОШ, сравнивая результаты на каждом этапе процесса запуска ПФ с ожидаемыми данными, вычисленными или хранящимися в компьютере, в том числе точность константы и погрешности ξ_1 и ξ_2 . Для СП программа FILTR1 фильтрует изображение различными фильтрами (заданием h) с визуализацией исходного и результирующего изображений.

Основными недостатками ПФ являются отсутствие возможности прибавления константы после нормировки двойной суммы, малая разрядность константы ($2^p/C$) и неполное использование ОБ при малых размерах фильтра.

Время фильтрации изображения малого формата фильтром 3×3 составляет 0,42 с. Для фильтра 7×5 оно равно 1,04 с, а для 15×15 — 4,36 с. Кроме того, время, затрачиваемое на вычисление и передачу параметров в уже загруженную задачу, составляет от 0,4 до 0,8 с. Нетрудно подсчитать реальную производительность ПФ: 384×256 (размер изображения) $\times 15 \times 15$ (размер фильтра) $\times 2$ (одно умножение + одно сложение) / 4,36 с ≈ 10 млн опер./с. Для фильтра 3×3 она равна 1,7 млн опер./с. В следующей модификации производительность будет повышена до 12 млн опер./с с увеличением разрядности сумматора и введением слагаемого после суммы.

Корреляционный процессор [9]. Он вычисляет следующие суммы:

$$g_1 = \sum f, \quad g_2 = \sum h, \quad g_3 = \sum hf, \quad g_4 = \sum ff, \quad g_5 = \sum hh,$$

где $h(i, j)$ — эталон; $f(k+i, l+j)$ — сканируемое поле; $g_m(k, l)$ — результирующие оценки; сумма является двойной по i и j ; $0 \leq h, j \leq 255$; $0 \leq i < NX$; $0 \leq j < NY$; $NX, NY \leq 32$; g_m — многоразрядные составные целые величины, передаваемые в компьютер несколькими 24-разрядными слагаемыми.

В КП имеется специальный буфер адресов обхода элементов эталона, что позволяет опустить часть элементов сумм. Сомножители берутся из буфера эталона и основного буфера — двумерного буфера сканируемого поля переменного формата $NXS \times NYS$ (до 32×64 либо 16×128 , либо 8×256 элементов). После вычисления очередной оценки (5 сумм) осуществляется «сдвиг» эталона относительно ОБ по одной координате (Y), затем по другой (X); таким образом, количество оценок в ОБ может достигать $(NYS - NY + 1) \times (NXS - NX + 1)$. Для подгрузки очередной порции сканируемого поля с целью получения следующих оценок ОБ организован по принципу циклического буфера, т. е. он подгружается строками длиной NY до наполнения по X с затиранием самых ранних (уже ненужных для вычислений) строк, а затем вычисления повторяются.

УПС выполняет следующие операции: загрузку формата, размера эталона, количества вычислений в ОБ, признака работы по ОШ или СП, номеров растров под эталонный и сканируемый фрагменты и уровня арбитража; загрузку и чтение эталона; подгрузку и чтение ОБ (только в случае ОШ); запуск вычислителя и чтение сумм.

Диагностическая программа TSICOR отслеживает все этапы процедуры вычисления сумм, сравнивая содержимое аппаратных буферов и сумматоров с ожидаемыми результатами, подготовленными компьютером (включая моделирование ОБ). Программа TSC вычисляет оценки для эталонов, взятых из одного изображения на фрагментах другого с визуализацией самих изображений, эталонов, фрагментов скапирования и признаков несовпадения ожидаемых результатов. Поиск эталона

32×32 с вычислением 17×9 оценок на СШ с программным нахождением минимума занимает 0,08 с. Для поиска 90 эталонов с таким же количеством оценок затрачивается 6,30 с, а для их поиска на больших фрагментах (625 оценок) — 23,9 с. Реальная производительность 2,1—19,6 млн опер./с будет увеличена до 25.

Основными недостатками КП являются фиксированный предельный формат $NXS \times NYS$ ОБ (при том же объеме он мог бы быть, например, 42×48) и отсутствие собственной локальной памяти (ЛП) под оценки, которые необходимо в диалоге считывать в компьютер.

Поэлементный процессор [10]. Он позволяет выполнять поэлементные операции над двумя 8-разрядными изображениями: $D = F3(F1(A) \oplus \oplus F2(B))$, где $F1$, $F2$, $F3$ — табличные преобразования, а \oplus — арифметико-логическая операция (АЛО), осуществляющая обычные арифметико-логические операции либо операции сравнения $<$, \leq , $>$, \geq , $=$, \neq . ПП выполняет также накопление в 16-разрядном сумматоре с последующей нормировкой на целую константу. Результатом всех этих операций всегда будут 8-разрядные изображения. Кроме того, ПП может подсчитывать одномерные гистограммы и накапливать координаты особых точек при сравнении изображений.

Рассмотрим работу ПП. Восьмиразрядные таблицы $F1$, $F2$ по 256 элементов и таблица $F3$, состоящая из 512 элементов, предварительно загружаются в соответствующую ЛП. Количество таблиц двойное (два слоя) — для расширения возможностей ПП. Кроме того, имеется ЛП длиной 2048 байт под результат преобразования первого операнда $F1(A)$. Поэлементные преобразования изображений производятся во время ввода второго операнда $F2(B)$, а результат АЛО помещается в ЛП результата D . Имеется возможность задать смещение первого изображения A относительно второго B (пропуск во время ввода до 15 элементов B). Отдельным запросом первый операнд может становиться «константой». В том случае, когда АЛО является 16-разрядной, перед табличным преобразованием $F3$ могут осуществляться операции сдвига, т. е. на таблицу подаются любые 9 разрядов результата (нормировка), при этом 16-разрядные данные будут упакованы в обычные 8-разрядные. Подсчет гистограммы осуществляется параллельно вводу-выводу.

УПС выполняет следующие операции: загрузку и чтение обоих слоев трех таблиц; загрузку и чтение первого операнда; выполнение АЛО с заданием параметров (работающих слоев таблиц, смещения, подсчета гистограммы, разрядности, упаковки, сдвига, режимов ОШ/СШ, растров); чтения результата; чистку и чтение гистограммы.

Директива GLUN сообщает уровень арбитража и размер буфера. Кроме трех стандартных функций, чтения и загрузки памяти таблиц первого операнда и результата, в драйвере имеются следующие функции: чтение гистограммы, установка параметров, загрузка второго операнда и чтение результата, запуск координатора, т. е. поиск особых точек, загрузка первого операнда константой, а также управляющая функция со следующими подфункциями: предустановка таблиц тождественными преобразованиями, чистка гистограммы, запуск АЛО на СШ с заданными параметрами. Буфер координат особых точек, найденных координатором, состоит из 4-байтных координат элементов в виде расстояния последующей точки от предыдущей (для первой — начало фрагмента).

Имеется программная реализация ПП, разработанная до создания МПК. Она использовалась как для исследования особенностей табличного преобразования для ПП, так и для сдвигов или многокадрового усреднения изображений. Время сложения двух изображений малого формата на ней 5 с, а на ПП — 0,12 с (плюс 0,3 с на передачу различных параметров загруженной задаче). Реальная производительность ПП 0,8 млн опер./с будет повышена до 3 млн опер./с.

Геометрический процессор. Он осуществляет преобразование координат элементов изображения при помощи полиномов четвертой степени.

Поскольку изображение задано на дискретной решетке, необходима интерполяция яркости. ГП выполняет интерполяцию третьей степени по 16 точкам. Применение полиномов Чебышева для устранения геометрических искажений и интерполяции яркости было проверено на реальных снимках с помощью программного эмулятора в КЦОИ [3]. Время преобразования изображения полиномами второй степени с бикубической интерполяцией на большом формате (1024×1024 элемента) занимало более 2,5 ч (использовалось для задач геолого-геофизической базы данных), а аффинное преобразование с билинейной интерполяцией изображения малого формата — 2 мин.

В ГП вычисления полиномов осуществляются по схеме Горнера, когда вместо сомножителей коэффициентов и «чистых» степеней координат $a_k x^m y^n$ участвуют сомножители типа $b_1(a_1 x + a_2) y + b_2$. Для отладки ГП на ЭВМ «Электроника 79» смоделировано аффинное преобразование координат с учетом разрядности, способа реализации арифметических вычислений и табличной бикубической интерполяции. Время выполнения такого преобразования малого формата 5 мин 13 с. Время работы ГП (не зависящее от степени полиномов) для аналогичного преобразования по ОШ 14,86 с, по СШ 0,16 с (что соответствует реальной производительности 32 млн опер./с). Планируется повысить производительность до 100 млн опер./с.

Для работы по СШ у УПС имеется одна операция загрузки параметров ГП для встроенного микропроцессора (1810VM86). Параметры содержат коэффициенты преобразования, номера входного и выходного растров, координаты границ фрагмента в ПК. Для работы по ОШ у УПС есть дополнительные операции для загрузки 16-элементных фрагментов входного изображения, выгрузки результата и пуска ГП.

Морфологический процессор. Он находится в стадии отладки аппаратуры. Программная реализация МП для ЭВМ «Электроника 79» функционально аналогична имеющейся на КЦОИ [6, 11]. Время вычисления для изображений малого формата с промежуточной и конечной визуализацией составляет для операции: hit or miss 5,9 с; логической 4,4 с; erosion 7,0 с; open 16 с. Реализованы также программы построения скелета изображения, фильтрации, подсчета объектов и т. д.

Заключение. На основе разработанного программного обеспечения осуществляется отладка и настройка отдельных компонент МПК на рабочем месте разработчика аппаратуры, производится диагностика МПК в целом и расширяется проблемно-ориентированное программное обеспечение комплекса цифровой обработки изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фастбас. Модульная быстродействующая система сбора данных для физики высоких энергий и других применений/ВЦП.— № Г-10863.— М., 1981.
2. Киричук В. С., Косых В. П., Нестерихин Ю. Е., Яковенко Н. С. Методы и средства оперативной цифровой обработки изображений // Автометрия.— 1984.— № 4.
3. Яковенко Н. С. Программные средства автоматизированной системы цифровой обработки изображений высокого разрешения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/СО АН СССР. ИАиЭ.— Новосибирск, 1985.
4. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology.— N. Y.: Academ. Press, 1981.
5. Киричук В. С., Косых В. П., Обидин Ю. В. и др. Система цифровой обработки изображений с двухшинной архитектурой // Автометрия.— 1989.— № 2.
6. Косых В. П., Пустовских А. И., Яковенко Н. С. Программная реализация морфологического процессора // Там же.— 1982.— № 4.
7. Многопользовательская дисковая операционная система реального времени // 00002—01 33 01. Драйверы ввода-вывода: Руководство программиста. Кн. 4.
8. Многопользовательская дисковая операционная система реального времени // 00002—01 90 01: Директивы управляющей программы. Кн. 19.
9. Обидин Ю. В. Специализированный коррелятор // Автометрия.— 1989.— № 2.
10. Обидин Ю. В., Хегай А. Н. Высокопроизводительный процессор поэлементных операций // Там же.
11. Косых В. П., Тарасов Е. В., Яковенко Н. С. Морфологический процессор // Автометрия.— 1984.— № 4.

Поступила в редакцию 11 января 1988 г.