РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я
№ 1 1995

УДК 536.6 : 681.324

А. В. Березовский, В. И. Каблуков, В. А. Козлачков, И. И. Коршевер, Ю. В. Лыков, С. А. Павлов, М. Ю. Шадрин

осуществляющая в реальном времени сканирования обработку и отображение информации, поступающей от системы промышленной интроскопии повышенного разрешения, построенной по принципу рентгеновской трансмиссионной томографии. Пакет прикладных программ пользователя обеспечивает предобработку данных, поступающих с приемников рентгеновского излучения сканирующего устройства томографа, двухэтапное преобразование Радона над синограммой, последующую обработку восстановленного изображения, отображение двумерного массива данных на всех этапах обработки, а также архивацию восстановленных объемов и создание базы данных для последующей обработки трехмерных изображений. Необходимая производительность (130 Мфлопс) достигается введением в архитектуру станции арифметического периферийного процессора СП-130, построенного на четырех однокристальных сигнальных процессорах TMS320C30 фирмы "Texas Instruments" (США). Программная оболочка взаимодействия системы с оператором выполнена в идеологии "Windows" и предоставляет пользователю широкие возможности в области универсальной обработки изображений с использованием СП-130.

Постановка задачи. Принципы рентгеновской трансмиссионной компью терной томографии находят все большее применение для решения задач про мышленной интроскопии [1]. Исследования здесь проводятся в двух направ лениях: совершенствование сканирующих систем, в том числе излучающих и сенсорных элементов этих систем, и создание компьютерных проблемно ори ентированных систем, позволяющих осуществлять всю необходимую для вос становления изображения и последующего повышения его качества обработку в процессе получения томографической информации [2]. По мере повышени скорости сканирующих устройств, качества приемных элементов и услож нения алгоритмов обработки растут и требования к технике компьютерно реконструкции. В настоящее время здесь применяются достаточно мощны вычислительные системы, способные не только удовлетворить требования конструкции сканера, но и улучшить параметры системы в целом вычисли тельными методами.

Данная работа была проведена совместно с коллективом рентгено физиков — разработчиков рентгеновского микротомографа повышенного раз решения [3]. Высокая скорость сканирования и получения проекций изобра жения (поток данных от сканирующего устройства до 2^{16} Кбайт/с — один оборот в минуту, по 1024 угла позиционирования на оборот, 1024 сенсорны отсчета на приемной линейке), реализованная в данном проекте, поставил перед авторами задачу создания вычислительной системы с производительно стью, достаточной для восстановления каждого кадра изображения в тако

* По докладу "IBM PC/AT-based X-ray Computerized Tomography Workstation", прочитанном на Международном симпозиуме по компьютерной томографии (CT-93, Новосибирск, Росси 10—14 августа 1993 г.).

потоке за время порядка 20—30 с. Одновременно система должна обладать достаточной универсальностью для гибкого подбора алгоритмов реконструкции и дальнейших этапов обработки.

В данной работе излагаются результаты такого исследования. Поскольку вычислительную систему, обладающую производительностью до 130 миллионов операций с плавающей точкой в секунду (мегафлопсов), адекватной изложенным выше требованиям, пришлось проектировать как синтетический аппаратно-программный комплекс, то данная работа строилась как процесс исследования и подбора алгоритмов, а затем проектирования аппаратных акселераторов и программного обеспечения, поддерживающего все функции системы. Тем не менее хотя приложения проведенной работы конкретны, ее результаты имеют достаточно универсальный смысл и могут быть применены в задачах широкого спектра томографической реконструкции и обработки изображений.

Этапы обработки. Существующие системы сканирования имеют ряд технически трудно преодолимых недостатков. *Предварительная обработка* данных, осуществляемая на первом этапе, помогает преодолеть некоторые из них. Содержание предварительной обработки существенно зависит от конструкции и параметров конкретной системы сканирования и в значительной степени влияет на качество восстановленного изображения. Предварительная обработка включает: 1) нормировку приемников рентгеновского излучения, учитывающую темновой ток, чувствительность и взаимовлияние отдельных датчиков; 2) учет угловой зависимости интенсивности источника излучения; 3) учет нестабильности интенсивности импульсов источника излучения во время сканирования; 4) учет возможных погрешностей в работе механики системы сканирования, например «автоцентрирование», при котором производится линейный сдвиг каждой проекции для совмещения координат центра проекции и центра ее массы.

На втором этапе производится томографическая *фильтрация* проекционных данных.

Классическое обращение Радона осуществляется над проекциями, полученными в параллельном пучке. Тем не менее современные рентгеновские сканирующие устройства, реализующие трансмиссионный томографический процесс, как правило, используют точечный излучатель и линейно-протяженный приемник, что обусловливает специфическую веерную геометрию проецирования. Восстановление изображений из веерных проекций осуществляется одним из альтернативных способов — прямым или интерполяционным [2, 4].

Процедуры прямого восстановления изображений в веерном пучке и в параллельном пучке в целом структурно идентичны. Разница лишь в том, что прямое восстановление на первом этапе использует специальное ядро фильтра, учитывающее неравномерность распределения лучей по просвечиваемой области и вызываемое этим обстоятельством искажение топологии пространства преобразования. Такое преобразование может быть реализовано независимо с каждой поступающей проекцией («на лету») и, следовательно, требует минимальных системотехнических затрат и минимизирует ошибки «смаза», возникающие от возможных перемещений восстанавливаемого объекта за время сканирования. Это достоинство метода «оплачивается» сравнительно большими вычислительными затратами.

В интерполяционном методе веерный пучок рассматривается как совокупность лучей, взятых из соответствующих «задержанных» и «упреждающих» параллельных проекций. Необходимое переупорядочение отсчетов веерной проекции в совокупность отсчетов адекватной параллельной проекции осуществляет входной циклический буфер данных, размер которого достаточен для формирования вектора одной (задержанной) параллельной проекции. Проблема интерполяции возникает по той причине, что каждый отсчет из веерного пучка при переносе на дискретную сетку координат «угол проекции — расстояние до центра проецирования» параллельного пучка попадает не на узлы этой сетки, а лишь внутрь некоторого пространственно-углового элемента разре-

шения. В описанной системе для вычисления точного значения отсчетов проекций в параллельном пучке используется билинейная интерполяция (так называемый «метод повторного разбиения» [4]).

Безусловно, дополнительная процедура интерполяции может служить и дополнительным источником погрешностей восстановления, особенно если сигнал зашумлен. Однако сведение веерных проекций к параллельным позволяет ускорить процесс восстановления, требующий для параллельных проекций вдвое меньших вычислительных затрат (временные затраты на перепаковку по сравнению с затратами на само восстановление пренебрежимо малы). Кроме того, введение системного буфера сглаживает поток данных и предоставляет дополнительные системотехнические удобства для управления всеми процессами томографа.

Несомненным преимуществом интерполяционного метода восстановления в сравнении с прямым является возможность использования для снижения общего уровня артефактов линейной фильтрации общего вида. Это удобно реализовать, совмещая томографическую и линейную фильтрации в одном операторе в спектральной области. В системе предусмотрен набор таких операторов (см. таблицу), что позволяет гибко ими варьировать.

Интерполяция является и наиболее тонким вопросом третьего этапа процесса восстановления — *обратного проецирования* фильтрованных проекций на сетку изображения («сборка» изображения), ибо независимо от того, прямым ли методом или методом повторного разбиения получены проекции, координата элемента изображения на оси проекции, как правило, не является целым числом [5]. При повторном разбиении эти два этапа интерполяции целесообразно организовать как единый интерполяционный процесс.

Из фундаментальной теории квантования известно, что изображение, двумерный спектр которого ограничен по обеим осям частотой W, адекватно разрешается квантованием самого изображения с дискретным шагом $\Delta = \pi/W$. При выборе величины шага Δ согласуются многочисленные параметры сканирующего устройства, обеспечивающие предельно достижимое для выбранных элементов сканатора и его конструкции разрешение. Более сложен вопрос квантования самих проекций: при угле проецирования $\Theta = \operatorname{arctg} A/B$, где A и B — взаимно простые числа, возникает необходимость во «вторичной дискретизации» проекции с шагом $\delta = \Delta/\sqrt{A^2 + B^2}$, и, более того, существует детерминированная связь между двумерной координатой элемента изображения (размером $A \times B$ элементов изображения) и одномерной координатой

Тип фильтра	Количество интерполируемых точек на интервале квантования				
	2	4	8	16	32
Блекмана	0,656	0,306	0,234	0,219	0,215
Ханна	0,809	0,387	0,301	0,281	0,275
Хэмминга	0,863	0,420	0,332	0,309	0,304
Рамачандрана — Лакшминараянана (e = 1,0) [6]	0,999	0,666	0,621	0,614	0,614
Рамачандрана — Лакшминараянана (e = 0,5)	1,407	0,777	0,656	0,633	0,629
Шеппа — Логана	1,812	0,946	0,776	0,738	0,731
Рамачандрана — Лакшминараянана (e = 0,0)	2,419	1,291	1,073	1,026	1,015

его проекции, так что теоретически в некоторых случаях (так называемые «критические сечения») можно восстановить изображение по единственной проекции [6]. Очевидно, реальные сканаторы не обладают достаточным разрешением для выявления эффекта «вторичного квантования»; более того, точность такой глубокой интерполяции оказывается избыточной на фоне измерительных шумов приемников и неопределенности позиционирования и эффективность ее ограничивается лишь случаями с малым числом приемников [7]. Поэтому обычно на практике число опорных значений принимается равным $8—16M$, где M — число сенсорных элементов в приемной решетке, а остальным значениям выборок из проекции просто присваивается значение ближайшего соседа (интерполяция нулевого порядка) [2]. Этот метод значительно сокращает вычислительные затраты, связанные с интерполяцией.

Тем не менее вопрос правильного выбора числа точек интерполяции и формы интерполирующей функции, решаемый, как правило, на интуитивном уровне. в работе был изучен: проводилось измерение качества восстановленучастках (в процентах от задаваемой интенсивности тестового объекта). В описываемой системе проводилась предварительная интерполяция проекций на 2, 4, ..., $32M$ подынтервала.

Четвертый этап — *обработка восстановленного изображения*, характер которой зависит от его качества и выбранной стратегии дальнейшего анализа. На этом этапе пользователю доступен весь арсенал обработки изображений, которым располагает базовый программно-аппаратный комплекс.

Архитектура вычислительного комплекса. Изложенные требования к обработке могут быть удовлетворены с помощью проблемно ориентированного вычислительного комплекса (рабочей станции), снабженного обширной библиотекой прикладных процедур и гибкой и удобной пользовательской оболочкой.

Созданная рабочая станция базируется на компьютере IBM PC/AT-286/386 стандартной конфигурации. Вычислительным ядром станции является арифметический периферийный процессор СП-130 [6], построенный на четырех однокристальных сигнальных процессорах TMS320C30 фирмы "Texas Instruments" (США) (32 разряда в форматах целочисленном и с плавающей точкой, достигаемая производительность 130 Мфлопс). Благодаря такой вычислительной мощности система позволяет восстанавливать изображения размером 1024×1024 элемента из исходной синограммы такого же размера (угловое разрешение при сканировании $2\pi/1024$ рад) за 30 с (30 мс на обратное проецирование одной проекции или 30 нс на получение одной частичной суммы в координате восстанавливаемой точки при фиксированном угле поворота сканирующего устройства в процессе обратного проецирования*). Такая скорость реконструкции позволяет «разгонять» вращающийся сканер до угловой скорости, равной одному полному повороту в минуту, не прерывая процесса реконструкции, и, следовательно, реконструировать (с указанными выше параметрами) по два сечения в минуту при одновременном сканировании объекта вдоль оси вращения.

Пакет прикладных программ пользователя обеспечивает реализацию описанных выше этапов обработки и отображение и архивирование двумерного массива данных (в том числе и последовательности восстановленных сечений).

Пользовательская оболочка. Взаимодействие оператора с системой осуществляется при помощи программной интерактивной оболочки IMG30. Эта оболочка позволяет работать с перекрывающимися графическими окнами с

---

* Базовая система предполагается достаточно мощной, чтобы можно было пренебречь временем, затрачиваемым на обмен процессора СП-130 с жестким диском.

помощью меню и манипулятора типа «мышь». Для удобства пользователя система содержит справочник по каждому пункту меню. Оболочка поддерживает графические режимы высокого разрешения для большинства карт VGA. Система может работать с файлами в стандартных графических форматах GIF, TIFF.

В систему встроен набор стандартных операций над изображениями, поддерживаемый вычислительной мощностью СП-130 (арифметические и логические операции, функциональные и геометрические преобразования, преобразования диапазона значений, генерация обьектов, различные фильтры, вычисление статистических характеристик и другие функции). Кроме этих стандартных процедур, прикладной программист может реализовывать свои собственные алгоритмы обработки данных путем организации последовательности вызовов функций внутри процессора СП-130, используя встроенный интерпретатор команд. Процедуры обработки данных готовятся в системе программирования для однокристального процессора TMS320C30 с помощью программного обеспечения фирмы "Texas Instruments" (компилятор Си, ассемблер, редактор связей) и библиотеки прикладных процедур SLIB (более 200 процедур) процессора СП-130.

Для отладки программ интерпретатора существует пошаговый режим работы. Можно задавать точки останова, просматривать и изменять значения переменных. Используя эту систему, пользователь освобождается от работы по программированию отображения данных, распределения памяти для обьектов в процессоре СП-130, операций с файлами и других рутинных операций, прилагая все усилия лишь для разработки собственных алгоритмов обработки данных.

Библиотека прикладных процедур SLIB представляет собой набор базовых векторных и матричных операций, оптимизированных по скорости вычислений, при помощи которых можно выполнить обработку данных, находящихся в памяти сигнального процессора. Библиотека включает в себя различные программы обработки данных, как простые (например, поэлементное сложение или умножение векторов), так и более сложные (например, быстрое преобразование Фурье, обратное проецирование, решение системы линейных уравнений и др.).

Для просмотра результатов обработки (векторов, матриц, объемов, интерпретируемых в системе как иерархия объектов) предусмотрен обширный набор инструментов. Многооконная система отображения позволяет одновременно наблюдать множество объектов. Количество используемых окон при этом не ограничено. Количество объектов также не ограничено: система поддерживает автоматическую «подкачку» из памяти процессора СП-130 на диск. Пользователь может гибко выбрать поддиапазон значений элементов объекта для отображения.

Большие изображения можно просматривать через маленькое окно путем панорамирования («прокручивая» обьект под окном) или масштабирования. Выбирая «мышью» пиктограммы изменения масштаба, можно последовательно увеличивать или уменьшать изображение в 2, 4, 8, 16, 32 раза. Увеличение масштаба выполняется с линейной интерполяцией. При этом сам объект не изменяется (благодаря вычислительной мощности процессора СП-130 масштабирование с интерполяцией осуществляется «на лету» — при выводе на экран). Для просмотра мелких деталей можно воспользоваться программной подвижной «лупой», выделяющей фрагмент исходного обьекта в новом окне с произвольным масштабом.

Интегрированная среда IMG30 может быть легко адаптирована под конкретную задачу и рассчитана на широкий круг прикладных программистов и пользователей.

Заключение. Изложенные результаты создают методическую основу для проектирования вычислительных систем, ориентированных на реконструкцию томограмм и последующую обработку восстановленных изображений в широком круге томографических задач. В более общем смысле в сочетании с арифметическим акселератором СП-130 созданная система может быть

использована как универсальный аппаратно-программный инструмент для обработки изображений.

Описанная рабочая станция находится в опытной эксплуатации в системе микротомографической интроскопии «Квант-С» [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вайнберг Э. И.** Проблемы промышленной томографии // Электронное моделирование. 1990. 12, № 14.
2. **Хермен Г.** Восстановление изображений по проекциям. М.: Мир, 1983.
3. **Pereverzev V. B., Kondrat'ev V. I., Ignat'ev I. V., Voronov Ju. A.** X-ray tomography system "Kvant-C" // VI International Symposium on Computerized Tomography (CT-93). Novosibirsk, Russia, 1993.
4. **Lewitt R. M.** Reconstruction algorithms: Transform methods // Proc. IEEE. 1983. 71, N 3. P. 125.
5. **Mersereau R. M., Oppenheim A. V.** Digital reconstruction of multidimensional signals from their projections // Proc. IEEE. 1974. 62, N 10. P. 1319.
6. Цифровая обработка сигналов и изображений. Аппаратные и программные разработки: [Просп.] /СО РАН. ИАиЭ. Новосибирск: ИАиЭ СО РАН, 1993.
7. **Donohue K. D., Saniie J.** A scanning and sampling scheme for computionally efficient algorithms of computer tomography // IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing. 1989. ASSP-37. P. 402.

Поступило в редакцию 15 августа 1994 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!