

*Д.В. Пиманов, И.А. Морозов, К.Л. Шитьков, Ф.В. Демин*

# АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОПРОЦЕССОРНОГО МНОГОПОТОЧНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ СЕЙСМОГРАММ

## Введение

Среди уравнений математической физики широко используются уравнения гиперболического типа, описывающие, в частности, распространение сейсмических волн в упругих средах.

Решение этих уравнений в приложении к моделированию сейсмических данных связано с выполнением огромного объема вычислений, который связан как с большим объемом расчетной области пространства, так и с детальностью (шагом) расчетной сети. Объем обрабатываемых данных настолько велик, что сложность задачи выходит за рамки возможностей современной вычислительной техники при использовании обычных алгоритмов решения полной системы уравнений теории упругости и стандартной организации вычислительной системы.

В настоящее время разработано довольно много методов вычисления теоретических сейсмограмм [1, 4, 5, 6 и др.]. Многие из них направлены на представление расчетов в виде набора независимых параллельных вычислений. В частности, для сейсмического моделирования предложено использование локально-рекурсивных нелокально-асинхронных алгоритмов (LRnLA) [4, 5].

При расчете теоретической сейсмограммы с использованием LRnLA алгоритма параметры модели среды задаются исходя из глубины залегания целевых объектов, характерных частот приемников и источников сигналов и их расположения, то есть для одного расчета может использоваться куб с длиной стороны 10 км и дискретностью 10 м, что дает около одного миллиарда ячеек. При этом теоретические сейсмограммы сохраняются с интервалом порядка миллисекунды в течение десятков секунд (порядка 104 отсчетов по времени). При этом каждый расчет фактических записей полевых сейсмограмм в дальнейшем сопоставляется с теоретическими, что позволяет обнаружить отражения или горизонты, «перекрытые» на стандартных записях помехами, кратными волнами и т.д., но явно выделяющиеся на

теоретических сейсмограммах. Также теоретические сейсмограммы способствуют более точному вычислению скоростей по годографам отраженных волн, благодаря уточненному выделению отражений.

На практике подобные воздействия могут повторяться несколько тысяч раз для каждого объекта. И каждый раз должен применяться LRnLA алгоритм, то есть решаться задача Коши с собственными начальными и граничными условиями. Однако данный алгоритм предоставляет возможность параллельной и независимой обработки этих данных. Таким образом, ускорение вычислений можно организовать, путем построения многопроцессорного многопоточного комплекса (ММК), позволяющего параллельно обрабатывать большое количество данных с плавающей точкой.

## Многопроцессорный многопоточный комплекс

ММК строится на базе сопроцессоров, основная задача которых сводится к параллельной обработке больших объемов данных с помощью простых алгоритмов. Тогда процесс обработки одиночной порции данных можно разбить на три основных этапа:

- подготовка исходных данных для сопроцессора;
- вычисление на сопроцессоре;
- постобработка: фильтрация, обработка ошибок.

Для подготовки данных и постобработки обычно используются универсальные процессоры стандартных архитектур. Организация передачи данных между универсальным процессором и полем специализированных вычислителей реализуется с помощью коммуникационной среды. При этом, исходя из специфики задачи, в качестве сопроцессоров могут выступать следующие элементы:

- графические процессоры (GPU);
- универсальные сопроцессоры на платах расширения;

- специализированные модули на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) или заказных сверхбольших интегральных схемах (СБИС).

Рассмотрим подробнее данные виды сопроцессоров и варианты организации коммуникационной среды.

### ММК на графических процессорах

Графические процессоры изначально разрабатывались для быстрой обработки компьютерной графики, которую можно представить в виде набора большого количества параллельных вычислений. В связи с чем на кристалле графического процессора размещается большое количество аппаратных ядер, способных производить несложные математические вычисления на большой частоте. При этом поддерживаются вычисления с плавающей точкой одинарной и двойной точности.

Массовый выпуск графических процессоров привел к их относительно удешевлению и постоянному росту производительности кристаллов.

В качестве их недостатка можно выделить необходимость в переработке программного кода и использовании программных интерфейсов для неспециализированных вычислений.

Основные производители графических процессоров, такие, как компании NVIDIA и AMD, предоставляют свои реализации таких интерфейсов – CUDA и Firestream соответственно. Также существует ряд универсальных решений:

- DirectCompute – библиотека вычислений на графических процессорах (GPU) из состава DirectX от компании Microsoft;
- C++ AMP – библиотека из состава DirectX и открытая спецификация для реализации программ для гетерогенных систем;
- OpenCL – открытый стандарт для параллельных вычислений на графических процессорах, универсальных процессорах и ПЛИС;
- OpenACC – программный стандарт параллельного программирования, разрабатываемый компаниями Cray, CAPS, Nvidia и PGI.

Чаще всего модули с графическими процессорами реализуются в виде отдельных плат для установки в слот расширения. Однако существуют решения с GPU, распаянными на специализированных материнских платах. В обоих случаях в качестве коммуникационной среды, как правило, используется шина PCI-Express.

### ММК с универсальными сопроцессорами

Универсальные сопроцессоры обладают меньшим количеством аппаратных ядер по сравнению

с графическими процессорами. Таким образом, ускорение параллельных вычислений производится путем наращивания количества самих процессоров. При этом каждый процессор чаще всего имеет стандартные архитектуры и набор команд, что в значительной мере упрощает разработку программного кода для реализации вычислительных алгоритмов. Также присутствует поддержка целочисленных вычислений, с фиксированной точкой и плавающей точкой одинарной и двойной точности.

Недостатком является небольшой (относительно графических процессоров) тираж, что приводит к их меньшей доступности.

В качестве существующих решений можно привести вычислительную карту расширения PCI-Express на базе процессоров Xeon Phi, разработанных компанией Intel. На такой плате расположены несколько десятков универсальных процессоров с архитектурой Intel MIC, в основе которой лежит классическая архитектура x86.

Платы такого класса создавались для замены графических процессоров для использования в неспециализированных вычислениях. Такое решение дает возможность обойтись без существенной переработки исходного программного кода, рассчитанного для выполнения на универсальном процессоре. Недостатком таких вычислительных плат расширения является относительно небольшое количество выпускаемых изделий, что отражается на их стоимости и доступности.

### ММК на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) или заказных сверхбольших интегральных схемах (СБИС)

Современные ПЛИС содержат до нескольких миллионов эквивалентных ячеек и следующие компоненты:

- логические элементы на базе таблиц истинности;
- блоки быстрого умножения-суммирования;
- блоки двухпортовой памяти;
- блоки высокоскоростных передатчиков.

Такой подход позволяет охватить широкий спектр содержательных задач, так как для решения каждого конкретного алгоритма создается свой узкоспециализированный аппаратный вычислитель. При этом в любой момент возможна реконфигурация ПЛИС для смены реализации вычислителя, что позволяет быстрый переход к совершенно другой задаче. Таким образом, возможно решение как задач, требующих построения единого процессора со сложной обработкой, так и решение задач с необходимостью в множестве процессоров с массовой параллельностью обработки на одних и тех же сопроцессорах.

К преимуществам ПЛИС также можно отнести широкий выбор возможной коммуникационной среды. Возможно применение шины PCI-Express, сети Ethernet, кэш-когерентной шины процессора и других.

К минусам же относится сложность создания самих вычислителей.

Основными производителями ПЛИС являются компании Xilinx и Altera. У каждой компании представлены ряд семейств кристаллов, обладающих разным объемом эквивалентных ячеек, что позволяет использовать ПЛИС для ускорения вычислений разной сложности.

Вычисления с плавающей точкой используют больше ресурсов ПЛИС, чем обработка целочисленных данных. При их реализации существует два основных пути: использование блоков быстрого умножения-суммирования [7] и организация вычислений с помощью логических элементов на базе таблиц истинности. Во втором случае гибкость ПЛИС используется для реализации большей точности [2].

При необходимости создания большого количества узкоспециализированных многопроцессорных многопоточных комплексов (ММК) возможно создание заказных СБИС. При этом сохраняются все преимущества ПЛИС, кроме возможности перейти к решению другого класса задач.

### Коммуникационная среда

Для организации коммуникационной среды чаще всего используют один из следующих вариантов:

- шина PCI-Express;
- сеть Ethernet;
- кэш-когерентные шины.

PCI-Express – компьютерная шина, с пакетными передачами по соединениям типа «точка-точка», называемых линиями. Соединение между двумя устройствами может состоять из 1, 2, 4, 8, 16 или 32 линий. На данный момент существуют спецификации для 3 поколений PCI-Express, которые позволяют достичь скорости от 2 Гбит/с до 7,8 Гбит/с для каждой линии.

Ethernet – семейство сетей с пакетной передачей данных. Соединения могут производиться по различным топологиям, устройства взаимодействуют посредством многоуровневого стека протоколов. На физическом уровне линии могут быть организованы с помощью оптических кабелей, кабелей с витой парой, коаксиальных кабелей, радиоканалов и пр. Существующие на данный момент спецификации позволяют обмениваться данными со скоростями до 100 Гбит/с.

Для применения в задачах с высокой степенью связности гетерогенного алгоритма целесообразно применять кэш-когерентные шины, которые позволяют обрабатывать данные на множестве вычислителей с обеспечением непротиворечивости их реплик между собой. Основными современными реализациями являются Intel QuickPath Interconnect, пропускная способность которого составляет от 19,2 до 25,6 гигабайт полезной нагрузки в секунду в каждую сторону и HyperTransport для процессоров AMD, Transmeta, Broadcom, PMC-Sierra, Raza Microelectronics, а так же в множестве других кристаллов, пропускная способность составляет до 25,6 гигабайт в секунду в каждую сторону.

### Варианты построения многопроцессорных многопоточных комплексов для эффективного расчета теоретических сейсмограмм

Как говорилось ранее, применение LRnLA алгоритмов для вычисления теоретических сейсмограмм разбивает задачу на большое количество параллельных и независимых расчетов. Это предъявляет к многопроцессорным многопоточным комплексам следующие требования:

- большое количество вычислительных ядер;
- высокая скорость загрузки новых данных;
- обработка чисел с плавающей точкой одинарной точности.

При этом нет жестких требований к необходимой латентности, в связи с независимостью вычислений.

Частым решением построения ММК является выбор в качестве сопроцессора графического процессора. Этому способствует широкая распространенность и доступность последних, наличие множества вычислительных ядер на каждом кристалле, что дает возможность организации вычислений с высокой степенью параллелизации, поддержку обработки данных с плавающей точкой одинарной и двойной точности с высокой скоростью. При этом в большинстве современных плат в качестве коммуникационной среды используется шина PCI-Express третьего поколения с 16 линиями, что дает высокую скорость обмена данными. Собственная архитектура приводит к изменению исходного кода для расчетов на графических процессорах, однако широкая распространенность и активное развитие последних делает этот процесс проще, чем раньше.

Весьма перспективно выглядит использование ПЛИС в качестве сопроцессоров для расчета теоретических сейсмограмм. Возможность ускорения вычислений за счет прямой схемной реализации процедур вычислений позволяет максимально эффективно использовать доступные ресурсы

кристалла. Современные ПЛИС примерно равноценны современным графическим процессорам по достижимой производительности, однако являются значительно более «холодными» [3]. Применение ПЛИС для вычислений с плавающей точкой хоть и использует больше ресурсов, чем обработка целочисленных данных, зато позволяет добиться большей точности. В качестве коммуникационной среды возможно использование как PCI-Express (до 3-го поколения и 16 линий), так и сети Ethernet. Разработка исходного кода вычислителей требует высокой степени квалификации от разработчиков. Количество вычислительных ядер в случае с ПЛИС напрямую зависит от ресурсов выбранного кристалла.

Использование универсального сопроцессора не дает такого существенного прироста производительности по сравнению с графическим процессором, зато стандартная архитектура позволяет ускорять вычисления без существенных изменений в исходном коде. Использование кэш-когерентных шин, характерной коммуникационной среды для универсальных сопроцессоров в случае с расчетом теоретических сейсмограмм не является необходимым в связи с независимостью параллельных вычислений.

Использование специализированных сверхбольших интегральных схем в качестве сопроцессора обладает всеми плюсами ПЛИС, кроме возможности реконфигурации. Реализуя высокую производительность и энергоэффективность, они являются достаточно сложными в разработке и производстве.

### Заключение

Расчет теоретических сейсмограмм был и остается важной, но содержащей долгие и ресурсоемкие вычисления задачей. Применение для сейсмического моделирования алгоритма типа LRnLA позволяет ускорить вычисления, используя для них современные многопроцессорные многопоточные комплексы. Анализ существующих решений их построения показал, что для расчета теоретических сейсмограмм подходят все виды сопроцессоров, используемых в многопроцессорных многопоточных комплексах. При этом каждый из них имеет свои

преимущества перед остальными. Однако наиболее перспективными для проведения моделирования является использование либо графических процессоров с коммуникационной средой на базе PCI-Express, либо ПЛИС с коммуникационной средой на основе шины PCI-Express или сети Ethernet.

**Ключевые слова:** теоретическая сейсмограмма, LRnLA алгоритм, многопроцессорный многопоточный комплекс, графический процессор, ПЛИС, СБИС, универсальный процессор.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.С., Михайлеко Б.Г. Метод расчета теоретических сейсмограмм для сложнопостроенных моделей сред // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 240. – № 5. – С. 1062-1065.
2. Андреев С.С., Дбар С.А., Лацис А.О., Плоткина Е.А. Макет гибридной реконфигурируемой вычислительной системы и реализация на нем вычислений с повышенной точностью // Тезисы докладов 2 национального суперкомпьютерного форума НСКФ-2013. – Переславль-Залесский, 2013.
3. Андреев С.С., Дбар С.А., Давыдов А.А., Лацис А.О., Савельев Г.П., Орлов В.Л., Плоткина Е.А., Простов И.В. Гибридный суперкомпьютер К-100: что дальше? // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2012. – № 2. – С. 29-35.
4. Иванов А.В., Каплан С.А., Каракин А.В., Левченко В.Д., Левченко Т.В., Рок В.Е. Вычисление полного сейсмического волнового поля в геосреде на основе нового метода решения прямых задач сейсмоакустики // Геоинформатика. – 2006. – № 3. – С. 59-61.
5. Левченко Т.В., Левченко В.Д. Локально-рекурсивные нелокально-асинхронные алгоритмы // Физические и математические модели плазмы и плазмоподобных сред : сб. науч. трудов / под ред. Дж. Майно, Г.И. Змиевская. – М. : ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2012. – С. 83-91.
6. Павлов В.М. Алгоритм расчета синтетических сейсмограмм в слоистом полупространстве с применением матричного импеданса // Физика Земли. – 2013. – № 1. – С. 26-35.
7. Паркер М. Как достичь скорости 1 триллион операций в секунду с плавающей запятой на FPGA? // Электронные компоненты. – 2010. – № 11. – С. 64-68.