

УДК 621.391:534.23

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ СОГЛАСОВАННОГО ПРЕСЛЕДОВАНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Марапулец Ю.В., к.т.н., заместитель директора по научной работе Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, e-mail: marpl@ikir.ru;

Ким А.А., аспирантка Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН; ассистент, Камчатского государственного университета имени Витуса Беринга, e-mail: a.a.afanaseva@yandex.ru

Ключевые слова: акустическая эмиссия, частотно-временной анализ, разреженная аппроксимация, параллельный алгоритм согласованного преследования.

Введение

В последние годы для частотно-временного анализа сигналов начали активно использоваться методы разреженной аппроксимации. Они находят широкое применение в исследовании сложных процессов различной природы, в частности при анализе сейсмических сигналов [1], в гидроакустике [2], задачах неразрушающего контроля [3, 4]. Получены результаты, показывающие эффективность использования разреженной аппроксимации при анализе сигналов акустической эмиссии (АЭ) в звуковом диапазоне частот [5, 6]. Исследования эмиссии в этом диапазоне актуальны для оценки устойчивости ландшафтов, горных склонов, ледников, снежных покровов и крупных технических сооружений. Важную роль они играют для изучения физики предвестников землетрясений [7]. Сигнал акустической эмиссии состоит из серии релаксационных колебаний (геоакустических импульсов) с ударным возбуждением, амплитудой 0.1 – 1 Па, длительностью, не превышающей 200 мс, частотным заполнением в единицы и первые десятки килогерц [7]. Частота следования импульсов определяется деформациями пород и может меняться в широких пределах – от одиночных сигналов на временном интервале несколько секунд в спокойный период до десятков и даже сотен в секунду в моменты аномалий перед землетрясениями [7]. Одной из основных задач обработки сигналов АЭ является автоматическое выделение и частотно-временной анализ геоакустических импульсов, частоты заполнения которых содержат информацию о размерах и динамике их источников. Для этих целей использованы методы разреженной аппроксимации с базисными словарями, построенными на функциях Габора [5] и Берлаге [6, 8]. Для реализации разреженной аппроксимации применен метод согласованного преследования, предложенный Mallat S. и Zhang Z. [9, 10], подробно рассмотренный нами в [5, 6].

Параллельный алгоритм согласованного преследования

Существенным недостатком метода согласованного преследования является его вычислительная затратность: время анализа сигналов в десятки раз превышает

Предлагается параллельный алгоритм метода согласованного преследования. Рассматривается его реализация на программно-аппаратной платформе CUDA. Показано, что использование параллельного алгоритма дает выигрыш во времени вычислений более чем в 10 раз по сравнению со стандартным методом. Это подтверждает целесообразность его применения при частотно-временном анализе сигналов импульсной природы, в том числе сигналов акустической эмиссии.

ет их длительность. Определить самые затратные по времени процедуры метода можно при анализе его схемы (рис. 1).

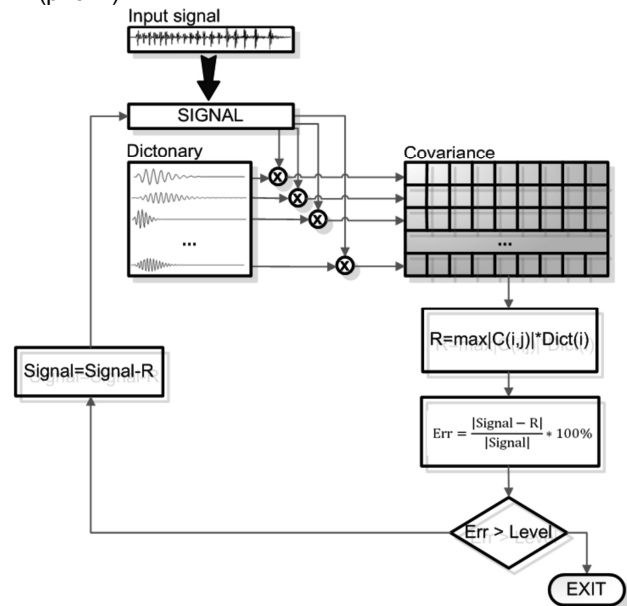


Рис. 1. Схема вычисления метода согласованного преследования

На вход подается исходный сигнал $SIGNAL$ ($Signal$) длиной L отсчетов и базисный словарь $DICTONARY$ ($Dict$), состоящий из N атомов длиной M отсчетов. Между вектором $Signal$ и каждой строкой $Dict$ вычисляется ковариация по формуле:

$$C_{i,j} = \sum_{k=\max(1, j+1-m)}^{\min(j, 1)} Dict_{i,k} \cdot Signal_{m-j+k}, \quad (1)$$

и записывается в матрицу C размерности $N \times (L + M - 1)$. Произведение максимального по модулю элемента матрицы ковариаций на соответствующий ему атом словаря определяет наилучшую из возможных аппроксимаций R рассматриваемого сигнала на текущем шаге алгоритма. Если ошибка аппроксимации Err не

достигла заданного уровня *Level*, то из исследуемого сигнала вычитается полученное приближение *R* и алгоритм повторяется.

Самой затратной процедурой метода является нахождение ковариации сигнала с атомами словаря: время вычисления матрицы *C* составляет более 90% от общего времени выполнения 1 итерации (табл. 1).

Таблица 1. Время вычисления 1 итерации в целом и расчета матрицы ковариаций

Длина сигнала <i>L</i> , отсч.	Время выполнения 1 итерации, мс	Время вычисления матрицы ковариаций, мс
1000	291	274
2500	717	695
5000	1434	1396
10000	2859	2796

Для увеличения скорости расчета целесообразно использовать методы параллельных вычислений. В данном случае, под параллельными вычислениями понимается разработка алгоритма как набора взаимодействующих вычислительных процессов, работающих асинхронно и при этом одновременно. Построение параллельного алгоритма подразумевает выполнение нескольких этапов [11]:

- декомпозиция;
- выделение информационных зависимостей;
- масштабирование и распределение подзадач между процессорами.

Декомпозиция предполагает разбиение алгоритма или его части на совокупность независимых подзадач. Как уже говорилось выше, наиболее затратной операцией на каждой итерации метода является нахождение матрицы ковариаций сигнала (остатка сигнала) с атомами словаря. Каждый элемент матрицы ковариаций вычисляется независимо от остальных по одной и той же формуле (1). Выполнение однотипной обработки большого объема информации позволяет применить к данной процедуре параллелизм по данным, что сводит декомпозицию к простому разделению данных. Каждая подзадача вычисляет один элемент матрицы ковариаций в зависимости от входных параметров *i* и *j*. Следовательно, количество подзадач *k* равно количеству элементов в матрице *C*: $k = N \times (L + M - 1)$. Все выделенные подзадачи зависят только от начальных данных и не зависят друг от друга, что свидетельствует о наличии внутреннего параллелизма в рассматриваемой процедуре и о полной информационной независимости подзадач.

Предложенная декомпозиция алгоритма подходит для эффективного исполнения в формате архитектуры SIMD (Single Instruction stream/Multiple Data stream), позволяющей выполнять одну арифметическую операцию сразу над многими данными [11]. Одной из наиболее популярных технологий, основанной на концепции SIMD, является программно-аппаратная платформа CUDA, используемая для организации параллельных вычислений на графических процессорах (GPU) [12]. Базовым понятием программной модели CUDA является нить (Thread). Нити объединяются в блоки, а блоки в свою очередь – в сеть. Сеть и блоки могут быть одно-

двух- и трехмерными. Количество и размерность компонентов сети определяется семейством и версией видеокарты. Использование подобной группировки позволяет запускать миллионы нитей, а также избавляет программиста от необходимости масштабирования вычислительных блоков. Если у GPU недостаточно ресурсов, то блоки будут выполняться последовательно. Необходимо лишь определиться с размером запускаемой сети. Пусть количество нитей n_i , запускаемых в каждом блоке, будет равно 256. Это число обеспечивает оптимальное соотношение используемой памяти и задержек [13]. Следовательно, количество блоков n_b , необходимое для вычисления матрицы ковариаций, будет определяться как: $n_b = k / 256$.

Для реализации параллельного алгоритма метода согласованного преследования использовалась среда программирования MS Visual Studio 2010 и пакет CUDA 5.0. Следует отметить, что основная часть метода выполняется на центральном процессоре (CPU), но при этом самый затратный процесс вычисления матрицы ковариаций отправляется на видеокарту (GPU) (рис. 2). Исследуемый сигнал и словарь атомов копируются в глобальную память GPU (Global Memory). Далее на исполнение запускается сеть, состоящая из n_b блоков (Blocks) по n_i нитей (Thread) каждый. Одна нить вычисляет один элемент матрицы ковариаций и помещает его в разделяемую память блока (Shared Memory). После выполнения всех нитей блока разделяемая память содержит массив значений, который копируется в результирующую матрицу *C*, находящуюся в глобальной памяти. Таким образом, каждый блок заполняет матрицу *C* n_i элементами. По завершении работы всех блоков полученная матрица ковариаций выгружается в память CPU, и исполнение алгоритма снова переходит на центральный процессор.

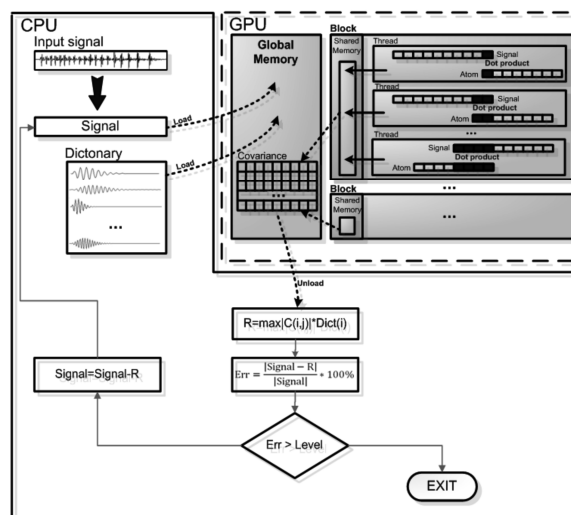


Рис. 2. Параллельный алгоритм метода согласованного преследования

Параллельный алгоритм при анализе геоакустических импульсов

Проверка работоспособности разработанного параллельного алгоритма проводилась на реальном геоаку-

стическом сигнале. Фрагмент записи длительностью 400 отсчетов подавался на вход стандартного метода согласованного преследования (последовательный алгоритм, рис. 1) и разработанного параллельного алгоритма (рис. 2). Схема тестирования представлена на рис. 3. В эксперименте использовался ноутбук с центральным процессором Intel Core i3-2330M, 2.2 GHz и видеокартой NVIDIA GeForce 410M (48 ядер CUDA, производительность 73 Gflops). В результате тестирования было установлено, что время вычисления при использовании параллельного алгоритма уменьшилось более чем в 10 раз, при этом результаты частотно-временного анализа оказались идентичными. В табл. 2 приведены результаты выполнения стандартного метода согласованного преследования и разработанного параллельного алгоритма для фрагментов записи разной длины: 1000, 5000 и 10000 отсчетов на 1, 10 и 20 итерациях.

На рис. 4. показан пример использования последовательного и параллельного алгоритмов согласованного преследования при анализе фрагмента записи аку-

стической эмиссии, включающей три импульса. Длительность фрагмента 500 отсчетов при частоте дискретизации 48 кГц равна ~ 10.5 мс. Получившиеся в результате разложения частотно-временные структуры импульсов в обоих случаях (рис. 4 б, в) совершенно идентичны. Время расчета при использовании стандартного метода согласованного преследования составило 2006 мс, параллельного алгоритма – 185 мс, выигрыш во времени вычислений – 10.8 раза. Таким образом, использование параллельного алгоритма обеспечивает выигрыш во времени вычислений без ухудшения качества разложения. Следует отметить, что, несмотря на поддержку платформы CUDA используемая видеокарта имеет достаточно низкую производительность. Применение более производительной карты, например NVIDIA GeForce GTX 760 (1152 ядра CUDA, производительность 2258 Gflops) позволит еще более существенно уменьшить время вычислений и синтезировать систему частотно-временного анализа акустической эмиссии, работающую в режиме реального времени.

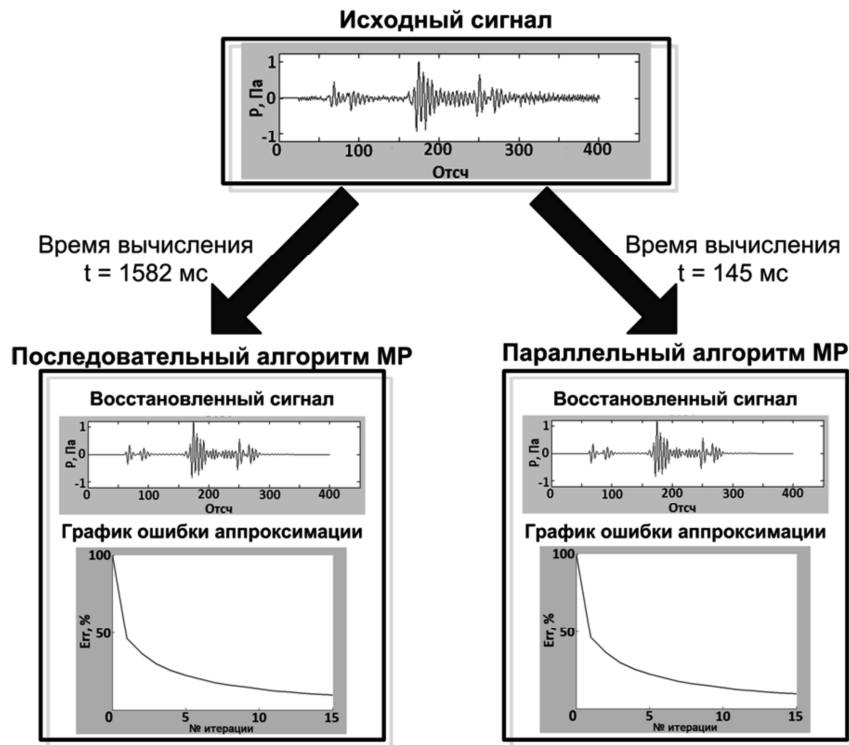


Рис. 3. Схема тестирования алгоритмов на реальном сигнале

Таблица 2. Выигрыш от использования параллельного алгоритма при вычислениях

Кол-во итераций	Стандартный метод, мс	Параллельный алгоритм, мс	Выигрыш, раз
Длина сигнала = 1000 отсч.			
1	291	67	4.34
10	2731	196	13.93
20	5432	339	16.02
Длина сигнала = 5000 отсч.			
1	1434	130	11.03
10	14003	709	19.75
20	27985	1358	20.61
Длина сигнала = 10000 отсч.			
1	2859	211	13.55
10	28072	1350	20.79
20	56182	2617	21.47

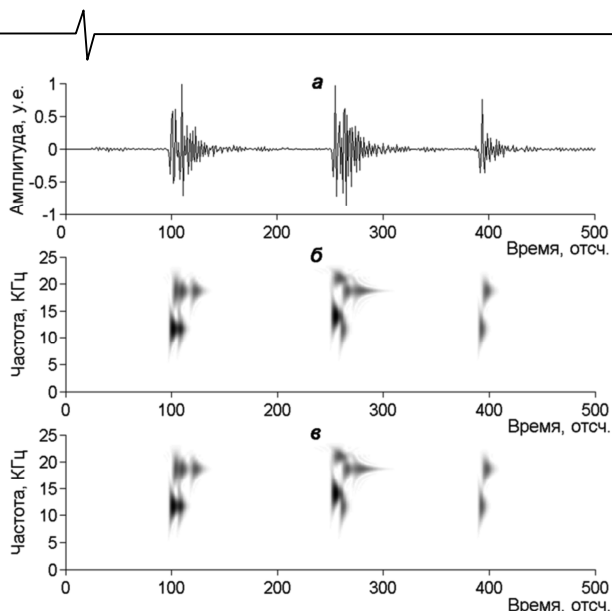


Рис. 4. Геоакустические импульсы (а) и их разложение методом согласованного преследования с использованием последовательного (б), параллельного (с) алгоритмов

Заключение

Предложен параллельный алгоритм метода согласованного преследования, обеспечивающий выигрыш во времени вычислений по сравнению с обычным (последовательным) алгоритмом этого метода более чем в 10 раз. Реализация данного алгоритма на современных видеокартах, поддерживающих программно-аппаратную платформу CUDA, позволяет синтезировать систему частотно-временного анализа акустической эмиссии, работающую в режиме реального времени.

Литература

1. Chakraborty A., Okaya D. Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods// *Geophysics*. Vol.60, 6, P.1906-1916.
2. Josso N.F., Zhang J.J., Papandreou-Suppappola A. et al. On the Characterization of time-scale underwater acoustic signal using matching pursuit decomposition // *Proceedings of the IEEE of OCEANS Conference*. P. 6, Biloxi, Miss, USA, 2009.
3. Ebenezer S.P., Papandreou-Suppappola A., Suppappola S.B. Classification of acoustic emissions using modified matching pursuit // *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. N.3, P. 347–357.
4. Kovvali N., Das S., Chakraborty D., Cochran D., Papandreou-Suppappola A., Chattopadhyay A. Timefrequency based classification of structural damage//*AIAA/ASME /ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Ma-*

terials Conference, 23 - 26 April 2007, Honolulu, Hawaii, P. 2007-2055.

5. Марापалец Ю.В., Тристанов А.Б. Применение метода разреженной аппроксимации в задачах анализа сигналов геоакустической эмиссии // *Цифровая обработка сигналов*. 2011. №2. С.13-17

6. Афанасьева А.А., Луковенкова О.О., Марापалец Ю.В., Тристанов А.Б. Применение разреженной аппроксимации и методов кластеризации для описания структуры временных рядов акустической эмиссии // *Цифровая обработка сигналов*. 2013. №2. С.30-34.

7. Марापалец Ю.В., Шевцов Б.М. Мезомасштабная акустическая эмиссия. Владивосток: Дальнаука, 2012. 125 с.

8. Афанасьева А.А., Луковенкова О.О. Применение метода согласованного преследования для обнаружения импульсов акустической эмиссии звукового диапазона // *Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова*. Серия: «Цифровая обработка сигналов и её применение». Выпуск: XV. Т. 1. М.:, 2013. С. 86-89.

9. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing*. N. 41(12), P.3397-3415.

10. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 672 с.

11. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб.: БВХ-Петербург, 2002. 608с.

12. Боресков А.В., Харламов А.А. Основы работы с технологией CUDA. М.:ДМК Пресс, 2010. 232 с.

13. Сандерс Д., Кэндрот Э. Технология Cuda в примерах. Введение в программирование графических процессоров. М.: ДМК Пресс, 2011. 232с.

THE MATCHING PURSUIT PARALLEL ALGORITHM AND ITS APPLICATION FOR ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS

Marapulets Yu.V., Kim A.A.

The parallel matching pursuit algorithm has been proposed. Its realization on hardware and software platform CUDA has been considered in this article. It has been shown that using of parallel algorithm gives a computing time advantage in 10 times in comparison with the standard method. It proves that application of this algorithm is expedient in the time-frequency pulse signal analysis including the acoustic emission signals.