

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ: ПРОБЛЕМЫ, ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Е.Н. Бендерская, О.Н. Граничин, В.И. Княев

Введение

Быстродействие современных вычислительных средств уже довольно близко подошло к теоретическому пределу. Этого быстродействия, однако, оказывается недостаточно для того, чтобы практически решать новые сложные задачи управления неоднородными нелинейными системами, осуществлять непрерывный анализ огромных потоков информации, реализовывать основные функции «искусственного интеллекта».

Поэтому все более становится актуальным, так называемый «новый» взгляд на информационные процессы. Этот взгляд, основывается на идее, что всё лучшее уже существует – и существует в природе! Выявление принципов работы существующих в природе механизмов обработки информации и внедрение этих результатов в технические системы является одним из приоритетных путей развития техники.

В природе есть сверхпроизводительный биологический параллельный компьютер с миллиардами нейронов-процессоров, глобально связанных друг с другом (до десятка тысяч связей у каждого) – головной мозг. И это несмотря на то, что «тактовая» частота работы отдельного элемента-процессора достаточно низкая. В связи с этим интересно проследить эволюцию идей реализации параллельных вычислений.

Эволюция вычислений и вычислительных устройств

Анализ развития вычислительной техники показывает, что, несмотря на проявление спиральной тенденции, присутствует еще и параллельная эволюция идей о мультипроцессорности или о многоэлементности при реализации вычислений.

Так можно отметить, что одновременно с развитием различных параллельных архитектур на базе «простых» процессорных элементов (от матричных, систолических и транспьютерных к кластерным архитектурам) успешно реализована идея многоядерных процессоров и усложнения отдельного вычислительного элемента – процессора. В последнее время эта тенденция продолжает развиваться.

В тоже время все большее распространение получают нейронные системы и нейрокомпьютеры, которые являются параллельными вычислительными устройствами по определению. В концепции облачных вычислений также присутствует идея распараллеливания вычислений. Таким образом, одновременно идет развитие структур, подразумевающих большое количество относительно сложных элементов и наращивание их числа, с другой стороны – усложнение отдельного элемента (многоядерные структуры), и развитие идей параллельных вычислений на множестве сложных автономных вычислителей, соединенных сетью по определенной структуре.

Сложность использования многоядерных, многопроцессорных и кластерных структур заключается в необходимости использования специальных средств программирования, так как изначально программы не являются параллельным представлением алгоритмов решения задач. Это приводит, например, к тому, что зачастую второе, третье (и так далее) ядро процессора у пользователя, не являющегося профессиональным программистом, не задействуется. Наличие множества специализированных языков параллельного программирования, выбор которых зависит от используемой платформы, также затрудняет эффективное использование многопроцессорных и многомашинных комплексов. Появление стандарта параллельного программирования несколько улучшило ситуацию, но не существенно.

В этой связи достаточно убедительными оказываются доводы о том, что архитектура нейросетевых систем изначально адекватна параллельному представлению решаемой задаче и более естественна для высокопроизводительных вычислений. Можно это охарактеризовать как конвергенцию идей – движение навстречу друг другу разных подходов. С одной стороны - усложнения отдельного элемента системы (как в нейронных сетях) и с другой стороны – увеличение числа процессоров с одновременным изменением их структуры. Это говорит о том, что в дальнейшем для решения действительно сложных задач будет найдено компромиссное решение: «сложный элемент – простая структура» и/или «сложная структура – простой элемент». Видимо, эффективное решение лежит между этими двумя крайними проявлениями и может быть охарактеризовано как «относительно сложный элемент и относительно сложная структура».

Нелинейная динамика и синергетика – возможности применения в параллельных вычислениях

Одно из наиболее перспективных направлений поиска высокопроизводительного интеллектуального вычислительного устройства лежит в области моделирования работы человеческого мозга. Из результатов исследования электрической активности мозга нейрофизиологами следует, что мозг является нелинейной динамической системой с хаотической природой электрохимических сигналов. Сложная структура коры головного мозга моделируется с помощью взаимосвязанных нейронных решеток. Глобальная связь между

нейронами порождает их коллективное поведение. Каждый нейрон представляет собой отдельное устройство, которое можно сопоставить процессору вычислителя. Именно поэтому структура нейронной сети наиболее подходит для выполнения параллельных вычислений, поскольку нет необходимости в предварительной подготовке исходных данных перед распараллеливанием.

Десятки сотен проектов, направленных на исследование принципов функционирования головного мозга человека, также способствовали становлению новой предметной области – нелинейной динамики. Нелинейная динамика – это часть синергетики, которая изучает коллективное поведение множества нелинейных объектов (квантов, атомов, молекул, клеток (в частности нейронов), подсистем. Одним из направлений в нелинейной динамике является изучение проявления самоорганизации в синхронизации хаотических систем. Изучение синхронизации – этого фундаментального явления природы – проводится в биохимии, биофизике, квантовой физике, нейропсихологии, нейрофизиологии, нейробиологии. Отметим, что исследования все более приобретают междисциплинарный характер. Поскольку всё связано со всем, то закономерности, которые выявляются в поведении и функционировании элементов одной природы, иногда могут быть использованы для управления элементами другой природы. Как показывают многочисленные исследования в области нелинейной динамики – чем сложнее задача, тем сложнее динамика системы, и, следовательно, управление ею. Поэтому все больше работ посвящено объединению достижений в области нелинейной динамики, самоорганизации и теории нейронных сетей.

При разработке новых высокопроизводительных систем на основе принципов самоорганизации предполагается, что решение задачи и соответствующая структура для ее решения самоорганизуются за счет внутренних процессов в системе и за счет обратной связи с внешней средой – классических задач низкоуровневой функциональной декомпозиции в данном случае не возникает [3]. Более того, использование синергетического синтеза также предполагает отсутствие классического разделения в вычислениях на аппаратную и программную части.

Такое вычислительное устройство может представлять собой набор асинхронных моделей динамических систем, взаимодействующих между собой и сочетающих такие свойства, как гибридность, асинхронность, кластерность, стохастичность [1,4,6].

Модель вычислений для такого устройства можно свести к совокупности следующих базовых параметров:

- набор вычислительных примитивов (динамические модели N_i с параметрами Q);
- память X – общее пространство состояний всех моделей;
- лента S – динамический граф с конечной битовой строкой s “включения” моделей в узлах;
- программа G – заданные на графе S правила (или цели) переключения “ленты” и параметров моделей при попадании пары (x, q) на одном из “включенных” узлов в множество переключения J ;
- такт – промежуток времени между соседними моментами переключений;
- множество останова T .

В этом случае уместно говорить об обобщенной машине Тьюринга, которую можно представить в виде кортежа взаимосвязанных компонентов $\langle A, N, Q, q, q_0, X, x, x_0, S, s, s_0, J, G, T \rangle$, где A – множество моделей (вычислительных примитивов), N – оператор эволюции, Q – множество состояний (значений параметров), X – память, S – обобщенная лента (граф), J – множество переключений, G – программа (цели), T – множество останова.

Здесь можно также отметить взаимное сближение технологий разработки программного и аппаратного обеспечения. Это связано с широким распространением программируемых архитектур, в которых, тоже используется большое число относительно простых ячеек, которые программируются под определенные функции путем определенного связывания друг с другом. В связи с этим получили развитие языки аппаратного программирования, процедуры отладки и среды разработки как в программном обеспечении. Программирование, отладка тестирование при разработке аппаратуры оказываются очень схожими с разработкой программных комплексов.

Еще одно из активно развиваемых и используемых решений для высокопроизводительных вычислений – платы компьютерной графики, содержащие огромное число не слишком сложных графических процессоров-вычислителей. Первоначально предназначены для ускорения работы приложений компьютерной графики, у которой задачи принципиально параллельны и требуют одновременной обработки всех компонент графической картинки. Однако, эти структуры оказались очень эффективным средством для решения задач вычислительной физики и параллельного проведения экспериментов и для нейровычислений. Правда надо отметить, что для использования возможностей графических ускорителей также необходимо знание и использование специального языка обращений к матрице графических процессоров. Но так как логический базис операций этих процессоров естественным образом оказался совместим с требуемыми операциями при проведении нейровычислений и других параллельно представленных задач, то этот подход использования графических ускорителей, при условии дальнейшего совершенствования средств их программирования, будет получать все большее и большее распространение.

Кроме того, существует такая тенденция, как придание аппаратной реализации большей гибкости – разработка процессоров и многопроцессорных архитектур с переменной структурой. И здесь также есть

решения на уровне переменной организации отдельного элемента, так и для всей структуры из большого числа элементов. Это согласуется с теми тенденциями, которые можно наблюдать в развитии идей нейровычислений. В нейронных сетях структура нейронной сети адаптируется под решаемую задачу как в малом – на уровне отдельных весовых коэффициентов в пределах заданной структуры, так и в большом – при отсутствии ограничений на композицию нейронных ансамблей.

Вместо привычного представления исходной задачи, подлежащей решению в виде совокупности функций, для последующей реализации, или разделении системы на отдельные части, при синергетическом походе проводится синтез и исследование системы как единого целого. Изменение состояния отдельного элемента системы может никак не повлиять на состояние системы в целом, однако, совместная динамика всех элементов определяет макроскопическое уникальное состояние системы. И это состояние системы и будет являться решением поставленной задачи [8].

Именно возникновение синхронизации, коллективного поведения позволяет живым системам адаптироваться, обучаться, извлекать информацию и в реальном времени решать вычислительно сложные задачи за счет распределенной обработки информации. Много элементов со сложной динамикой порождают эффективные вычисления.

Практические задачи и устройства для их решения: «новый-старый» подход

Потребности решения все более сложных задач и в то же время широкие возможности, которые предоставляются в случае применения синергетических принципов анализа и синтеза, приводят к тому, что для комплексных сложных задач, в которых должны проявляться эмерджентные системные свойства, все более эффективным становится подход целостного анализа в едином комплексе без деления на части. Это не отход от функциональной декомпозиции, а существенное его дополнение, так как при разделении системы или задачи на части мы, зачастую, теряем уникальность, связанную с системными закономерностями.

С другой стороны, при использовании единого подхода появляется возможность естественного совмещения операций. Например, для информационных систем – это и восприятие, и хранение, и собственно обработка информации. От ассоциаций к хранению и последующему распознаванию, что согласуется с текущими представлениями о том, как решаются задачи живыми системами.

Таким образом, предлагается общий подход к решению разных задач, (почти как в нейроинформатике – «разнотипные к однотипному представлению»), сведение всего или к задаче управления или задаче оптимизации или задаче распознавания образов. Этот подход схож с нейросетевым в той части, что касается ведения разнотипных задач к однотипным и решаемым однородными сетевыми структурами. При таком подходе сложность метода (устройства) будет адекватна решаемой задаче также, как в формальной теории синтеза структуры нейронной сети через функционалы первичной и вторичной оптимизации [5].

Формальная постановка задачи синтеза параллельного вычислителя

В данной работе основное внимание уделяется развитию методов обработки информации и раскрытию их связи с законами функционирования объектов различной природы (физической, химической и др.), в которых также проявляется существование общего механизма упорядочивания, несмотря на присутствие хаоса в функционировании отдельных элементов системы. При этом за основу принимаются модели и результаты, полученные в физике кластеров и при исследовании осцилляторных и рекуррентных нейронных сетей, представляющих собой дискретные хаотические системы большой размерности.

Предлагается на основе анализа взаимного соответствия между объектами различной природы, в которых существуют механизмы самоорганизации, и синтезируемой физико-технической системой вычислительного устройства, разработать как математическое обеспечение нового адаптивного высокопроизводительного вычислителя, позволяющее определять состав и структуру вычислителя в зависимости от предъявляемых требований по составу решаемых задач и качества их решения, так и инструментально-методического обеспечения для проведения модельных экспериментов и проверки принимаемых структурных и функциональных решений.

Управление хаосом часто ассоциируется с задачей подавления хаотических колебаний, то есть перевода системы либо к устойчивым периодическим движениям, либо в состояние равновесия. В широком смысле, под управлением хаоса понимают преобразование хаотического поведения системы в регулярное или хаотическое, но с другими свойствами.

Возникающие при управлении хаосом задачи значительно отличаются от традиционных задач автоматического управления [2]. Вместо классических целей управления – приведение траектории системы в заданную точку и приближение траектории к заданному движению, при управлении хаосом ставятся ослабленные цели: создание режимов с частично заданными свойствами, качественное изменение фазовых портретов систем, синхронизация хаотических колебаний и другие.

В отличие от традиционных «управленческих» работ в физических применениях теории хаоса упор делается не на поиск наиболее эффективного способа достижения цели, а на исследование принципиальной возможности ее достижения, на определение класса возможных движений управляемой физической системой.

Исследование динамики ансамблей, состоящих из большого числа нелинейных элементов, представляет собой одно из основных направлений развития нелинейных колебаний и волн. Главным фактором в динамике ансамблей автоколебательных систем, который приводит к упорядоченному пространственно – временному поведению, служит синхронизация элементов ансамбля. Многочисленные работы показывают что, пространственно-распределенные хаотические колебательные системы обладают богатыми свойствами. В некоторых из них наблюдается самосинхронизация при определенных параметрах системы. Под самосинхронизацией понимается, процесс, при котором идентичные элементы системы, каждый из которых характеризуется хаотической динамикой, будучи инициализированы различным образом, с течением времени начинают колебаться синхронно без какого-либо внешнего воздействия.

При наличии внешнего воздействия на нелинейную динамическую систему мы получаем реакцию, которая отражает как внешние условия решения задачи, так и входные сигналы, которые характеризуют решаемую задачу. При таком подходе вместо создания модели для решения задачи, задается целевая установка – требуемый итог решения задачи и считается, что решение не единственное, во всяком случае, по форме представления образует многообразие, которое может быть интерпретировано и как единственное решение, и как некоторый набор базисных решений.

Укрупненные этапы использования сложных режимов функционирования хаотических систем для решения практических задач можно представить в виде следующей последовательности: задается начальное состояние системы и задается цель - достичь определенного состояния, затем запускается система и на нее подаются входные сигналы, соответствующие задаче. После прохождения некоторого переходного процесса система перейдет в некоторый аттрактор. Далее, используя малые возмущения системы, она переводится на траекторию, которая максимально близко пройдет рядом с требуемой точкой или последовательностью точек, соответствующих требуемому состоянию системы. Если такой аттрактор не находится, то подается случайный вход, чтобы перескочить на другой аттрактор, и так до достижения цели.

Формальное описание новой парадигмы в виде новой абстракции вычислительного устройства, обобщающего схему классической машины Тьюринга, показывает как строго математически могут быть представлены предлагаемые концепции [4,6,7].

Возможные проблемы

Основной проблемой при реализации нового подхода является подбор или создание адекватной аппаратной базы. Для решения задач моделирования нового высокопроизводительного вычислителя на нелинейных элементах можно использовать высокопроизводительные программируемые логические схемы. Однако, для получения системы, в которой смогут быть реализованы все свойства коллективного поведения элементов и решены задачи самосборки на кластеры, т.е. выполнена реконфигурация для адаптации под изменения в окружающей среде, необходимо искать адекватную аппаратную базу. В качестве одного из возможных вариантов реализации могут быть предложены реакционно-диффузионные среды, и тогда можно будет говорить о создании «жидкого» или химического высокопроизводительного вычислителя.

Заключение

Как показывают многочисленные исследования в области нелинейной динамики, чем труднее задача, тем сложнее динамика системы. Новейшие исследования ведутся на молекулярном уровне с разными целями: создание новых материалов, новых лекарств, систем распознавания образов, новых устройств обработки информации и т.д. Такие исследования носят междисциплинарный характер и выполняются на стыке таких наук как молекулярная физика, биология, химия, математика, синергетика. В результате применения предлагаемого подхода открываются новые возможности, снимающие прежние ограничения и позволяющие перейти к созданию новых универсальных вычислительных устройств, обладающих не только высокой производительностью, но и способностями подстраиваться под решаемую задачу.

ЛИТЕРАТУРА:

1. К.С. Амелин, О.Н. Граничин О.Н., В.И. Кияев. Мобильность или супервычисления: кто кого? // Суперкомпьютеры, № 4 (4). 2010. С. 30-33
2. Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков. Управление хаосом: методы и приложения. // Автоматика и телемеханика, 2004, № 4, 3–34
3. Е.Н Бендерская, С.В. Жукова. Использование фрагментарной хаотической синхронизации для моделирования межмолекулярных взаимодействий и процессов образования наноструктур // Спб.: Издательство Политехнического университета. - Научно-технические ведомости СПбГТУ, 2008.- № 3 (59).- с. 126-130
4. А.Г. Владимирович, О.Н. Граничин, А.А. Макаров. Нестандартная машина Тьюринга // Стохастическая оптимизация в информатике. 2005. 1. С. 29-47
5. А.И. Галушкин. Нейронные сети. Основы теории.- М: Горячая Линия – Телеком, 2011
6. О.Н. Граничин. Характеристики перспективных принципиально новых компьютерных устройств и систем // Механика, управление и информатика. 2011. № 5. С. 147-161

7. О.Н. Граничин, В.И. Васильев. Гибридная модель процесса вычислений: обобщение концепции машины Тьюринга // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2010, № 6. С. 51-58
8. E.N. Benderskaya. Nonlinear Trends in Modern Artificial Intelligence: A New Perspective // Beyond AI: Interdisciplinary Aspects of Artificial Intelligence, Proceedings of Extended Abstracts Presented at The International Conference Beyond AI 2011, Pilsen, December 8-9, 2011, pp.71-76