

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «АЛТАЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Многоядерные процессы, параллельное
программирование, ПЛИС, системы
обработки сигналов**

**Сборник научных статей Всероссийской научно-
практической конференции**

Барнаул, 28 февраля 2014 г.

Барнаул 2014

СРЕДСТВА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОЯДЕРНОЙ ПОТОКОВОЙ РЕКУРРЕНТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ <i>Д.В. Хилько, Ю.А. Степченков, Ю.И. Шикунов</i>	58
ПОРТАТИВНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ <i>В.В. Пашнев, К.А. Свиридов</i>	70
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТЛАДОЧНОГО МАКЕТА ALTERADE1 BOARD В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ И КУРСОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ПЛИС» <i>И.С. Холопов</i>	79
Часть 2 Параллельное программирование и распределённые системы	86
СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА, УЧИТЫВАЮЩАЯ ОБЪЕКТИВНО СУЩЕСТВУЮЩИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭЛЕМЕНТОВ ЕГО ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ <i>А.А. Афанасьев</i>	87
ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ГРАНИЦЫ ВЗАИМНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДИСКРЕТНОГО КАНАЛА СВЯЗИ, УЧИТЫВАЮЩИЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕПРЕРЫВНОГО КАНАЛА <i>К. А. Батенков</i>	96
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ СИСТЕМЫ ЧАСТИЦ МЕТОДОМ СОБЫТИЙНО-УПРАВЛЯЕМОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ С РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕМ ВЫЧИСЛЕНИЙ <i>Т.А. Белов, В.И. Иордан</i>	107
МЕТОД СЛУЧАЙНОГО ПЕРЕБОРА В ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ РАЗБИЕНИЙ ГРАФ-СХЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ <i>Ватутин Э.И., Колясников Д.В., Мартынов И.А., Титов В.С.</i>	115

**СРЕДСТВА ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОЯДЕРНОЙ ПОТОКОВОЙ
РЕКУРРЕНТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ***

Д.В. Хилько¹, Ю.А. Степченков², Ю.И. Шикун³

*Учреждение Российской академии наук Институт
проблем информатики РАН (ИПИ РАН)*

Аннотация. На сегодняшний день, развитие архитектур, основанных на параллельных моделях вычислений, является наиболее активным и перспективным направлением в области разработки вычислительных систем. В то же время, недооцененными остаются системы, построенные на принципах потоковых моделей. Данная статья посвящена усовершенствованной потоковой модели вычислений и средству имитационного моделирования потоковой рекуррентной архитектуры (СИМПРА), реализующему предлагаемую модель. Рассматриваются ключевые аспекты новой модели вычислений и архитектура средств имитационного моделирования архитектуры. Описаны функциональные возможности имитационной модели и ее роль в комплексе программных средств разработки программного обеспечения для новой архитектуры.

Ключевые слова: модель вычислений, потоковость, рекуррентность, имитационная модель

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по программам фундаментальных исследований ОНИТ РАН за 2013 г. (проект 1.5), Президиума РАН (проект 16П-1) и при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-07-12068/13 офи_м

¹ dhilko@yandex.ru

² YStepchenkov@ipiran.ru

³ YIShikunov@gmail.com

Введение

В процессе развития вычислительной техники было разработано большое количество моделей вычислений как теоретического, так и прикладного характера. Наиболее известными теоретическими моделями являются: машина Тьюринга, λ -исчисления и частично-рекурсивные функции [1]. Появление этих моделей было обусловлено необходимостью определения: что же такое функция вычислимая с помощью алгоритма и всякая ли функция может быть вычислена по алгоритму. Перечисленные модели легли в основу современных парадигм программирования: машина Тьюринга – императивное программирование, λ -исчисления – декларативное (в большей степени логическое) программирование, частично-рекурсивные функции – функциональное программирование.

На основе машины Тьюринга появилась Равнодоступная адресная машина – модель, которая была взята за основу в архитектуре, названной впоследствии фон-неймановской или традиционной. Классическая модель фон-неймана является последовательной и, в настоящее время, повсеместно распространена. Она используется в качестве базисной в большинстве современных как последовательных, так и параллельных архитектур вычислительных систем.

Несмотря на относительную простоту и универсальность традиционная модель имеет ряд недостатков [2] для ее применения в параллельных моделях вычислений. Поэтому, практически одновременно с появлением фон-неймановской модели ведутся исследования по созданию новых нетрадиционных моделей вычислений и соответствующих им архитектур. Среди множества нетрадиционных моделей отдельного внимания заслуживают потоковые [3].

Авторы в работе [4] пишут:

“Развитие идей параллельных вычислений в 80-х годах XX века привело к исследованию нового класса архитектур вычислительных систем – потоковых архитектур. В архитектурах этого класса поток данных имеет приоритет над потоком команд и является инициатором вычислений. В ряде стран ведутся исследования и разработки систем потоковой архитектуры, но, несмотря на видимые преимущества – такие, как отсутствие «узких мест», характерных для фон-неймановской архитектуры, исключение вероятности обработки неподготовленных данных, – ряд проблем как технического, так и алгоритмического характера препятствует массовому применению потоковых архитектур.”

Проблемы реализации чистых потоковых архитектур в значительной степени тормозят развитие данной области вычислительной техники. В связи с этим различными научными коллективами были сделаны попытки преодоления данных проблем. Авторы в работе [5] пишут:

“В поисках путей усовершенствования потоковой модели вычислений, коллективом Института кибернетики имени В. М. Глушкова НАН Украины (Палагин А.В., Яковлев Ю.С. Махиборода А.В., и др.) была предложена идея новой потоковой модели вычислений [6], которая, впоследствии, была развита и доработана сотрудниками Института проблем информатики РАН (ИПИ РАН) – Степченковым Ю.А., Петрухиным В.С. и др. Полученная модель вычислений была названа рекуррентно-потоковой [7]. На ее основе была разработана многоядерная потоковая рекуррентная архитектура (МПРА).”

Настоящая статья посвящена МПРА и средствам ее моделирования. В разделе 2 рассматриваются ключевые особенности новой архитектуры. В разделе 3 приводится

архитектура средств имитационного моделирования и ее описание, указана роль имитационной модели в разрабатываемой инструментальной среде проектирования программного обеспечения (ПО) для МПРА.

Особенности рекуррентно-поточковой модели вычислений

Рассматриваемая новая модель вычислений относится к классу потоковых, поэтому для нее характерно большинство свойств моделей из данного класса. Но в рамках рекуррентно-поточковой модели существует несколько ключевых особенностей, разительно выделяющих ее:

- 1) Объединение двух, характерных подавляющему числу моделей вычислений, потоков - данных и инструкций в один единый поток *самодостаточных* данных. Благодаря наличию всего одного потока, а также некоторым другим архитектурным решениям в рамках МПРА обработка одной инструкции может быть осуществлена практически в два раза быстрее по сравнению с другими архитектурами.
- 2) Отказ от ассоциативной памяти, использование вместо нее так называемой памяти совпадений (раннее название – память адресной проверки) для определения совпадающих пар тегированных данных. Данное решение дает существенный рост производительности и уменьшение энергозатрат, но накладывает некоторые ограничения на структуру входного потока данных.
- 3) Рекуррентность – свойство новой модели, которое заключается в динамическом развитии вычислительного процесса. Авторы в [5] пишут: “В системе самодостаточных данных каждый следующий шаг обработки порождается в ходе развития процесса как функция от предыдущего. Таким образом, исходный поток инструкций рекуррентно

сворачивается, тем самым позволяя резко сократить накладные расходы, связанные с опережающим хранением трассы вычислительного процесса.”

Краткое описание основных характеристик рекуррентно-поточковой модели вычислений может быть найдено в работах [4, 5, 8]. Подробное описание новой модели вычислений и архитектуры, построенной на ее основе, может быть найдено в работах [7, 9].

Нетрудно заметить, что для рекуррентной организации вычислительного процесса не очевидна его сходимость. Поэтому было произведено доказательство сходимости вычислительного процесса и получены частично-рекурсивные функции это подтверждающие. Доказательство и полученные функции подробно описаны в работе [4].

Средства имитационного моделирования СИМПРА

Исследовательский статус, который носит рекуррентно-поточковая модель вычислений и МПРА привносит значительные трудности для разработки и написания эффективных программ, для них предназначенных. Кроме того, это также усложняет процесс отладки самой архитектуры. Поэтому в работе [8] авторами была поставлена задача разработки средств моделирования МПРА:

“Разработка модели преследует несколько целей, наиболее значимые из которых: отладка и доработка VHDL-модели РОС и ее реализации в виде СБИС; разработка и отладка ПОВ условиях постоянно совершенствующейся спецификации архитектуры; исследование реакций модели на эволюционное развитие МПРА.

Для построения модели РОС был выбран метод имитационного моделирования, позволяющий охватить все интересующие разработчиков аспекты функционирования РОС

как системы в целом, а также функционирование ПО в его среде.”

Кроме того, в работе [8] введены две различных версии модели – «Черный ящик» и «Имитатор РОС», а также определены функциональные возможности средств моделирования. Расширенная версия разрабатываемой модели предоставляет следующие возможности:

- 1) мультипроектность – возможность работы сразу с несколькими проектами отлаживаемых программных систем (например, с несколькими различными проектами распознавателя слов);
- 2) создание, редактирование и исполнение программ (капсул) на языке капсульного программирования;
- 3) подключение и использование специализированного компилятора для языка капсульного программирования (в настоящее время находится в разработке);
- 4) автоматическое и пошаговое моделирование процесса исполнения капсулы или последовательности капсул; эта функция позволит также осуществлять полную трассировку вычислительного процесса, а при необходимости и корректировать его с сохранением всех изменений в лог;
- 5) использование модели «Черный ящик» для автоматизированного самотестирования и контроля результатов вычисления капсул.”

На рис.1 представлена введенная в работе [8] архитектура средств имитационного моделирования.

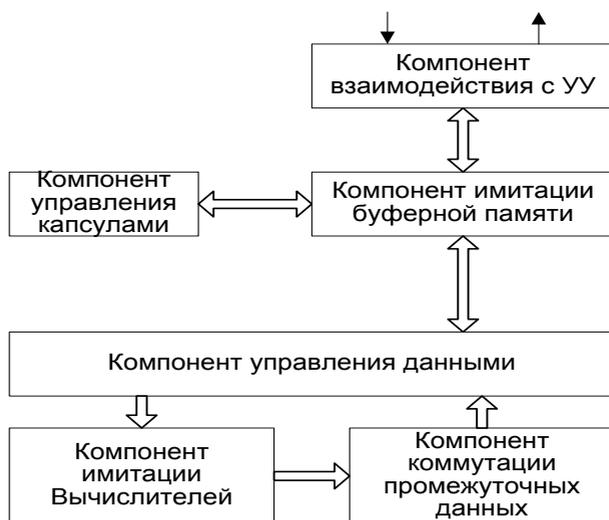


Рис. 1. Структура модели «Имитатор РОС» (Рис. 3 из [8])

Разработчиками был пройден долгий путь по развитию и усовершенствованию средств имитационного моделирования. Результатом работ по данному направлению стало появление программного средства «Средства имитационного моделирования потоковой рекуррентной архитектуры. Версия 2» (СИМПРА2) [10] и «Программа обработки результатов моделирования потоковой рекуррентной архитектуры» (ПРАПОР) [11] (реализует версию «Черный ящик»).

Программа СИМПРА2 реализует имитационную модель многоядерной потоковой рекуррентной архитектуры. Она максимально приближена к спецификации архитектуры. На рисунке 2 приведена архитектура имитационной модели. В качестве основных составных блоков модели можно выделить следующие:

- 1) Имитатор управляющего уровня (УУ) – в настоящей версии управляющая программа распознавателя изолированных слов, предназначенная для имитации запросов на вычисление капсул;
- 2) Библиотека интерфейса взаимодействия УУ↔ Рекуррентный операционный уровень (РОУ) – представлена виде нескольких основных функций;
- 3) Буферная память (БП) – компонент, логически разделенный на два блока (физически – единое целое); адресуется двумя индексными регистрами IR0 и IR1;
- 4) Интерфейсные регистры: IR0, IR1, F0, F1, D0, D1 предназначены для моделирования взаимодействия между УУ, БП и РОУ, а также для поддержки библиотеки интерфейса;
- 5) Вспомогательное устройство управления организует многократное исполнение капсулы и ее фрагментов;
- 6) Распределитель – основной компонент, отвечающий за обработку потока операндов и их рассылки по секциям назначения;
- 7) Импликатор – компонент обработки выходных результатов, отвечает за своевременный отбор выходных данных потока промежуточных операндов и запись их в БП;
- 8) Память констант (секционная и секционная-регистровая) – компонент, предназначенный для хранения постоянных данных, таких как параметры моделей распознаваемых слов, поворотные коэффициенты БПФ и др.;
- 9) Память совпадений – упрощенный аналог ассоциативной памяти по версии МПРА;
- 10) Память переходов – хранит условия переходов и функциональные поля операнда-результата перехода, структурно аналогична памяти совпадений;
- 11) Жонглер – предназначен для анализа пар операндов и

- принятия решения о характере протекания вычислений в вычислителе;
- 12) Вычислитель (4 шт.) – совокупность вычислительных блоков (умножитель, АЛУ16 и АУ40), поддерживает разные режимы суперскалярной работы;
 - 13) Шины E- и Em- - магистрали пересылки промежуточных данных;
 - 14) Конструктор капсул (используется ВКК программы СКАТ2 [12]).

Приложение СИМПРА

В настоящее время в ходе работ над МПРА существует острая необходимость в программных средствах автоматизации разработки специализированного ПО. В работе [5] авторы приводят архитектуру среды разработки ПО для новой архитектуры. В которой СИМПРА играет одну из ключевых ролей, как основной инструмент отладки разрабатываемого программного обеспечения, а также как существующих, так и разрабатываемых/модифицируемых компонент МПРА. Программа СИМПРА помимо указанных функциональных возможностей предоставляет ограниченный инструментарий для разработки ПО, в частности подсистему графowego программирования, функциональность которой будет перенесена в средства разработки ПО. Данное расширение функциональных возможностей было необходимым в силу разработанной авторами рекуррентно-поточковой методологии программирования, подробное описание которой может быть найдено в работе [4].

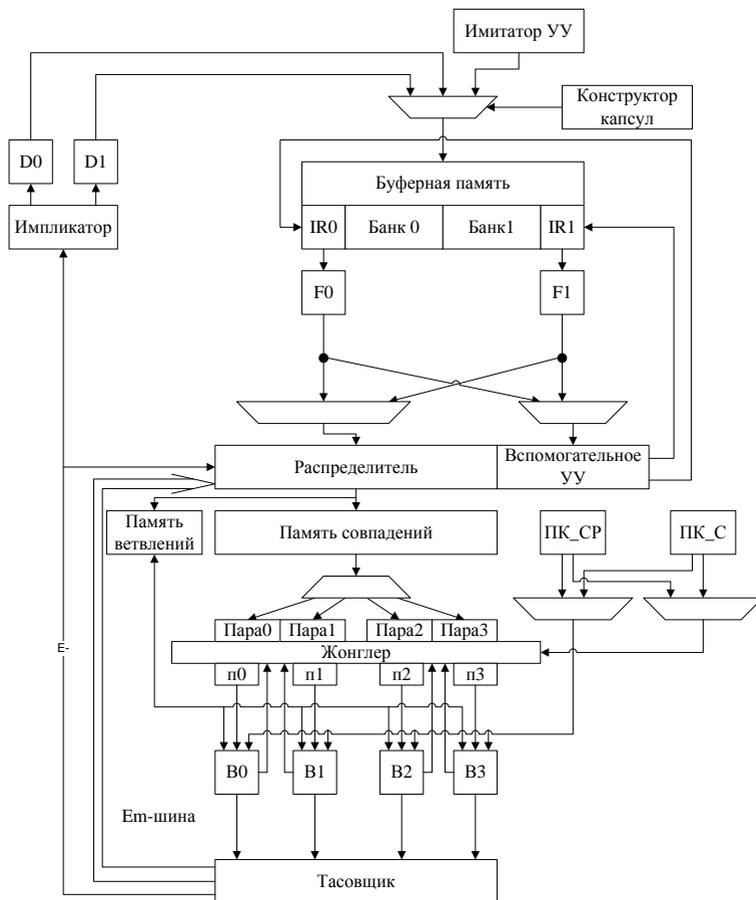


Рис. 2. Архитектура имитационной модели

Заключение

Средства имитационного моделирования МПРА преодолели серьезный путь в своем развитии, в результате которого была создана программа СИМПРА2. Данная программа предоставляет обширный арсенал функциональных возможностей как для отладки самой архитектуры, так и ее

специализированного ПО. Кроме того, СИМПРА уже интегрирована в прототип интегрированной среды разработки ПО для МПРА.

Следующим шагом развития СИМПРА является ее интеграция с системой капсульного программирования и отладки (СКАТ2) в качестве дополнительной опции моделирования (VHDL-модель или имитационная модель). Полученное программное средство в дальнейшем будет включено в разрабатываемую интегрированную среду проектирования ПО для МПРА.

Литература

1. M. Fernandez. Models of computation. An introduction to Computability theory – London: Springer, 2009 – PP. 29-30, PP. 49-50, PP. 55-66, PP. 76-85.

2. Arvind and R.A. Iannucci. A critique of multiprocessing von Neumann style / Proc. 10th ISCA, June 1983: PP. 426-436.

3. T. Agerwala and Arvind. Data flow systems. IEEEComputer, 15 (Feb. 1982): PP. 10-13.

4. Хилько Д.В., Степченков Ю. А. Теоретические аспекты разработки методологии программирования рекуррентной архитектуры / *Системы и средства информатики* – М.: ТОРУС ПРЕСС, Т. 23, № 2, 2013 – С. 136-156.

5. Хилько Д.В., Шикунов Ю.И. Разработка инструментальной среды проектирования программного обеспечения для рекуррентно-поточковой модели вычислений *Четвертая школа молодых ученых ИПИ РАН. Сборник докладов.* – М.: ИПИ РАН, 2013. – С. 65-78.

6. Палагин А.В., Яковлев Ю.С., Махиборода А.В., Карпович В.А., Макаров Г.П. и Сергеев В.К. Система потоковой

обработки информации с интерпретацией функциональных языков // Патент SU 1697084 . 1991. Бюл. №45.

7. Степченков Ю.А., Петрухин В.С. Перспективы развития цифровых, сигнальных процессоров и возможная реализация рекуррентного обработчика сигналов / Специальный выпуск «Методы и средства разработки информационно-вычислительных систем и сетей». – М.: ИПИ РАН, 2004. – С. 92-140.

8. Хилько Д.В., Степченков Ю.А. Модель потоковой архитектуры на примере распознавателя слов / *Системы и средства информатики* – М.: ТОРУС ПРЕСС, Т.22, №2, 2012. – С. 48-57.

9. Степченков Ю.А., Петрухин В.С., Филин А.В. Рекуррентное операционное устройство для процессора обработки сигналов / Системы и средства информатики: Вып. 11 / Под ред. И.А. Соколова. – М.: Наука, 2001. – С. 283-315.

10. Д. В. Хилько, Ю. А. Степченков, Ю.И. Шикун, Ю.Г. Дьяченко. Средства имитационного моделирования потоковой рекуррентной архитектуры (СИМПРА). Версия 2. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610123 от .09.01.2014.*

11. Д. В. Хилько, Ю. А. Степченков, А. Ю. Шнейдер. Программа обработки результатов моделирования потоковой рекуррентной архитектуры (ПРАПОР). *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610199 от 09.01.2013.*

12. Зеленев Р.А., Степченков Ю.А., Волчек В.Н., Хилько Д.В., Шнейдер Ю.А., Прокофьев А.А. Система капсульного программирования и отладки / *Системы и средства информатики* 20, №1, 2010. – С. 24-30.