

Вопросы разработки SIMD-языка параллельного моделирования динамических систем

Баженов Л.А.

Донецкий Государственный Технический
Университет, кафедра ЭВМ.
e-mail: lechat@cs.dgtu.donetsk.ua

Abstract

Bazhenov L. The Development of SIMD Language for Parallel Simulation of Dynamic System. The problems of modelling simplification and simulation processes using the parallel computing are very important. This paper describes principles of development the language for parallel simulation of dynamic systems, which is based on Object Oriented concepts.

1. Введение

Анализ литературы показывает, что к настоящему времени нет языков параллельного моделирования динамических систем (ЯПМ ДС). Рассматривая массивно параллельную моделирующую среду как объект диалогового общения пользователей и разработчиков параллельных моделей, анализируя сформулированные нами функции подсистемы диалога МПМС (ПД МПМС) [1], нельзя не заметить, что центральной проблемой реализации идеи ПД является разработка языка параллельного моделирования ДС как естественной составной части Simulation Software и активного лингвистического элемента в диалоге "Разработчик модели – МПМС". Рассмотрим основные вопросы разработки и имплементации языка параллельного моделирования ДС, ориентированного на функционирование в условиях SIMD-архитектур.

2. Требования, предъявляемые к языкам параллельного моделирования

Язык параллельного моделирования динамических систем – это программно-лингвистическое средство построения, отладки и исследования моделей ДС, реализуемых в составе МПМС.

Следуя принципу преемственности с языками моделирования непрерывных ДС, реализуемых на последовательных ЭВМ и учитывая опыт их применения, сформулируем требования к ЯПМ:

1. Язык параллельного моделирования должен быть объектно-ориентированным (ОО)[2]. В пользу этого подхода говорит его способность обеспечить структурную аналогию между параллельной моделью и моделируемой динамической системой, что в условиях сложных ДС приобретает весомое значение [3]. Формальное описание большого количества предметных областей может быть сведено к понятию динамических систем. Их описание аналогично для разных предметных областей. Это позволяет отразить в ОО-языке функциональность объектов предметной области и дать возможность пользователям специфицировать модели на содержательном уровне. На рис.1 представлены типичные этапы построения модели экспертом предметной области, которые должны поддерживаться ЯПМ.

2. ЯПМ должен содержать:

- ♦ средства описания (спецификации) параллельных моделей, легко осваиваемые и понимаемые специалистами различных предметных областей и базирующиеся на объектах абстрактной предметной области параллельного моделирования динамических систем;
- ♦ средства настройки на заданную предметную область, позволяющие компоновать проблемно ориентированные моделирующие среды;

- ♦ средства отладки и тестирования параллельных моделей, управления моделированием и визуализацией результатов модельных экспериментов;



Рисунок 1 – Этапы построения параллельной модели динамической системы

роования ДС должен отразить все позитивные качества блочно- и уравнение-ориентированных языков, свести к минимуму объем рутинной работы пользователей и разработчиков моделей.

Сформулированным требованиям соответствует структура средств ОО-языка параллельного моделирования ДС, представленная на рис.2, совместно с уровнями и этапами разработки параллельных моделей ДС и проведения модельных экспериментов.

На технологическом (проблемном) уровне моделируемые ДС описываются технологическими схемами, структурными схемами систем автоматизации, графами, которые кодируются в виде таблиц с технологическими комментариями. В ЯПМ должны быть предусмотрены входные языки спецификации, которые эффективно поддерживают разработчиков моделей на технологическом уровне и обеспечивают переход на последующие уровни разработки.

- ♦ средства диалоговой поддержки всех этапов разработки параллельных моделей и моделирования ДС.

3. В ЯПМ следует сохранить преимущество с блочно-ориентированными (БО) и уравнение-ориентированными (УО) языками моделирования, реализованными в последовательных ЭВМ на основе CSSL-стандарта [4]: полная интерактивность в сочетании с возможностью работы в пакетном режиме; легкая изучаемость начинающими специалистами; широкий набор операторов для построения моделей; возможность создания функций одной-трех переменных; наличие секций моделирования дискретных систем; отражение разрывных функций, аргументами которых может быть как время, так и другие переменные (события); реализация нескольких численных методов интегрирования; вызываемость программ базового языка программирования и возможность построения главной программы, управляющей моделированием; большой выбор команд для управления моделированием; развитые операции интегрирования векторных переменных; возможность исследования системы на устойчивость.

4. Язык параллельного модели-

На уровне формального описания моделируемых ДС язык должен обеспечивать топологический анализ структуры ДС и задание уравнений элементов технологического описания. Топологический анализ должен дать исходную информацию для автоматического формирования системы уравнений, описывающей динамические процессы в моделируемой ДС. Эту задачу решает уровень генерирования системы уравнений ДС в виде, удобном для моделирования, т.е. системы, разрешенной относительно вектора производных первого порядка и вектора переменных, которые определяются из подсистемы алгебраических уравнений.

Этот уровень разработки модели соответствует этапу записи уравнений в виде, пригодном для составления БО-схем и УО-операторов языков моделирования, реализуемых в последовательных ЭВМ. Начиная с этого уровня, можно интегрировать концепцию ОО-ЯПМ с БО- и УО-концепциями, используя их позитивные качества.

Уровень дискретного представления описания ДС обеспечивает переход от сформированной системы дифференциальных и алгебраических уравнений к их разностному аналогу, зависящему от выбранного численного метода решения. В БО- и УО-языках на этом уровне работают трансляторы спецификаций моделей (блок-схема и последовательность операторов) в дискретные системы уравнений. ОО-концепция может реализовать этот этап на основе взаимно однозначного соответствия между объектами данного уровня и библиотекой их дискретных аналогов.

Следующим уровнем построения модели



Рисунок 2 – Структура языка параллельного моделирования ДС, поддерживающего этапы построения параллельных моделей

является программа на языке параллельного программирования, реализующая дискретную систему уравнений. Предлагается разработать генератор, который автоматически формирует программу на ЯПП, входящем в прикладное программное обеспечение SIMD-систем. Представляет интерес изучить особенности генерирования программ на ЯПП с БО-, УО- и ОО-описаний параллельных дискретных моделей. Сгенерированная ЯПП-модель транслируется в исполняемый на SIMD-системе модуль, который отлаживается на тестовых примерах моделируемой ДС. При этом отладка носит

семантический характер, обратная связь по возможной корректировке модели может быть обращена к любому из предшествующих уровней.

После отладки работоспособная модель ДС переходит на *уровень пользователя*, который в соответствии с разработанным планом модельных экспериментов проводит моделирование ДС с визуализацией результатов.

3. ОО-подход и разработка ЯПМ

Моделью ДС назовем тройку $\Psi = \langle \Xi, \Theta, \wp \rangle$, в которой Ξ – множество типов объектов; Θ – множество объектов модели; \wp – отображение множества объектов модели в само себя $\wp: \Theta \rightarrow \Theta$. Данное отображение задает связи между объектами модели.

Элементы множества Ξ – операторы G_p . Оператор G_p представляет объект модели, который отображает входную информацию на текущем шаге моделирования в выходную и может быть представлен интегральным оператором, дифференциальным оператором или функциональным отображением. Для интегральных объектов верна формула:

$$Y(t_{i+1}) = G_p(X(t_i)), \text{ где}$$

$X(t_i)$ – множество входных значений модельного объекта на шаге моделирования t_i ; $Y(t_{i+1})$ – множество выходных значений на следующем шаге моделирования.

Модельные объекты дифференцирования и функциональные преобразователи отображают входное множество значений на текущем шаге моделирования в выходное множество на том же шаге моделирования: $Y(t_{i+1}) = G_p(X(t_i))$.

Абстрактно, SIMD-компьютер будем представлять парой $\Lambda = \langle \Omega, \mathfrak{J} \rangle$, где Ω – множество процессорных элементов (ПЭ), топология связей которых задается отображением $\mathfrak{J}: \Omega \rightarrow \Omega$.

Задача построения параллельной SIMD-модели состоит в определении способа отображения тройки Ψ в пару Λ и метода организации цикла моделирования.

Пусть мощность множества объектов в модели Θ равна N , а мощность множества процессорных элементов Ω – M . Будем полагать, что $N \leq M$. Определим взаимно однозначное соответствие R между множествами Θ и Ω . Отображение R будем называть *распределением объектов модели на сетке процессорных элементов*. При этом, множество $\Omega \setminus R(\Theta)$ не обязательно должно быть пустым. В силу того, что R взаимно однозначно, каждый объект модели назначается определенному процессорному элементу. Так как количество объектов в модели меньше количества ПЭ, то появятся свободные процессорные элементы. Нагрузить незадействованное подмножество ПЭ невозможно, т.к. на каждом машинном такте host-процессор выдает ровно одну команду для всей сетки процессорных элементов.

Пусть функциональное отображение C ставит каждому модельному объекту его тип: $\Xi = C(\Theta)$. Отображение функционально, а значит, каждому модельному объекту сопоставляется только один элемент множества Ξ . Примем мощность множества Ξ равной k . Это соответствует определению количества модельных объектов предметной области и их операторов G_p .

Отображение C разбивает множество Θ на k непересекающихся подмножества, таких, что:

$$\bigcup_{i=1}^k \Theta_i = \Theta \ \& \ \forall \theta \in \Theta_i, \exists \tau \in \Xi [C(\theta) = \tau]. \quad (1)$$

В результате, отношение R индуцирует разбиение множества Ω :

$$\Omega = R(\Theta) = R\left(\bigcup_{i=1}^k \Theta_i\right) = \bigcup_{i=1}^k R(\Theta_i) = \bigcup_{i=1}^k \Omega_i. \quad (2)$$

Моделирование на каждом шаге t_i осуществляется в два этапа:

- этап просчета формулы $Y(t_{i+1}) = G_p(X(t_i))$ или $Y(t_i) = G_p(X(t_i))$ для каждого p -ого модельного объекта;

- этап передачи информации между объектами модели в соответствии с отображением φ для связей между объектами модели и топологией связей процессорных элементов Ξ .

Этап просчета выходов $Y(t_{n+1})$ объектов модели разбивается на k шагов. Подмножество объектов, принадлежащих одному типу (1), просчитывается параллельно. При этом, обрабатывают только те ПЭ, которые удовлетворяют условию:

$$\forall \sigma \in \Omega, \exists \tau \in \Xi [R^{-1}(\sigma) = \theta \ \& \ C(\theta) = \tau]. \quad (3)$$

Т.е. параллельно работают только те ПЭ, на которых загружены модельные объекты одного типа. ЯПМ, ориентированный на супер ЭВМ SIMD-архитектуры должен поддерживать автоматическое отображение тройки Ψ в пару Λ и метод организации цикла моделирования.

3.1. Выделение объектов в модельной предметной области

На рис.2 выделено три основных способа задания технологического описания:

1. Технологические схемы;
2. Структурные схемы систем автоматического управления (САУ);
3. Таблицы кодирования графов.

Объектно-ориентированный язык параллельного моделирования (ОО ЯПМ) должен предоставлять визуальные средства поддержки этих трех способов [5, 6, 7]. Для эксперта предметной области данная возможность позволяет описывать модели своих предметных областей, используя язык терминов его отрасли. Для поддержки данного уровня проектирования модели динамической системы ОО ЯПМ предоставляет набор модельных объектов, используя которые можно построить технологическое описание ДС. Данный набор является словарем предметной области. Каждый модельный объект инкапсулирует в себе математическое описание сущности, принадлежащей словарю предметной области. Исследования показывают, что словари различных предметных областей могут быть построены с использованием одних и тех же математических представлений. Это позволяет говорить об абстрактной предметной области, которая состоит из абстрактных модельных объектов. Используя эти объекты, можно построить предметные области для экспертов-разработчиков разных специальностей.

Математическое описание динамических систем является результатом глубокого изучения физической сущности процессов, протекающих в каждом из элементов ДС, представленных в топологии. Для динамических процессов различной физической природы (электрические, механические, гидравлические, пневматические, химические, термодинамические, биологические и др.) существенным является характер изменения их параметров. Существуют процессы, параметры которых изменяются только во времени и не зависят от пространственных координат. Динамические системы, в которых имеют место эти процессы, называют системами с сосредоточенными параметрами (ДССП). ДССП описываются обыкновенными (линейными и нелинейными) дифференциальными уравнениями. Динамические системы, процессы в которых зависят от времени и пространственных координат, называются системами с распределенными параметрами (ДСРП). Рассмотрим вопрос выделения модельных объектов из предметных областей, в которых динамические системы могут быть описаны одним из трех приведенных выше способов.

Технологическая схема (ТС) содержит условные обозначения аппаратов, установок, материальных потоков, соединенных между собой в соответствии с технологией преобразования исходных материалов (сырья) в некоторую продукцию. Каждый элемент ТС характеризуется, прежде всего, входами и выходами. Вход – это абстрактное представление материального потока, подлежащего динамическому преобразованию в элементе ТС. Выход – это абстрактное представление материального потока, получаемого в результате динамических процессов, протекающих внутри элемента ТС. Основное назначение технологической схемы – дать наглядное представление об управляемой динамической системе по физически непротиворечивым связям входов и выходов.

Важным достоинством технологических схем является их способность к декомпозиции при детальном изучении элементов и к композиции при построении из изученных элементов усложняющихся структур. Любой объект, выделяемый из предметной области, в которой ДС представлена ТС, может быть описан как звено первого, второго, ..., n -ого порядка, если все процессы в данной предметной области описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Структурные схемы САУ – это хорошо развитое абстрактное представление топологии управляющей части динамических систем. Они содержат типичные элементы, характеризуют динамические свойства элементов видом передаточной функции, отражают статические характеристики (линейность и нелинейность) элементов и определяют связи между элементами по входам и выходам. Высокий уровень абстракции структурных схем позволяет им интегрироваться с технологическими схемами в процессе разработок управляемых технологических процессов и производств, обуславливает их естественную декомпозицию при анализе контуров управления по отдельным параметрам технологических схем и композицию при синтезе многосвязных систем управления технологическими процессами. Схемы САУ являются моделями абстрактной предметной области. В качестве модельных объектов принимается множество блоков с различными передаточными функциями.

Представление топологии динамических систем в виде графов связано, прежде всего, с широко распространенным классом динамических объектов, называемых сетевыми (СДО) [8]. К ним относятся электрические, гидравлические, газовые, пневматические, вентиляционные сети и технологические схемы, представленные в виде сетей. Характерной особенностью СДО-графов является то, что они позволяют формально отразить топологическое описание связей и математическое описание физических процессов в элементах графа (ветвях и узлах).

Анализ топологий современных управляемых динамических систем показывает, что для их описания зачастую требуются все два названных средства: в виде технологических схем и графов представляются динамические объекты управления, а структурными схемами – контуры управления, взаимосвязанные через объекты. В сетевом динамическом объекте преобразующими объектами являются ветви графа. Поэтому множество модельных объектов состоит из ветвей различного типа. Особенностью представления топологии сетевых объектов в виде графов является то, что в описании сохраняются исходные топологические признаки объекта.

Выделение объектов абстрактных предметных областей для моделирования ДСРП усложняется существованием зависимости параметров динамической системы не только по времени, но и по координате. Предлагается считать отдельными объектами динамические системы, описываемые уравнениями параболического, гиперболического и эллиптического видов. При этом свойства этих объектов зависят как от коэффициентов уравнений, так и от начальных и граничных условий.

3.2. Этапы объектно-ориентированного подхода к разработке ОО ЯПМ

При проектировании и реализации системы параллельного моделирования на базе ОО ЯПМ, можно выделить три подсистемы, разработка которых может вестись параллельно:

1. Подсистема построения модельной предметной области.
2. Подсистема построения модели.
3. Подсистема моделирования.

Рассмотрим только лишь подсистему построения модельной предметной области, т.к. задача построения оставшихся подсистем может быть решена с помощью стандартных средств. Основными этапами построения модельной предметной области являются:

1. Выделение классов модельных объектов предметной области, в которой будут проводиться модельные эксперименты.
2. Задание спецификации свойств и поведения модельных объектов в рамках определения класса. Выше были выделены модельные объекты для трех типов представ-

лений ДС и заданы их математические описания. С точки зрения ОО-подхода, текущее состояние объекта во время моделирования задается с помощью значений его свойств. Поведение объекта, т.е. изменение его состояния во время моделирования, как результат изменения значения, по меньшей мере, одного его свойства, представлено математическим описанием объекта.

3. Определение отношений между классами модельных объектов, что может сократить время создания новых классов модельных объектов при расширении предметной области. Целесообразно реализовать отношения наследования и использования между классами модельных объектов. Отношение наследования позволит общие спецификации свойств и поведения выделять в базовый класс, а при создании нового объекта, если это необходимо, наследовать нужные свойства и поведение. Отношение использования позволит создавать ссылки внутри спецификации класса модельных объектов на другие классы, чьи ресурсы используются при организации того или иного свойства или поведения.

Таким образом, каждый класс модельных объектов – это спецификация свойств и поведения, которая используется для создания конкретных объектов при построении модели и проведении модельных экспериментов. Подсистема построения модельной предметной области должна предоставлять средства создания этих спецификаций и их модификации.

Заключение

ОО-язык параллельного моделирования должен обслуживать все этапы построения модели и отличается наличием следующих уровней: технологического представления, формального описания, дискретного представления модели, уровня программ на языке параллельного программирования и проведения модельных экспериментов. Понятие абстрактной модельной предметной области позволяет выделить стандартный набор модельных объектов, каждый из которых инкапсулирует функциональные свойства реальных объектов. Этот набор модельных объектов может быть принят в качестве базового при построении моделей и других модельных предметных областей.

Изложенные подходы явились основой технического задания на разработку ОО ЯПМ, реализованного в SIMD-системе.

Литература

- 1 Святный В.А., Баженов Л.А., *Принципы построения подсистемы диалога массивно параллельной моделирующей среды*. Сборник трудов факультета вычислительной техники и информатики, 1996 г.
- 2 Lang M. *Objektorientierte Simulationstechnik*. Universität Stuttgart, 1994, 29S.
- 3 McMenamin S, Palmer J. *Essential Systems Analysis*. New York, NY: Yourdon Press. 1984.
- 4 Matko P., Zupancic B., Kazba R. *Simulation and modeling of continuous systems*. New York, London. Prentice Hall, 1992.
- 5 Schmidt B. *Simulationssysteme der 5 Generation*. Simulation in Passau (SIP), Heft, 1, 1994, s.5-6.
- 6 Schmidt B. *Die objektorientierte Modellspezifikation*. Simulation in Passau (SIP), Heft, 1, 1994, s.7-8.
- 7 Schmidt B. *Das problem der Gleichzeitigkeit bei der objektorientierten Modellspezifikation*. Simulation in Passau (SIP), Heft, 2, 1995, s.14-16.
- 8 Абрамов Ф.А., Фельдман Ф.А., Святный В.А. *Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии*. Киев. Наукова Думка. 1981.