

УДК 681.327.8

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПОСТРОЕНИЯ

Э.В.Евреинов, В.И.Лиратков

В последние годы в нашей стране и за рубежом получило довольно большое развитие новое направление в вычислительной технике, известное в литературе под названием вычислительные системы (ВС) и среды [1-3]. В основе этого направления положена модель коллектива вычислительных машин, которая отличается качественно от общепринятой модели вычислительной машины фон Неймана. Эта модель строится на принципах параллельного выполнения большого числа операций, переменной логической структуры, конструктивной однородности. Применение такой модели позволяет при относительно невысоких требованиях к физико-технической базе создавать высокопроизводительные и надежные вычислительные системы для решения сложных задач, возникающих в народном хозяйстве. Важной особенностью таких вычислительных систем является относительная простота математического обеспечения при решении сложных задач [2,4,5]. Объясняется это тем, что принятый метод крупноблочного распараллеливания позволяет расчленивать сложную задачу на большое число слабо связанных между собой простых подзадач. Каждая подзадача решается обычными методами на относительно простой вычислительной машине - элементарной машине системы.

Взаимодействие между подзадачами обеспечивается с помощью системного матобеспечения, которое не зависит от числа подзадач и может настраиваться в зависимости от сложности задачи на разное число элементарных машин. Разложение математического обеспечения на две части - матобеспечение элементарной машины и

системы - позволяет резко упростить требования к математическому обеспечению и тем самым облегчить решение одной из сложнейших проблем в вычислительной технике. Вычислительные системы, их классификация и основы построения довольно подробно освещены в ряде монографий [2,6-8] и статей, например, [9-12]. Среди возможных классов вычислительных систем выделяются два основных класса: сосредоточенные вычислительные системы и распределенные вычислительные системы.

Сосредоточенные вычислительные системы характеризуются размещением элементарных машин в непосредственной близости друг от друга. В этих условиях запаздывание в каналах связи между машинами практически несущественно. Первой сосредоточенной вычислительной системой явилась система "Минск-222", построенная на базе ЭВМ "Минск-2/22" в 1966 году.

В данной работе рассматриваются основные принципы построения распределенных вычислительных систем (РВС), определяются их особенности и области применения.

Распределенные вычислительные системы

Распределенными вычислительными системами называются системы, элементарные машины которых расположены на значительном расстоянии друг от друга и в которых запаздывание сигналов [13] в каналах связи может значительно превышать среднюю длительность машинной операции.

Необходимость создания распределенных вычислительных систем определяется тем, что в настоящее время существующий вычислительный парк территориально рассредоточен по районам, городам и областям страны [14]. Как правило, крупная организация имеет вычислительную машину или даже вычислительный центр, оснащенный машинами средней и большой мощности. Однако во многих случаях для решения сложной задачи мощности данного вычислительного центра, а тем более отдельной машины не хватает, в то время, как на других вычислительных центрах машины могут использоваться не в полной мере. Объединение таких вычислительных центров в единое целое, в единую систему с помощью соответствующих каналов связи позволяет резко увеличить вычислительную мощность, доступную одному пользователю. Но,

что при объединении вычислительных машин (ВМ) в РВС пользователь, находящийся на одной машине, получает возможность использовать не только вычислительную мощность других машин или всей системы, но и также ресурсы, как программа и данные.

Распределенные вычислительные системы обладают такими основными свойствами сосредоточенных систем, как:

1) возможностью доступа пользователя к любым ресурсам системы;

2) возможностью осуществления различных режимов организации вычислительного процесса (пакетная обработка, разделение времени и т.д.);

3) способностью реализации основных способов управления вычислительным процессом: централизованного, децентрализованного, иерархического и т.д. (операционная система, обеспечивающая управление ВС, может храниться в каждой машине системы или быть распределена между отдельными ВМ системы);

4) большими возможностями в выборе конфигурации; система является переменной по своей природе и может адаптироваться к требованиям конкретного пользователя (может использовать изолированные ВМ, подсистемы с произвольным числом ВМ, всю систему в целом);

5) надежностью и живучестью, поскольку ни одна из ВМ системы (при ее соответствующей конфигурации) не является незаменимой, и выход из строя любой из них приводит только к снижению производительности ВС;

6) способностью достигать требуемые значения производительности, емкости памяти, скорости ввода и вывода и т.д. путем соответствующего подбора числа ВМ в системе;

7) возможностью расширения, которое в дальнейшем выполняется в соответствии с возникающими требованиями.

Однако вместе с тем РВС обладают рядом особенностей, которые возникают как при их проектировании, так и при эксплуатации, что позволяет выделить их в отдельный класс [10]. Рассмотрим эти особенности.

Особенности распределенных вычислительных систем

Поскольку ВМ РВС расположены друг от друга на значительных расстояниях, то ввиду значительной стоимости каналов связи, обмен информацией осуществляется по их ограниченному числу (в пределе по одному) последовательным кодом. Более того, в большинстве случаев приходится использовать один и тот же канал для передачи управляющей информации и массивов данных, в то время как в сосредоточенных системах в силу того, что ВМ находятся в непосредственной близости друг от друга, может использоваться необходимое число каналов [12]. Эта особенность РВС приводит к необходимости специально организовывать вычислительный процесс таким образом, чтобы обмен информацией между ВМ был частично или полностью совмещен с вычислениями.

Наличие ограниченного числа каналов связи между ВМ в РВС и большое время передачи сигналов между ВМ приводит к значительным затратам времени на обмен, что нельзя не учитывать при построении РВС. Для увеличения производительности РВС необходимо принять различные меры, позволяющие уменьшить как время обмена информацией, так и его влияние на производительность системы.

Вторая важная особенность РВС вытекает из того факта, что во многих случаях машины, объединяемые в систему, принадлежат разным организациям. В силу этого внесение каких-нибудь изменений в схемы используемых машин и в их математическое обеспечение, необходимых для построения РВС, недопустимо. Это предъявляет определенные требования к структуре системного устройства и к структуре и функциям системного математического обеспечения.

Технические средства РВС

К техническим средствам РВС относятся собственно вычислительные машины, образующие систему, аппаратура сопряжения ВМ с каналами связи и канал связи.

В ы ч и с л и т е л ь н ы е м а ш и н ы . В качестве ВМ РВС могут быть использованы машины 2-го или 3-го поколений с развитой системой внешних устройств. Машины могут быть как однотипными, так и разнотипными. В первом случае РВС будет одно-

родной, во втором - неоднородной. Построение однородных РВС позволяет исключить из рассмотрения, например, такие вопросы, как преобразование форматов команд и данных, перекодировка программ и т.д. Поэтому на первом этапе исследования РВС целесообразно строить однородные системы. Переход же к неоднородным системам, может быть осуществлен достаточно просто. В самом деле, вместо вычислительной машины в качестве основного вычислительного элемента может быть взята сосредоточенная вычислительная система. В этом случае приходим к более сложной, иерархической структуре РВС.

У с т р о й с т в о с в я з и . В качестве устройств связи, обеспечивающих подключение каналов связи к ВМ РВС, могут использоваться специализированные устройства (адаптеры) или вычислительные машины. Применение адаптеров имеет следующие положительные стороны. Разрабатываемые специально для конкретной РВС они могут иметь более простую структуру, что в свою очередь приводит к их высокой надежности и низкой стоимости. Быстродействие таких устройств может быть полностью согласовано с быстродействием используемых каналов связи. Однако, как правило, такие устройства не относятся к числу программируемых, поэтому все программы, в том числе программы передачи данных (с промежуточным хранением, если оно необходимо), проверки и коррекции ошибок и т.д. постоянно хранятся в ВМ РВС и выполняются ею. Это приводит к расходованию части мощности машины системы на реализацию подобных программ и, следовательно, уменьшает мощность, доступную пользователям РВС. Эти потери мощности еще больше увеличиваются в случае неоднородных РВС, так как возникает необходимость в перекодировке команд и данных.

Использование ВМ в качестве устройства связи позволяет снизить эти потери. При таком подходе в узлах связи, в которых расположены основные ВМ, устанавливаются вычислительные машины, которые берут на себя следующие функции: промежуточное хранение передаваемых массивов; разбиение больших массивов информации на пакеты в пункте передачи и сборка пакетов на приемном конце; кодирование сообщений при передаче их в целях повышения достоверности и декодирование сообщений при приеме;

управление распределением сообщений по линиям связи с целью обеспечения наиболее рациональной загрузки последних и минимизация времени передачи данных. Применение ВМ в качестве устройств связи (в дальнейшем будем называть эти машины — вычислительными машинами связи) позволяет в случае неоднородной ВС возложить на них функции, связанные с перекодировкой программ, освободив тем самым машины РВС от этих функций. Далее, при работе РВС могут произойти сбой в отдельных ВМ. Для того, чтобы сбой в одной ВМ не связывался на работе других ВМ РВС, необходимо часть функций управления возложить на вычислительные машины связи. Так как функции любой вычислительной машины связи одни и те же, то в целях простоты построения, эксплуатации, диагностики и т.д. необходимо, чтобы все вычислительные машины связи были одинаковыми. При этом для уменьшения стоимости РВС в целом стоимость вычислительной машины связи должна быть незначительной по сравнению со стоимостью основных ВМ. Таким требованиям в наибольшей степени удовлетворяют мини-машины. Мини-ЭВМ обладают достаточно высоким быстродействием, высокой скоростью обмена информацией между внешними устройствами и памятью, высокой надежностью, малыми габаритами, системой прерывания, развитой системой математического обеспечения.

Задача построения РВС разбивается на две части:

1. Построение однородной вычислительной системы, вычислительными элементами которой являются вычислительные машины связи.

2. Организация взаимодействия основных ВМ с этой однородной системой.

Использование вычислительной машины связи позволит достаточно просто разрешить конфликтные ситуации, возникающие при построении подсистем в том случае, когда они пересекаются. Возможны ситуации, когда одна и та же машина является для одной подсистемы основной, а для другой транзитной (ретрансляционной). Использование различных входных каналов вычислительной машины связи для этих подсистем позволит организовать нормальную работу подсистем.

К а н а л ы с в я з и. Методы построения и эффективность РВС в значительной степени зависят от используемых каналов связи [10]. Под каналом связи понимается линия связи со всей необходимой приемно-передающей аппаратурой. При организации свя-

зи между ВМ в РВС возможны различные подходы. Прежде всего связи между ВМ могут быть с фиксированными и переменными направлениями. В первом случае ВМ связаны между собой постоянно закрепленными (некоммутируемыми) каналами передачи данных. Каждый канал при этом используется для обмена информацией только между непосредственно связанными ВМ. Во втором случае ВМ не имеют между собой постоянно закрепленных каналов и взаимодействуют друг с другом через центры коммутации (т.е. используются коммутируемые каналы). Последние представляют абонентам (вычислительным машинам) каналы связи.

При использовании коммутируемых каналов возможны два метода организации связи: с коммутацией каналов и с коммутацией сообщений. В первом случае организуется сквозной канал, связывающий через узлы связи одну ВМ с другой, а затем передается информация. Во втором случае информация поэтапно передается и запоминается в узлах связи, причем передача к назначенному пункту осуществляется по мере освобождения каналов между узлами в соответствующем направлении. В свою очередь при использовании метода с коммутацией каналов возможно однократное или многократное установление связи в процессе решения задачи. В первом случае все связи между ВМ устанавливаются только один раз перед началом решения задачи и могут разрушаться в процессе решения только тогда, когда необходимость в той или иной связи пропадет. Во втором случае между ВМ устанавливаются и разрушаются связи в процессе решения задачи в соответствии с программой.

Некоммутируемые каналы связи имеют то преимущество перед коммутируемыми, что передают информацию с большей достоверностью. Это достигается тем, что ВМ могут быть связаны широкополосными каналами связи, а также отсутствием затрат времени на установление связи между ВМ. Итак, применение в РВС некоммутируемых каналов связи является предпочтительным. Однако, если учитывать трудности выделения некоммутируемых каналов и высокую их стоимость, то во многих случаях более реальной является ориентация на использование коммутируемых каналов.

При использовании коммутируемых каналов в режиме коммутации каналов с многократным установлением связи необходимо учитывать, что обмен информацией между любыми ВМ возможен при условии, если в момент поступления вызова между ВМ можно устано-

вить тракт из нескольких последовательно соединенных свободных участков. Причем увеличение загрузки каналов приводит к возрастанию вероятности отказов в обслуживании заявки на соединение. Необходимо также учитывать, что от соединения к соединению время распространения сигнала между одними и теми же ВМ системы может меняться. Это объясняется тем, что коммутируемый канал создается из отдельных участков только на время связи. Между теми же двумя ВМ образуемый канал может содержать уже другие составные части, причем число транзитных пунктов и длина связи может меняться. Между ВМ системы должен быть один вид соединения — связь совершенно однотипных приемопередающих установок, работающих на равных скоростях, через один или несколько однотипных по скорости каналов связи.

Коммутируемые каналы связи в режиме коммутации каналов с однократным установлением связи обладают всеми достоинствами вышерассмотренных, позволяют значительно сократить затраты времени на установление связей между ВМ, что в конечном итоге приводит к более высокой производительности ВС.

Коммутируемые каналы с коммутацией сообщений обладают рядом особенностей по сравнению с каналами, работающими в режиме коммутации каналов. Подлежащий передаче код выдается ВМ в центр коммутации, где он запоминается вместе с адресом. В случае занятости канала на одном из участков маршрута следования сообщение (куда входят адресная и информационная части) ставится в очередь и хранится в памяти вплоть до освобождения канала. При этом возможно применение разнотипной совершенно несовместимой по скорости и формату сообщений приемопередающей аппаратуры как у ВМ, так и у центров коммутации сообщений. Сообщения имеют различную степень срочности. Поэтому им может быть присвоен различный приоритет. При использовании данного режима возможны практически любые виды многоадресных соединений.

В распределенных вычислительных системах могут использоваться каналы с различным быстродействием: низкоскоростные (50–200 бод), среднескоростные (200–4800 бод) и высокоскоростные (свыше 4800 бод).

В качестве каналов связи могут применяться как проводные линии связи, так и свободное пространство (например, радиоканал, лазерный канал и т.д.). В первом случае затраты определяются линиями связи и приемопередающей аппаратурой, во вто-

ром — только приемопередающей аппаратурой. Выбор того или иного канала при построении РВС определяется конкретными условиями и в значительной степени влияет на производительность и стоимость РВС.

Таким образом, при проектировании РВС должны быть решены такие технические вопросы, как:

- 1) выбор состава оборудования для РВС; формулирование требований к вновь разрабатываемому оборудованию;
- 2) анализ характеристик имеющихся в распоряжении каналов связи и возможных их комбинаций;
- 3) определение оптимальной скорости каналов связи; размещение каналов в РВС и выбор типов устройств, которые должны быть использованы для управления связью;
- 4) анализ имеющихся форматов сообщений, схем для их передачи и выбор наилучших из них;
- 5) исследование чувствительности РВС к изменению параметров ее составных частей;
- 6) изучение надежности и живучести РВС с учетом всех ее составных частей.

Математическое обеспечение РВС

При проектировании РВС наряду с техническими вопросами возникает ряд задач, связанных с системным математическим обеспечением.

Математическое обеспечение РВС должно предусматривать автоматическую подготовку задач для решения, управления прохождением их через РВС, разбивку РВС на подсистемы, контроль функционирования РВС, перераспределение ВМ по подсистемам в случае выхода из строя отдельных ВМ.

В математическом обеспечении РВС, как и в математическом обеспечении любой современной ЭВМ, можно выделить две части: систему программирования и управляющую систему. Система программирования включает в себя языки для написания параллельных программ, трансляторы, библиотеку стандартных параллельных программ и т.д. Управляющая система должна обеспечивать планирование и распределение между задачами ресурсов системы, управление выполнением заданий и т.п. Необходимо отметить, что, в си-

ду особенностей РВС системные операции (настройка, обмен, управление) реализуются программным путем. Для этой цели в управляющую систему вводится специальный комплекс программ. Это, в свою очередь, приводит к некоторым изменениям в составе, сущности и реализации системных операций, так как важную роль при этом играют особенности математического обеспечения используемых ВМ. Комплекс управляющих программ должен оформляться по стандартной структуре, принятой в системе математического обеспечения базовой вычислительной машины РВС. Поэтому эти программы могут рассматриваться как рабочие программы, запуск которых осуществляется обычным способом, принятым в данной машине.

Ввиду удаленности составных частей РВС друг от друга, управляющая система должна находиться в каждой машине РВС. Программы управляющей системы, объем которых зависит от режимов работы РВС и особенностей математического обеспечения конкретной ВМ, могут храниться как в оперативной, так и во внешней памяти машины. Однако в оперативной памяти постоянно находится резидентная часть управляющей системы.

Одной из важнейших областей применения РВС является решение задач в автоматизированных системах управления (АСУ) различного назначения.

Распределенные вычислительные системы найдут широкое распространение при решении задач практически на всех уровнях АСУ (отраслевых, городских, межотраслевых, территориальных). Любая реальная АСУ оперирует с информационными процессами, характеризующимися той или иной степенью территориального рассредоточения. Поэтому любую АСУ можно рассматривать как некоторую информационную сеть. Однако комплекс задач, решаемых АСУ, может быть настолько широк, что для их решения потребуются ресурсы других сетей — другой организации и административного подчинения. Использование в данном случае РВС, в которой пользователи имеют доступ практически к любым ресурсам системы, позволит достаточно легко решить поставленную задачу. Это возможно с учетом способности РВС к самонастройке под текущие задачи, выбора числа и мощности участвующих в решении ВМ, их загрузки, пропускной способности каналов связи и т.д. В крупной РВС может одновременно существовать множество

подсистем, реализующих задачи различных АСУ, взаимодействующих между собой. Проблема объединения вычислительных средств на таком уровне является чрезвычайно сложной, однако она допускает поэтапное решение с последовательным и непрерывным расширением как мощности системы, так и класса решаемых с ее помощью задач.

Распределенные вычислительные системы со структурной точки зрения подобны сетям вычислительных машин [15]. Однако в отличие от последних распределенные вычислительные системы позволяют реализовать не только режим сети, но и режим решения сложных задач, представленных параллельными программами.

Рассмотренные выше общие принципы построения РВС, а также основные требования к их технической и математической частям дают возможность с единых позиций подходить к практической реализации таких систем. Для проверки правильности теоретических предпосылок была создана распределенная вычислительная система из ЭВМ "Минск-32". В модели использовались две ВМ, расположенные на расстоянии порядка 4 км друг от друга и соединенные между собой некоммутируемым каналом связи. Система функционирует с начала 1973 г. Анализ эффективности системы при решении некоторых классов больших задач (в частности, матричных и сводящихся к ним) показал, что система превосходит по производительности две изолированные ЭВМ "Минск-32" в 2-3 раза. Это происходит, в частности, за счет увеличения объема оперативной памяти.

Опыт эксплуатации системы на базе ВМ "Минск-32" подтвердил правильность общего подхода к проектированию РВС и показал, что распределенные вычислительные системы могут эффективно использоваться при решении сложных задач.

Л и т е р а т у р а

1. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. О возможности построения вычислительных систем высокой производительности. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
2. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск, "Наука", 1966.
3. ЕВРЕЙНОВ Э.В. Вычислительные системы и среды. — "Автоматика и вычислительная техника", 1971, № 1, с.17-28.
4. КОСАРЕВ Ю.Г. Распараллеливание по циклам. — В кн.: Вычислительные системы. Вып. 24. Новосибирск, 1967, с.3-20.

5. КОСАРЕВ Ю.Г. Об автоматизации программирования для однородных вычислительных систем. - В кн.: Вычислительные системы. (Труды I Всесоюзной конференции по вычислительным системам. Методы вычислений и программирования на вычислительных системах. Вып. 4). Новосибирск, 1968, с. 75-79.
6. ПОСПЕЛОВ Л.А. Введение в теорию вычислительных систем. М., "Сов.радио", 1972.
7. Мультипроцессорные вычислительные системы. Под ред. Я.А.Хетагурова. М., "Энергия", 1971.
8. ГОЛУБЕВ-НОВОКИДОВ И.С. Многомашинные комплексы вычислительных средств. М., "Сов.радио", 1967.
9. ПАПЕРНОВ А.А., ГАРАНИНА О.И. Многомашинная вычислительная система с общим полем памяти. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 48. Новосибирск, 1971, с. 48-63.
10. ВЕПРИК В.Н., КИРАТКОВ В.И., КАН В.Г., МИХАНОВ А.И. Некоторые особенности построения распределенных универсальных вычислительных систем. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 39. Новосибирск, 1970, с.137-146.
11. ЕВРЕЙНОВ Э.В., ЛОНАТО Г.П. Универсальная вычислительная система "Минск-222". - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 23. Новосибирск, 1966, с. 13-20.
12. ВИНУКОВ В.Г., ДИМИТРИЕВ Ю.К., ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСТЕЛАНСКИЙ В.М., ЛЕХНЕВА Г.М., МИРЕНКОВ Н.Н., РЕЗАНОВ В.В., КОРОШЕВСКИЙ В.Г. Однородная вычислительная система из мини-машин. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 51. Новосибирск, 1972, с. 127-145.
13. ЕВРЕЙНОВ Э.В. О возможности построения вычислительных систем в условиях запаздывания сигналов. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 3. Новосибирск, 1962, с. 3-16.
14. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КИРАТКОВ В.И., РЫЖАВИН В.Д. - В кн.: Труды семинара "Проектирование элементов и устройств вычислительной техники". Л., 1973, с.17-28.
15. Системы передачи данных и сети ЭВМ. Сб. статей под ред. П.Грина и Р.Лахи. М., "Мир", 1974.

Поступила в ред.-изд.отд.
13 декабря 1973 года