

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Ю. И. Бродский

Одним из ключевых направлений развития вычислительной техники в настоящее время является развитие параллельных вычислительных систем, способных на несколько порядков повысить производительность вычислений за счет одновременного, параллельного, выполнения нескольких фрагментов вычислительной задачи на нескольких имеющихся в системе процессорах [1].

Положительной стороной таких систем является относительная простота реализации многопроцессорной вычислительной системы на базе уже имеющегося процессора, по сравнению с увеличением производительности этого процессора хотя бы в два - три раза. Отрицательная их сторона - необходимость специального программного обеспечения, позволяющего разбивать исходную вычислительную задачу на подзадачи, способные выполняться параллельно, и синхронизовывать выполнение параллельных подзадач.

В данной работе мы остановимся на достаточно широком классе вычислительных задач, для которых при определенном подходе к их программированию (а именно, при объектно-событийном подходе),

разбиение их на ряд подзадач, способных выполняться параллельно, становится естественным, также естественной вытекающей из предлагаемого подхода к программированию является и синхронизация параллельных подзадач.

Предлагаемый метод развивался в отделе Имитационных систем Вычислительного центра РАН в ходе имитационного моделирования ряда сложных организационно-технических систем [2-5] и может быть применен для моделирования на параллельных вычислительных системах широкого класса многокомпонентных комплексов с развитыми межкомпонентными информационными связями.

Предлагаемая концепция, подробно описанная в [4], исходит из представления о многокомпонентности предмета имитации. Под многокомпонентностью понимается возможность естественного вычленения некоторого количества относительно обособленных первичных составляющих, функционирование которых во взаимодействии друг с другом и формирует подлежащую имитации реальность. Модельные образы таких составляющих будем называть объектами. Основное положение концепции моделирования звучит так: предмет имитации есть совокупность объектов. Имея это в виду, вместо сочетания "предмет имитации" в дальнейшем будем использовать термин "комплекс".

В реальности первичные составляющие комплексов часто компонуются (организационно или конструктивно) в подкомплексы, те, в свою очередь - в подкомплексы более высокого уровня и т.д. Для модельного отражения подобной иерархии вводится понятие группа. Это объединение какого-либо числа объектов и (или) нескольких образований, которые сами являются группами. Таким образом, комплекс представляет собой совокупность объектов, организованных в древовидную иерар-

хию групп. Верхний уровень этой иерархии назовем головной группой.

Функционирование объекта трактуется как один или несколько параллельно протекающих процессов. Каждому назначается свой "материальный носитель", именуемый прибором, и в этом смысле можно говорить, что объекты делятся на приборы; однако реальных прототипов приборов может и не существовать.

При построении модели комплекса стержнем структуризации данных является разделение их по принадлежности приборам, объектам и группам. Точнее говоря, с каждой из образующих модели можно связать какие-то данные, и в совокупности наборов этих данных, организованных принятым способом компоновки приборов в объекты, объектов в группы и т.д., предлагается видеть весь информационный фонд модели.

В реальности среди составляющих комплексов часто бывает по несколько одинаковых, и нередко в функционировании разных составляющих выделяются одинаковые компоненты. При этом одинаковость, разумеется, означает лишь принадлежность одному типу, т.е. не требует совпадения во всем. Область допустимых различий - значения неких величин, являющихся атрибутами каждого экземпляра данного типа. Предлагаемая концепция моделирования включает понятия типов объектов, приборов и групп, а величины, чьими значениями исчерпываются различия между экземплярами одного типа, называются фазовыми переменными (хотя среди них могут быть и не меняющиеся со временем). Такое определение подразумевает, что если кроме фазовых переменных есть еще какие-либо данные по экземплярам типа, то их значения должны быть одинаковы для всех экземпляров. Такие данные называются константами (хотя среди них могут быть меняющиеся

со временем величины).

Считается, что приборы во время своего функционирования могут вырабатывать сигналы, предназначенные конкретным адресатам (другим приборам или самому себе в будущее) и сопровождающиеся сообщениями (возможно, пустыми), а также принимать сигналы и сообщения, посланные им. Связь адресатов с отправителями обеспечивается постоянными каналами, фиксируемыми в описаниях приборов, объектов и групп, причем эти каналы организуются так, что данный вход данного прибора-получателя всегда связан с одним конкретным выходом конкретного прибора-отправителя и есть жесткое соответствие между каналами и типами передаваемых по ним сообщений.

Обычно сигналами моделируются импульсы, которые возникают в автоматической части системы управления исследуемого комплекса, а сообщениями - сопряженные с ними пересылки данных. Формально же пара (сигнал - сообщение), являясь продуктом деятельности прибора-отправителя, должна быть отнесена к его фазовым переменным, причем динамическим, поскольку эти пары то рождаются приборами, то уничтожаются системой. Сигнал трактуется как булева величина, а сообщение, если оно непустое, может быть только списком из одинаковых по структуре записей, при этом данный сигнал либо всегда посылается без сообщения, либо может сопровождаться списком из записей одинаковой и жестко связанной с ним структуры.

Функционирование комплекса видится результатом слияния деятельности его объектов, а деятельность объекта представляется несколькими параллельно текущими процессами. Расщепление на процессы - это декомпозиция, оправданная многофункциональностью реальных объектов. Наряду с ней вводится и декомпозиция каждого про-

цесса во времени. Она нужна для формализации правил синхронизации процессов.

В эволюции каждого процесса предлагается выделять последовательные стадии, впредь именуемые элементами. Естественная содержательная трактовка элемента - алгоритм поведения в определенных условиях. Помня о взаимно-однозначном соответствии процесс-прибор, далее будем говорить, что функционирование прибора есть последовательное выполнение им присущих ему элементов. Число допускаемых различных элементов прибора произвольно, но считается конечным, чередование во времени элементов может быть и бесконечным (если бесконечно время имитации) и организуется по правилам, отражающим действие автоматической части системы управления комплекса.

По отношению к модельному времени все элементы всех приборов делятся на три категории: сосредоточенные, условно распределенные и распределенные. Сосредоточенные элементы в модельном времени всегда выполняются мгновенно. Выполнение же любого из прочих элементов обычно имеет ненулевую продолжительность и может распределяться между несколькими последовательными шагами имитации.

Условно распределенные и распределенные элементы отличаются друг от друга режимами появления во времени своих результатов, под которыми надо понимать новые значения каких-то фазовых переменных. Для условно распределенного элемента они определяются только в момент его окончания и нет никаких генерируемых элементом данных, которые появлялись бы на промежуточных шагах и могли бы немедленно использоваться другими элементами. Что же касается распределенного элемента, то он, как правило, выдает некие результаты на каждом (а не только на завершающем) шаге его выполнения. Содер-

жательно распределенные элементы - это отрезки процессов, описываемых эволюционными дифференциальными уравнениями. Типичный пример условно распределенного элемента - модель процесса решения вычислительной задачи.

Параллельное и коррелированное течение модельных процессов реализуется через точки синхронизации. Это - точки оси модельного времени, к которым привязываются все выполняемые вычисления. Отрезки временной оси между точками синхронизации образуют такты имитации. Сразу подчеркнем, что возможны такты "нулевой продолжительности".

Значения модельного времени в точках синхронизации определяются взаимодействием двух механизмов. Первый - это механизм назначения элементов на очередной такт, а второй - планирование моментов прерываний (в том числе моментов завершений) выполнения элементов. Сначала опишем второй механизм и принятую схему его сочетания с первым, а затем конкретизируем первый механизм.

Каждый сосредоточенный элемент трактуется как один алгоритм, а условно распределенный или распределенный - как пара, включающая таймер и основной алгоритм. Таймеры служат специальными процедурами планирования времени. При вызове таймера должен определяться и сообщаться системе очередной нужный элементу момент прерывания. Простейшая (но отнюдь не самая эффективная) схема планирования прерываний состоит в том, чтобы вызывать таймеры распределенных и условно распределенных элементов в начале каждого такта их выполнения. Наряду с ней можно предложить и другие, более эффективные. Так, например, при вызове таймера в момент начала выполнения элемента можно сразу жестко зафиксировать время его окончания,

тогда таймер больше вызываться не будет. В таких случаях будем говорить о блокировке таймера.

Алгоритмы элементов и таймеров одинаковы для всех экземпляров прибора данного типа, для разных экземпляров они работают, вообще говоря, с разными данными (фазовыми переменными экземпляра). Этим алгоритмам желательно быть повторновходными.

Строгое определение принципа синхронизации процессов состоит в следующем. Пусть начинается очередной такт имитации, в этот момент известно (почему, будет понятно далее), какие элементы должны выполнять приборы, и здесь:

а) для выполняемых распределенных и условно распределенных элементов вызываются, причем параллельно, незаблокированные таймеры, и если по отработке всех таймеров оказывается, что есть выполняемые сосредоточенные элементы, то шаг по времени устанавливается нулевым и вызываются (параллельно) их алгоритмы; если уже установлен ненулевой шаг, то в качестве момента окончания такта берется минимальное из времен, назначенных вызванными таймерами, и времен, которые заблокированные таймеры заказали ранее;

б) системные часы переводятся на время окончания такта;

в) вызываются (параллельно) основные алгоритмы тех выполняемых условно распределенных элементов, чьи таймеры запланировали их завершение на момент, совпавший с найденным временем окончания такта; если шаг по времени оказался ненулевым, вызываются (параллельно) основные алгоритмы всех выполняемых распределенных элементов;

г) для каждого прибора, завершившего выполнение элемента (либо потому, что он - сосредоточенный, либо потому, что заказанное тайме-

ром время завершения совпало с моментом окончания такта), в соответствии с правилами его функционирования (см. ниже) определяется к какому элементу он должен перейти в текущей ситуации; на этом такт имитации завершается.

Подчеркнем, что алгоритмы функционирования как таймеров, так и элементов выполняются параллельно, точками синхронизации вычислительного процесса являются времена окончания выполнения всех таймеров, всех сосредоточенных, а затем условно распределенных и распределенных элементов.

Для того чтобы сформулированная схема приобрела четкость рабочего алгоритма, осталось уточнить, что подразумевается в п. г под правилами функционирования приборов.

Прибор формирует свою последовательность элементов как конечный автомат, имеющий входами номер предыдущего элемента и полученные сигналы, а выходом - номер следующего элемента. Точнее говоря, когда прибор завершил выполнение очередного элемента, выбор следующего элемента определяется тем, какой именно элемент завершился и какие из совокупности всех входных сигналов прибора поступили на момент принятия решения. Данное положение формализуется введением автоматных функций приборов. Аргументов у каждой автоматной функции два: номер завершеного элемента и еще одно целое число, которое будем называть "номером старшего реализовавшегося события". Второй аргумент требует разъяснения. Суть в том, что для каждого прибора естественно разбить всевозможные комбинации значений булевых величин (есть сигнал, нет сигнала) на классы и считать, что при выборе очередного элемента роль играет не то, какая именно комбинация реализовалась, а то - каким классам она принадле-

жит. Соответственно для каждого элемента определяется свой набор алгебро-логических функций от булевых индикаторов наличия входных сигналов, причем такой набор, что хотя бы одна функция принимает значение "истина" при любой реализации значений аргументов; эти функции, именуемые далее событиями, ранжируются (нумеруются), и вторым аргументом автоматной функции служит номер старшего среди принявших значение "истина" событий.

Отметим здесь, что так как к моменту синхронизации вычислительного процесса (окончанию такта имитации) все сигналы уже вычислены, вычислять автоматные функции всех приборов можно также параллельно, для этого процедура их вычисления должна также быть повторной.

Таким образом, мы видим, что весь вычислительный процесс разбивается на такты, на каждом из которых все вычисления осуществляются параллельно.

В заключение заметим, что выполнение алгоритмов элементов параллельно исключает простое "подсматривание" чужих фазовых переменных, т.е. обращение к ним в любой момент, как это было возможно в [2-4]; из-за параллельности вычислений чужие фазовые переменные могут быть неопределены именно в момент обращения. В случае интереса к таким переменным нужно либо явно моделировать процесс их наблюдения, либо получать нужную информацию через механизм (сигнал, сообщение). С таким фактом мы также сталкивались в распределенных (многомашинных) системах имитационного моделирования [5].

Л и т е р а т у р а

- [1] К о р н е е в В.В. *Параллельные вычислительные системы* М.: Нолидж,1999.
- [2] Б р о д с к и й Ю.И., Л е б е д е в В.Ю., О г а р ы ш е в В.Ф., П а в л о в с к и й Ю.Н., С а в и н Г.И. *Общие проблемы моделирования сложных организационно-технических комплексов.*//Вопросы кибернетики. М.: Научный совет по комплексной проблеме "Кибернетика" АН СССР, 1990 с42-48.
- [3] Б р о д с к и й Ю.И., Л е б е д е в В.Ю. *Инструментальная система для построения имитационных моделей хорошо структурированных организационно технических комплексов.*//Вопросы кибернетики. М.: Научный совет по комплексной проблеме "Кибернетика" АН СССР, 1990 с49-63.
- [4] Б р о д с к и й Ю.И., Л е б е д е в В.Ю. *Инструментальная система имитации MISS.* М.: Вычислительный центр АН СССР, 1991.
- [5] Б р о д с к и й Ю.И. *Проблемы создания центра имитационного моделирования в INTERNET.*//Моделирование, оптимизация и декомпозиция сложных динамических процессов. М.: ВЦ РАН, 1998 с29-35.