

4.3. КОНВЕЙЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ТИПА “РЕГИСТР-РЕГИСТР”

Наряду с фирмой CDC разработкой и производством конвейерных вычислительных систем занималась Cray Research Inc., которая была основана в 1972 г. главным конструктором систем CDC 6600 и 7600 Сеймором Р. Креем (Seymour R. Cray, 1925–96). Однако конвейерные ВС фирмы Cray Research существенно отличались по архитектуре от систем STAR-100 и CYBER-203 и CYBER-205.

Архитектура первых систем Cray относилась к типу “регистр-регистр” (рис.4.4). Архитектура такого типа предопределяет в составе ВС векторные регистры, каждый из которых способен хранить вектор-операнд. Кроме того, при реализации векторных команд векторы-операнды извлекаются покомпонентно из векторных регистров, а вектор-результаты запоминаются также в одном из векторных регистров. До начала реализации векторной команды вектор-операнды должны быть загружены в векторные регистры из оперативной памяти. Предусматривается возможность переноса вектор-результатов из векторных регистров в память.

Векторные регистры играют почти такую же роль, как сверхоперативная память – КЭШ-память (Cache Memory) в обычных ЭВМ. Для повышения эффективности эксплуатации конвейерных ВС этого типа требуется как можно более интенсивно использовать операнды, пока они находятся в векторных регистрах.

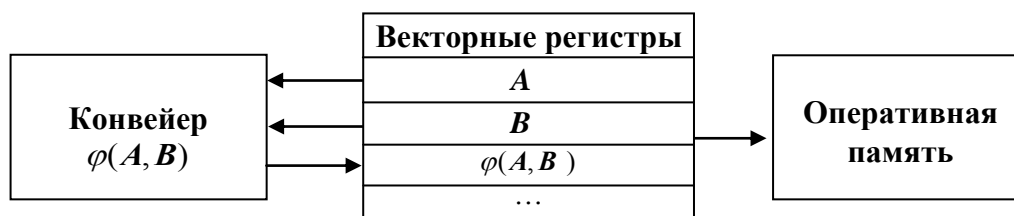


Рис. 4.4. Архитектура ВС типа “регистр-регистр”

В рамках архитектурной концепции конвейерных ВС типа “регистр-регистр” фирма Cray Research произвела ряд совместимых моделей [4]:

Cray-1, Cray X-MP, Cray Y-MP, Cray C90, Cray T90.

В этом ряду только первая модель, т.е Cray-1, была однопроцессорной, а остальные члены ряда – мультипроцессорные ВС. Процессор в любой из этих систем ориентирован на реализацию векторных операций. Он по сути является мультиконвейером, т.е. представляется программируемой композицией из специализированных конвейеров.

Мультипроцессорные модели Cray X-MP, Cray Y-MP, Cray C90 и Cray T90 называют также параллельно-векторными ВС или PVP-системами (PVP – Parallel Vector Processors).

Фирма Cray Research выпускала также и модификации отмеченных выше моделей и породила еще один ряд мультипроцессорных вычислительных систем:

Cray-2, Cray-3, Cray-4,

который был архитектурно несовместим с рядом, эволюционировавшим от Cray-1.

Следует особо отметить, что в процессе разработок мультипроцессорных ВС фирма Cray Research сильно отошла от изначального архитектурного канона (см. рис. 4.4). Каждая очередная разработка была заметным эволюционным развитием архитектуры предшествующей системы, и в конце концов фирма Cray Research с диалектической неизбежностью встала на платформу распределенных вычислительных систем. Подтверждением сказанному служит семейство вычислительных систем с массовым параллелизмом или MPP-систем:

Cray T3D, Cray T3E, Cray T3E-900, Cray T3E-1200, Cray T3E-1350

(MPP-systems – Massively Parallel Processing Systems, массово-параллельные ВС).

С момента своего создания фирма Cray Research претерпела ряд преобразований. Так, в 1989 г. из данной фирмы под проект Cray-3 выделилась Cray Computer Corporation, которую возглавил С. Крей. В феврале 1996 г. произошло поглощение Cray Research Inc. фирмой SGI (Silicon Graphics Inc.). В августе 1999 г. SGI создает подразделение Cray Research исключительно для бизнеса в области суперкомпьютеров. В марте 2000 г. активы этого подразделения были проданы Tera Computer Company, и с этого времени начинает функционировать Cray Incorporation. Ныне Cray Inc. – мировой лидер по суперкомпьютерам.

В последующих разделах будут описаны архитектурные возможности Cray-систем, относящихся к видам PVP и MPP.

4.3.1. Система Cray-1

Создание вычислительной системы Cray-1 было завершено фирмой Cray Research в 1976 г. Быстродействие системы – 160 MFLOPS ($16 \cdot 10^7$ опер./с при выполнении операций с плавающей запятой над векторами данных и 37 млн. опер./с – над скалярами), емкость оперативной памяти 8–64 М байт, длина слова данных – 64 двоичных разряда, цена – 5–9 млн.дол. Система Cray-1 успешно конкурировала на рынке суперЭВМ вплоть до 1982 г.

Система предназначалась для векторной и скалярной обработки данных. Вычислительная система Cray-1 состояла из 4 функциональных подсистем [3]: управления программой, конвейеров, регистров, памяти и ввода-вывода (рис.4.5).

Подсистема управления программой ВС Cray-1 наряду со стандартными устройствами и узлами (счетчик команд, средства организации ветвлений, устройство прерывания и т.п.) имела и буферную память для команд.

Подсистема конвейеров это и есть процессор ВС Cray-1. Он представлялся как композиция из 12 функционально ориентированных конвейеров. Данная композиция подразделялась на 4 группы: для операций над адресами, скалярных операций, операций над числами с плавающей запятой и векторных операций. Конвейеры состояли из сегментов – элементарных блоков обработки (ЭБО) данных. Каждый ЭБО был ориентирован на выполнение своей микрооперации, длительность цикла любого ЭБО – 12,5 нс ($12,5 \cdot 10^{-9}$ с). Каждый конвейер был способен выдавать результаты на каждом цикле работы, следовательно, цикл системы – 12,5 нс.

Группа конвейеров для операций над адресами состояла из конвейеров для сложения и умножения целых чисел, причем первый из них имел в своем составе два ЭБО, а второй – шесть ЭБО. Группа конвейеров для скалярных операций была представлена счетчиком (3 ЭБО) и тремя конвейерами: для сложения целых чисел (3 ЭБО), логических операций (1 ЭБО) и сдвига (3 ЭБО). Группа конвейеров для операций с плавающей запятой состояла из конвейеров для сложения, умножения и вычисления обратной величины (6, 7 и 14 ЭБО соответственно). Группа конвейеров для векторных операций имела конвейеры для сложения целых чисел (3 ЭБО), логических операций (2 ЭБО) и сдвига (4 ЭБО). Все конвейеры могли работать одновременно (параллельно). Деление в системе Cray-1 осуществлялось с помощью конвейера вычисления обратной величины.

Подсистема регистров ВС Cray-1 включала следующие основные регистры с программным доступом:

- 1) восемь 24-разрядных адресных *A*-регистров;
- 2) шестьдесят четыре 24-разрядных промежуточных адресных *B*-регистров;
- 3) восемь 64-разрядных скалярных *S*-регистров;
- 4) шестьдесят четыре 64-разрядных промежуточных скалярных *T*-регистров;
- 5) восемь векторных *V*-регистров.

Каждый из V -регистров был способен хранить вектор из шестидесяти четырех 64-разрядных компонентов.

Кроме этих пяти групп регистров имелись также: программно доступный регистр, устанавливавший необходимую длину векторов; 64-разрядный регистр маскирования векторов, разряды которого соответствовали элементам векторных регистров; 64-разрядный регистр часов реального времени.

Подсистема регистров вычислительной системы Cray-1 – это по сути сверхоперативная память (с циклом 6 нс), обладающая емкостью 4888 байт.



Рис. 4.5. Функциональная структура системы Cray-1

Конвейеры имели доступ (для получения операндов и для записи результатов) только к A -, S - и V -регистрам; B - и T -регистры позволяли повысить скорость скалярной обработки. Скорость передачи для B -, T - и V -регистров равна одному слову за цикл системы, а для A - и S -регистров – одному слову за два цикла.

Следовательно, совокупность B –, T – и V –регистров (как память для кратковременного хранения данных) благоприятно повлияла на производительность системы.

Подсистема памяти и ввода-вывода BC Cray-1 имела в своем составе оригинально организованную оперативную память. Последняя обладала емкостью 1 М слов и состояла из 16 независимых банков ёмкостью 64 К слов каждый. В свою очередь любой банк включал в себя 72 модуля памяти, причем каждый из них предназначался для хранения одного разряда всех слов данного банка. Из 72 разрядов слова 64 служили в качестве рабочего слова (команды или операнда), а остальные 8 разрядов предназначались для исправления одиночных и обнаружения двойных ошибок в рабочем слове. Время цикла одного банка было равно четырем циклам системы, т.е. составляло 50 нс. Однако наличие 16 независимых банков позволило организовать 16-кратное чередование адресов.

Ввод-вывод информации осуществлялся в вычислительной системе Cray-1 через 12 входных и 12 выходных каналов, которые обеспечивали суммарную скорость 500 тыс. 64-разрядных слов в секунду.

Система команд Cray-1 содержала 128 основных команд. Команды могли иметь одну или две 16-разрядных части. При формате команды (например, арифметической или логической) в виде одной части 7 разрядов отводилось под код операции, по 3 разряда – для адресов двух регистров, в которых хранились два операнда, 3 разряда – для адреса регистра, в который заносился результат. Разряды команды, которые использовались для двух адресов операндов, могли применяться как единое поле команды для адресации B – или T – регистров. Это же поле при формате команд в виде двух частей в совокупности с 16 разрядами второй части использовалось и для адресации основной оперативной памяти.

В целях ускорения выполнения команд была предусмотрена их буферизация при помощи четырех буферов команд ёмкостью в 64 16-разрядных частей команды в каждом (рис.4.5). Скорость передачи для буферов команд была равна 16 командам за цикл.

Арифметические операции с фиксированной запятой выполнялись над числами форматов 24 или 64 разряда. Для выполнения арифметических операций с плавающей запятой под мантиссу отводилось 49 разрядов, а под порядок – 15 разрядов, что обеспечивало представление чисел в диапазоне от 10^{-2500} до 10^{+2500} .

Операционная система COS (Cray Operating System) обеспечивала режим пакетной обработки (до 63 задач). Оптимизирующий транслятор CFT (Cray Fortran Compiler) для языка высокого уровня ANSI 66 FORTRAN IV учитывал особенности векторной обработки в системе Cray-1. В программное обеспечение входили также макроассемблер CAL (Cray Assembler Language), библиотека стандартных программ, загрузчик и другие сервисные средства.

Особенность архитектуры BC Cray-1 состояла в том, что она обладала способностью адаптации к структуре решаемой задачи. Последнее достигалось настройкой (программным формированием) цепочек (макроконвейеров) из произвольного числа конвейеров и с произвольной их последовательностью. В таких макроконвейерах передача информации между соседними конвейерами осуществлялась непосредственно (через регистры), т.е. без пересылок в оперативную память. Следует также подчеркнуть, что в Cray-1 допускалась параллельная работа как конвейеров, так и элементарных блоков обработки в пределах любого конвейера. Система была способна выполнять как скалярные, так и векторные операции, причем одновременно могло выполняться несколько как скалярных, так и векторных операций.

Конструкция BC Cray-1 уникальна. Система была выполнена в виде 12 клинообразных стоек, имеющих высоту 1,96 м и расположенных по дуге в 270° внутри окружности с диаметром 2,63 м (причем на высоте 0,48 м диаметр окружности уменьшался до 1,44 м). Такой “кольцевой” принцип компоновки конструкции BC Cray-1

позволил достичь незначительных длин электрических соединений между устройствами и узлами (не более 4 футов, 1 фут = 0,3048 м), следовательно, уменьшить задержки при прохождении сигналов. В системе было применено фреоновое охлаждение.

Комплекс архитектурных, структурных и конструктивных решений позволил в условиях микроэлектронной базы начала 70-х годов достичь в ВС Cray-1 длительности цикла в 12,5 нс и высокого уровня надежности.

Первая поставка системы Cray-1 была осуществлена в Лос-Аламосскую национальную лабораторию (Los Alamos National Laboratory) в 1976 г. Поставленная конфигурации ВС имела память емкостью 1 млн. слов, цена поставки – 8,8 миллионов долларов. Фирмой Cray Research было произведено всего 16 систем Cray-1.