

КОМПЛЕКС "ТРАФИК-МОНИТОР" НА БАЗЕ ПРОЦЕССОРА L1879 VM1

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ

Цифровая обработка изображений (ЦОИ), поступающих от оптических, тепловых, радиолокационных и иных информационных средств, как правило, состоит из многократных преобразований векторов и матриц большой размерности и требует чрезвычайно большого объема вычислений. Поэтому до недавнего времени систем ЦОИ реального времени практически не было. Только с ростом производительности процессоров стало возможным приступить к разработке таких систем.

ПРЕДПОСЫЛКИ К СОЗДАНИЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Научно-технический центр (НТЦ) "Модуль" в ноябре 1999 года представил на Всемирный Салон Изобретений в Брюсселе изобретение "Нейропроцессор, устройство для вычисления функций насыщения, вычислительное устройство и сумматор" (Пат. № 2131145 РФ), которое было удостоено золотой медали Салона. Это изобретение явилось основой разработки семейства нейропроцессоров, специально ориентированных на поддержку векторно-матричных и нейросетевых вычислений, наиболее часто применяемых в ЦОИ.

В частности, был создан процессор NM6403 (L1879 VM1), уникальная архитектура которого позволяет добиваться значительных показателей производительности при векторных и матричных операциях (см. табл.) Например, за один такт L1879 VM1 выполняет операцию взвешенного суммирования: он способен умножить матрицу 8 x 4 восьмиразрядных элементов на вектор размерностью 8 восьмиразрядных элементов и прибавить к результату вектор размерностью 4 шестнадцатиразрядных элемента, что эквивалентно 64 скалярным операциям с восьми- и шестнадцатиразрядными числами. Результаты замеров производительности процессора L1879 VM1 при проведении векторных и матричных операций приведены в таблице 1.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС "ТРАФИК-МОНИТОР"

Создание процессора L1879 VM1 позволило НТЦ "Модуль" решать практические задачи ЦОИ. В частности, в НТЦ был разработан аппаратно-программный комплекс "Трафик-Монитор" для определения в реальном времени характеристик транспортных потоков по информации от видеокамер.

Комплекс "Трафик-Монитор" решает следующие задачи:

- оцифровку видеоизображения, поступающего от видеокамеры наблюдения за участками автодороги (до 6 полос движения);
- обнаружение и сопровождение транспортных средств, находящихся в зоне наблюдения видеокамеры;

Ю.Борисов

- распознавание типов наблюдаемых транспортных средств (5 типов: легковые, малые грузовые/микроавтобусы, автобусы, длинные грузовые/трейлеры, мотоциклы);
- накопление и обработку данных о транспортном потоке на заданном оператором интервале времени наблюдения;
- определение характеристик транспортных потоков (средней скорости потока, среднего расстояния между транспортными средствами, количества транспортных средств по типам и общее, загруженности полос движения и направления дороги) на заданном временном интервале наблюдения;
- обнаружение фактов медленного движения или пробок;
- передача накопленной статистической информации (по запросу) на диспетчерский пункт управления транспортными потоками;
- непрерывная передача изображения наблюдаемого транспортного потока на диспетчерский пункт.

Решение этих задач чрезвычайно актуально для управления современными транспортными потоками и контроля транспортных потоков на различных контрольно-пропускных пунктах. А разработка этого комплекса хорошо подходила для демонстрации возможности решения сложных задач ЦОИ в реальном времени на созданном в НТЦ "Модуль" процессоре.

Разработка комплекса "Трафик-Монитор" включала разработку алгоритма, конструкции, программного обеспечения и проведение испытаний комплекса.

Предварительная отработка алгоритмов ЦОИ проводилась на персональном компьютере в режиме нереального времени (покадровая обработка видеофильмов различных транспортных потоков). В итоге для комплекса "Трафик-Монитор" алгоритм ЦОИ включал четыре алгоритмических блока.

В блоке обнаружения решается задача выделения объектов наблюдения на фоне шумов. Для этого последовательно производятся: обратное проективное преобразование изображения в ортогональную систему координат; подчеркивание яркостных перепадов (контуров) изображения при помощи двух нелинейных операторов Собела (две дискретные двумерные свертки изображения с вертикальной и горизонтальной масками Собела размером 3 x 3); подавление шумов изображения путем дискретной двумерной свертки изображения с низкочастотным фильтром-маской размером 5 x 5; сегментация изображения по порогам яркости и по результатам обработки изображения методами математической морфологии (анализа геометрической структуры образа).

В блоке сопровождения выделяются контурные линии объектов, для чего устанавливается соответствие между обнаруженными сегментами на последовательности кадров (сегменты, неустойчивые от кадра к кадру, фильтруются). Определяется соответствие объединений сегментов определенным формам. На этом же этапе вычисляются скорости каждого объекта и расстояния между ними.



В блоке распознавания объектов последовательно рассчитываются вертикальная и горизонтальная диаграммы изображения объекта (распределения средних яркостей по строкам и столбцам на вертикальном и горизонтальном размерах объекта). Далее эти диаграммы преобразуются четырьмя первыми базисными функциями Адамара с целью получения секвентного портрета объекта и сокращения размерности этого портрета до восьми числовых величин. Распознавание типов транспортных средств производится нейронной сетью, в которой применена вероятностная мера близости портрета объекта к образу транспортного средства, сформированному в процессе обучения нейронной сети.

В блоке формирования статистической информации производится подсчет числа транспортных средств (всего и по типам), выезжающих из зоны сопровождения. Определяются средние значения скоростей и расстояний между транспортными средствами по полосам движения, загруженность полос и направлений движения. Эти данные, как и 200 последних кадров видеоизображения сцены, записываются в общую память вычислителя для передачи на ПК диспетчерского пункта.

Описанная обработка изображений включает массу векторно-матричных и иных операций с большими массивами данных. При этом, в зависимости от вида видеoinформации (PAL/NTSC), столь сложную цифровую обработку 103680/86400 пикселей изображения необходимо проводить 25/30 раз в секунду. Однако для решения этой задачи в реальном времени достаточно всего двух параллельно работающих процессоров L1879 VM1 и порядка 16 Мбайт памяти.

Конструктивно комплекс "Трафик-Монитор" реализуется в нескольких вариантах исполнения: ТМ-РСІ, ТМ-СРСІ и ТМ-К. ТМ-РСІ предназначен для установки в персональный компьютер (РСІ). ТМ-СРСІ монтируется в промышленный компьютер (СРСІ). ТМ-К ориентирован для работы в условиях открытого климата. Он собран в специальном герметичном корпусе, который подвешивается на опоре у дороги, питается от сети 220 В и соединяется с ПК диспетчерского пункта через порты RS 232 или RS 485. Основной элемент конструкции – это вычислительный комплекс (см. рис.), реализованный в виде трех электронных блоков: материнской платы, контроллера видеокамер и вычислителя. Конструкции плат проектировались после распределения задач между отдельными субблоками и разделении ПО вычислительного комплекса на параллельные процессы.

Материнская плата обеспечивает интерфейс комплекса "Трафик-Монитор" с персональным компьютером диспетчерского пункта. Также на ней расположены блок ОЗУ объемом 8 Мбайт и 1 Мбайт флэш-памяти. ОЗУ предназначено для размещения упакованного в результате инсталляции функционального программного обеспечения (ПО) и хранения результатов обработки информации о транспортных потоках до передачи на диспетчерский пункт. В флэш-память загружается упакованное функциональное ПО комплекса "Трафик-Монитор" и параметры калибровки видеокамер (параметры привязки видеокамер к дороге, параметры зон наблюдения за транспортом на дороге).

Контроллер видеокамер собран на базе ПЛИС и предназначен для приема и оцифровки видеокадров, поступающих от видеокамер с частотой 25/30 кадров в секунду (PAL/NTSC). Контроллер может принимать информацию от одной до четырех видеокамер. Информация от видеокамер поступает через мультиплексор, т.е. принимается последовательно. Режим обслуживания видеокамер во времени задается параметрически оператором диспетчерского пункта. В результате на выходе контроллера формируются оцифрованные кадры монохромного изображения размером 360 x 280 (PAL) или 360 x 240 (NTSC) пикселей с 256 уровнями градации яркости пикселей.

Результаты замеров производительности процессора L1879 VM1 при проведении векторных и матричных операций

Операции	Размер входного вектора/ матрицы, элементов	Разрядность входных данных, бит	Разрядность выходных данных, бит	Время выполнения операции, мкс
<i>Векторные операции</i>				
Дискретное быстрое преобразование Фурье	256	32	32	110
	512	32	32	238
	1024	32	32	568
	2048	32	32	1317
Одномерное преобразование Адамара	256	8	16	12,8
	256	8	32	25,6
Перемещение элементов вектора согласно таблице (Look-Up Table) $y[i]=x[LUT[i]]$	10240	32	32	1038
Передискретизация (прореживание в 2 раза) $y_i = (x_{2i} + x_{2i+1})/2$	10240	8	8	57,5
	10240	16	16	110
Одномерный медианный фильтр (размер окна – 3 16-разрядных элемента)	1024	16	16	185
Одномерный медианный фильтр (размер окна – 5 16-разрядных элементов)	1024	16	16	320
Одномерный медианный фильтр (размер окна – 100 16-разрядных элементов)	1024	16	16	2144
Фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ) (размер окна – 16 элементов с разрядностью выходных данных) $y_i = \sum_{j=0}^{15} w_j \cdot x_{i-j}$	1024	8	8	11,5
	1024	8	16	23,
	1024	8	32	46,1
	1024	16	16	38,4
	1024	16	32	76,8
	1024	32	32	115,2
Поиск максимального элемента вектора	10240	8	–	104
	10240	16	–	199
	10240	32	–	391
Поиск максимального элемента вектора и его положения в массиве	10240	16	–	363
Вычисления контрольной суммы CRC (контроль при помощи циклически избыточного кода)	10240	32	–	7769
Линейное суммирование двух массивов $z_i = x_i + y_i$ a	10240	8	8	68,5
	10240	16	16	134
	10240	32	32	264
Суммирование элементов вектора с константой $z_i = x_i + c$	10240	8	8	38
	10240	16	16	72
	10240	32	32	140
Суммирование элементов вектора $y = \sum_i x_i$	10240	8	–	40,6
Вычисление модуля элементов вектора $z_i = x_i $	10240	8	8	69
Вычисление модулей разности элементов двух векторов $z_i = x_i - y_i $	10240	8	8	134
Умножение элементов вектора на константу $z_i = x_i \cdot c$	10240	8	8	72,5
	10240	16	16	140
	10240	32	32	140
	10240	64	64	276
Позлементное перемножение векторов $z_i = x_i \cdot y_i$	10240	8	8	1024
Функция насыщения с фиксированными порогами $y_i = \begin{cases} 2^m - 1, & x_i > 2^m - 1 \\ x_i - 2^m < x_i \leq 2^m - 1 \\ -2^m, & x_i \leq -2^m \end{cases}$	10240	8	8	37,2
	10240	32	32	139
Функция насыщения с произвольными порогами $y_i = \begin{cases} 2^m - 1, & x_i > 2^m - 1 \\ x_i - 2^m < x_i \leq 2^m - 1 \\ -2^m, & x_i \leq -2^m \end{cases}$	10240	32	32	396
	10240	8	16	72,7
Преобразование разрядностей элементов вектора, 8 бит => 16 бит	10240	8	16	72,7
Преобразование разрядностей элементов вектора, 8 бит => 32 бит	10240	8	16	149,5

Результаты замеров производительности процессора L1879 BM1 при проведении векторных и матричных операций (продолжение)

Операции	Размер входного вектора/матрицы, элементов	Разрядность входных данных, бит	Разрядность выходных данных, бит	Время выполнения операции, мкс
<i>Матричные операции</i>				
Двумерное дискретное косинусное преобразование	8x8	8	32	5,48
Двумерное преобразование Адамара	8x8	8	16	1,0
Транспонирование матрицы	8x8	8	8	2,85
ZigZag переупорядочение	8x8	32	32	1,73
Медианный фильтр 3x3 8-разрядных элементов	384x288	8	8	24582
Свертка 3x3 8-разрядных элементов	1024x1024	8	8	20750
Фильтр Собела	384x288	8	8	14759
Передискретизация, сокращение ширины и высоты изображения в два раза	384x288	8	8	690
	384x288	16	16	1450
Матрично-векторное умножение	1024x1024	8	16	825
	1024x1024	8	32	1650
	1024x1024	16	16	1750
	1024x1024	32	32	7000

Плата вычислителя включает два процессора L1879 BM1, четыре блока памяти по 2 Мбайт и контроллер прерываний. Вычислитель решает задачи управления вычислительным процессом, цифровой обработки изображений и формирования статистической информации о транспортных потоках.

Программное обеспечение вычислительного комплекса "Трафик-Монитор" включает управление вычислительным процессом, обработку оцифрованных видеокладов изображений и формирование статистической информации о транспортных потоках. Управление вычислительным процессом заключается в программной поддержке внешних интерфейсов комплекса "Трафик-Монитор", управлении контроллером видеокамер, синхронизации работы процессоров и организации обмена данными между процессорами, обработке сообщений от ПК диспетчерского пункта, а также в автоматическом перезапуске программы комплекса "Трафик-Монитор" при сбоях. При разработке ПО одной из наиболее сложных и важных задач был учет особенностей архитектуры процессора L1879 BM1 для оптимизации программ для достижения минимального времени вычислений. Поэтому исходные тексты ПО написаны на его ассемблере.

Кроме того, было создано ПО для ПК диспетчерского пункта. В результате оператору предоставляется удобный диалоговый интерфейс для проведения настроек и проверок и задания режимов работы комплекса "Трафик-Монитор", приема статистической информации о транспортных потоках и получения видеокладов наблюдаемого участка дороги.

ИСПЫТАНИЯ КОМПЛЕКСА "ТРАФИК-МОНИТОР"

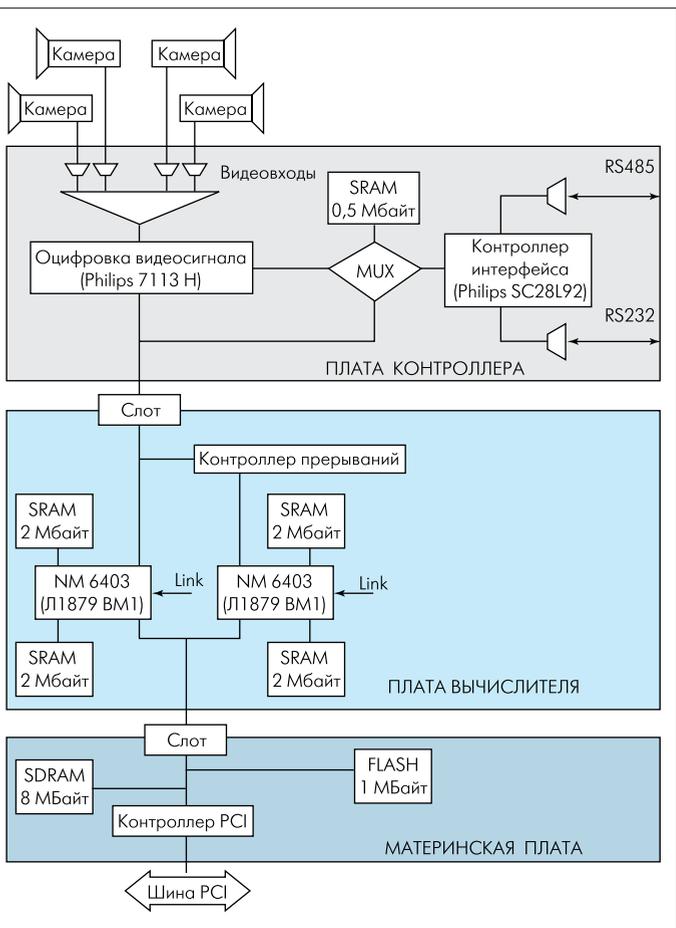
Наиболее ответственный этап разработки таких комплексов, как "Трафик-Монитор", — этап испытаний. Поскольку "Трафик-Монитор" предназначен для работы в составе систем управления транспортными потоками и на контрольно-пропускных пунктах, к нему предъявляются высокие требования по надежности и по точности определения характеристик транспортных потоков. Так, относительные ошибки определения общего числа транспортных средств и их средней скорости не должны превышать 1% и 5%, соответственно. Все это налагает жесткие требования на правила приемки и методы испытаний комплекса "Трафик-Монитор", закрепленные в ТУ. В частности, для определения функциональных характеристик

комплекса "Трафик-Монитор" используется восемь специально снятых сценариев транспортных потоков, характеристики которых определены аналитически. Проведение испытаний также позволило усовершенствовать работу алгоритма и программного обеспечения комплекса "Трафик-Монитор".

В результате разработки удалось добиться того, что относительные погрешности определения статистических характеристик (при дальности видимости транспортных средств или их фар не менее 50 метров и при скоростях движения не менее 20 км/час) не превышают 5% при определении средней скорости, 1% при определении общего числа транспортных средств и 10% при их классификации по типам.

СОЗДАНИЕ БИБЛИОТЕК ТИПОВЫХ ФУНКЦИЙ

При ЦОИ используются методы, многие из которых — типовые для широкого спектра задач: проективные преобразования, дискретные свертки, унитарные преобразования (Адамара, Хаара, Карунена-Лозва, двумерное дискретное преобразование Фурье, дискретное косинусное преобразование), методы сжатия (JPEG, MPEG, вейвлет-преобразования), векторно-матричные операции и т.д. Это означает, что создаваемые в НТЦ "Модуль" процессоры необходимо поддерживать не только базовым ПО (транслятор, компилятор, компоновщик, библиотекарь и т.п.), но и библиотеками типовых функций. Кроме того, при разработке таких сложных программных комплексов, как "Трафик-Монитор", важен не только учет особенностей архитектуры процессора, но и максимально эффективное использование ресурсов всей вычислительной системы комплекса, правильное распределение задач обработки данных между процессорами. Трудности же, возникающие при программировании мно-



Блок-схема вычислительного комплекса "Трафик-Монитор"



гопроцессорных систем, известны – это и синхронизация процессов, и методы обмена данными, и механизмы доступа разных процессоров к общим ресурсам. Подобные задачи тоже могут быть решены при помощи соответствующих библиотек.

В то же время, опыт показал, что самостоятельная разработка и тестирование библиотечных функций программистом, впервые использующим язык ассемблера для специального процессора, требует неоправданно больших затрат времени (годы). С другой стороны, если сравнивать одну и ту же процедуру, например, умножение вектора на матрицу с накоплением, написанную на языке C++ и переведенную на ассемблер компилятором и изначально написанную на ассемблере с учетом особенностей архитектуры процессора L1879 VM1, то в первом случае время счета будет в 30 раз больше, чем во втором. Поэтому библиотеки типовых функций в значительной степени избавляют разработчиков прикладных программ и вычислительных комплексов от детального изучения особенностей архитектур процессоров и программирования на ассемблере.

В НТЦ "Модуль" была организована разработка таких библиотек. Отметим, что данная работа требует творческого подхода не только к разработке программ функций, но и к методам формирования и описания библиотек. Уже сегодня библиотеки векторно-матричных преобразований и специальных преобразований (сверток конечных массивов, двумерных унитарных преобразований, сжатия изображений) содержат около 500 функций. Они представляют самостоятельный научный и практический интерес для реализации типовых преобразований изображений на нейропроцессорах НТЦ "Модуль". Причем некоторые из библиотек были разработаны в процессе создания комплекса "Трафик-Монитор". Эти библиотеки могут быть использованы для цифровой обработки не только видео изображений, но применимы к радиолокационным, тепловым, телевизионным и др. изображениям. Набор библиотек НТЦ "Модуль" представлен на сайте <http://www.module.ru>, разработка библиотек продолжается, и мы будем благодарны всем заинтересованным лицам за предложения и замечания по этим библиотекам.

ВЫВОДЫ

Опыт разработки и создания вычислительного комплекса "Трафик-Монитор" является уникальным как в плане технических подходов, так и с точки зрения демонстрации возможностей процессора, разработанного в НТЦ "Модуль". На многочисленных отечественных и зарубежных выставках комплекс "Трафик-Монитор" неизменно вызывал большой интерес, в том числе в силу того, не демонстрировались аналоги с таким набором технических возможностей, как в комплексе "Трафик-Монитор".

За счет высокой производительности процессора L1879 VM1 при проведении векторно-матричных вычислений в комплексе "Трафик-Монитор" были реализованы сложные и высокоэффективные алгоритмы ЦОИ, а для распознавания типов транспортных средств была синтезирована и обучена нейросеть. В результате достигнуты высокие уровни достоверности результатов решения. Все это, а также разработка и создание на базе процессора L1879 VM1 образцов аппаратных платформ комплекса являются ноу-хау и определяют актуальность и научную ценность проекта "Трафик-Монитор".

Практическая значимость работы обусловлена широким спектром областей применения полученных решений в задачах управления транспортными потоками. Вычислительный комплекс "Трафик-Монитор" может быть использован как информационное средство для принятия решений центром управления транспортными потоками, для формирования решений в контроллерах управления свето-

форными объектами, для контроля потока машин на контрольных пунктах портов, таможенных постов, платных автодорог, крупных автостоянок и т.п. На базе работ по комплексу "Трафик-Монитор" в НТЦ "Модуль" проводились экспериментальные работы по созданию стереосистем ЦОИ. Были созданы опытные стереосистема определения габаритов и подсчета числа осей большегрузных автомобилей и информационная система предупреждения столкновения автомобиля.

В перспективе с появлением нейропроцессора нового поколения (конец 2003-начало 2004 годов) появятся возможности сократить число процессоров в комплексе "Трафик-Монитор" и расширить спектр функциональных задач, в частности, решать в реальном времени наряду задачей идентификации транспортных средств с опережением их номерного знака.

