

КОНЕЧНО-РАЗНОСТНАЯ МИГРАЦИЯ В ТРЕХМЕРНОМ ВАРИАНТЕ С РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕМ ПРОЦЕССА ВЫЧИСЛЕНИЙ

А.О. Верпаховская, В.Н. Пилипенко, Е.В. Пилипенко

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, просп. Акад. Палладина, 32, г. Киев, 03680, Украина, e-mail: alversim@gmail.com, vpylypenko@gmail.com, lenasloboda@gmail.com

Переход сейсморазведки на трехмерные или площадные системы наблюдений ведет к значительному увеличению объема зарегистрированных волновых полей, которые необходимо обработать в кратчайшие сроки. При этом необходимо учитывать постоянно возрастающие требования к детальности результата и сложность строения изучаемой площади. В то же время, несмотря на быстрый прогресс в области развития вычислительной техники, появляется проблема недостаточности ресурсов для обработки трехмерных сейсмических наблюдений на отдельно взятом компьютере. Поэтому задача программной реализации существующих процедур обработки с привлечением кластера становится чрезвычайно актуальной в современной сейсморазведке. Рассмотрены разработанные алгоритм и программная реализация трехмерной конечно-разностной миграции после суммы с распараллеливанием процесса вычислений.

Ключевые слова: сейсморазведка, волновое поле, моделирование, конечно-разностный метод, трехмерная миграция после суммы, вычислительная техника, алгоритм, кластер, обработка данных, распараллеливание процесса вычислений.

Введение. В современной обработке сейсмических данных процедура миграции является ключевым этапом перед интерпретацией, поскольку предоставляет наглядную информацию о строении изучаемого разреза в виде его глубинного изображения в динамических характеристиках наблюденного волнового поля. В то же время при обработке трехмерных сейсмических наблюдений процедура миграции является не только более сложной, по сравнению с двумерным вариантом, но и самой объемной по вычислениям. Прежде всего, это связано с огромным количеством исходного материала трехмерной сейсморазведки, с теоретической базой конечно-разностного продолжения волнового поля в трехмерной среде, а также с постоянно растущим требованием к повышению детальности результативного изображения.

В 1989 г. А. Гейст разработал специальное программное обеспечение для объединения нескольких однотипных процессоров в единый кластер, что положило начало новому витку разработки методов, которые предусматривают обработку объемных данных [12]. Появление кластерных вычислений также значительно упростило обработку больших объемов сейсмической информации. К таким данным относятся профильные наблюдения, которые рассчитаны на детальное изучение района исследований и имеют очень плотную систему наблюдений, моделирование волновых полей как в двумерном, так и трехмерном варианте, а также площадные наблюдения.

Однако привлечение в процесс расчетов кластерных технологий независимо от выбранного метода обработки сейсмических данных требует доработки его алгоритмов и их программных реа-

лизаций с учетом распараллеливания вычислений на произвольном количестве процессоров.

Распараллеливание на кластере при моделировании волнового поля с использованием библиотек Message Passing Interface (MPI) хорошо освещено в литературе [11, 13]. Широко представлена также реализация на кластере метода миграции Кирхгофа с помощью графических процессоров – Graphic Processing Unit (GPU) и Compute Unified Device Architecture (CUDA) [6, 8, 9]. Но, как правило, графические процессоры стоят очень дорого, поэтому такие подходы требуют значительных затрат при их реализации.

В Институте геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины уже несколько лет разрабатываются алгоритмы и программы конечно-разностных методов миграции и моделирования волнового поля для их адаптации при работе на кластере. При распараллеливании используется библиотека pthread, которая имеется во всех современных версиях системы Linux и позволяет контролировать выполнение поставленной задачи при разделении расчетов на несколько процессоров. В частности, таким образом реализованы методы миграции в двумерной среде и моделирование волнового поля в трехмерном пространстве с распараллеливанием [1, 2, 4].

В то же время с ростом использования в сейсморазведке трехмерных систем наблюдений возникла необходимость реализовать распараллеливание процесса вычислений и в случае трехмерной конечно-разностной миграции после суммы. В связи с тем что вариант миграции после суммы является стандартной процедурой при обработке данных метода отраженных волн многократными перекрытиями в

геофизических производственных объединениях, сокращение времени обработки при этом играет важную роль. Разработан алгоритм, который предусматривает распараллеливание внутри программы, а не по пунктам возбуждения, как это было реализовано раньше. Такое распараллеливание является более сложным в реализации, поскольку требует привлечения других системных библиотек и инструментов. Вместе с тем указанный подход имеет свои преимущества, которые заключаются в возможности разбивать большие объемы используемых в расчетах данных с распараллеливанием вычислений по временным слоям при продолжении волнового поля.

Разработанная в Институте геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины трехмерная полноволновая миграция после суммы показала высокую эффективность при изучении сложного геологического строения шахтных полей по данным трехмерной сейсморазведки. Таким образом, теоретические основы данного варианта трехмерной миграции рассматривались ранее [5]. В связи с тем что при обработке реальных данных возникли трудности с оборотом объемных волновых полей на отдельно взятом компьютере, было предложено рассмотреть возможность привлечения к этому процессу кластерных вычислений.

Цель данной статьи – разработка алгоритма и программной реализации трехмерной полноволновой миграции после суммы с распараллеливанием расчетов при использовании нескольких процессоров.

Предлагаемый вариант трехмерной полноволновой миграции после суммы с распараллеливанием процесса вычислений на кластере позволяет формировать изображение среды без ограничений на угол наклона отражающих границ, что создает благоприятные условия для выявления тонких особенностей строения среды, скоростная модель которого может быть неоднородной по всем пространственным координатам. Эффективность предложенной миграции демонстрируется на модельных примерах и реальных данных площадной сейсморазведки.

Алгоритм трехмерной конечно-разностной миграции после суммы с распараллеливанием процесса вычислений. Как и в случае основных конечно-разностных методов миграции [1, 4], алгоритм полноволновой трехмерной миграции после суммы основан на обратном продолжении волнового поля в среде, которое выполняется с помощью решения дифференциального волнового уравнения. В трехмерном варианте дифференциальное волновое уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial z^2} = \frac{1}{V^2(x, y, z)} \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial t^2},$$

где x, y, z – пространственные координаты; $V(x, y, z)$ – переменная скорость; t – время; $u(x, y, z)$ – амплитуда временного поля.

Поскольку теоретические основы трехмерной миграции полноволнового продолжения поля уже представлялись [5], остановимся на некоторых наиболее важных аспектах. Система координат в данном подходе преобразуется согласно распространению сейсмических волн с глубины к земной поверхности, что гарантирует оптимальное конечно-разностное продолжение волнового поля. Преобразование пространственно-временных координат при этом позволяет избежать ограничения на угол подхода волн, достичь соответствия линий разностной сетки основному направлению распространения волн при обратном продолжении волнового поля, что, в свою очередь, дает возможность получить удовлетворительную аппроксимацию дифференциальных операторов разностными при относительно больших сеточных шагах по глубине.

Таким образом, конечно-разностная сетка для полноволнового трехмерного обратного продолжения волнового поля формируется сеточными линиями, которые соответствуют осям новой системы координат x', y', t', τ' со значениями поля в узле сетки $u_{i,j}^{k,l}$. Так как при конечно-разностном продолжении волнового поля важно определить область решения, получаем следующую область расчетов:

$$x' = i\Delta x'; y' = j\Delta y'; t' = k\Delta t'; \tau' = l\Delta \tau',$$

где $i = 1 \div n; j = 1 \div m; k = 1 \div p; l = 1 \div q$ – сеточные координаты; n, m, p, q – количество сеточных узлов по направлениям осей x', y', t', τ' .

Проекция расчетной сетки на отдельные плоскости показаны на рис. 1. Каждому узлу на линии оси t отвечает двумерный срез входного куба волнового поля ОГТ в определенный момент времени.

Выбор конечно-разностной схемы диктуется необходимостью придерживаться следующих требований:

- конечно-разностное решение должно быть абсолютно устойчивым, а значит, не зависеть от соотношения сеточных шагов и иметь квадратичную сходимость к дифференциальному решению волнового уравнения;

- конечно-разностная схема должна быть факторизованной, экономичной, что позволяет вести расчеты с минимальным объемом вычислений.

Данным требованиям полностью отвечает конечно-разностная аппроксимация дифференциального волнового уравнения на предложенной четырехмерной пространственно-временной сетке [5]. В результате факторизации, которая в данном случае заключается в расщеплении оператора при $u_{i,j}^{k-1,l-1}$, решение происходит в два этапа методом прогонки. Сначала рассчитываются коэффициенты прогонки, а затем выполняется рекуррентный расчет неизвест-

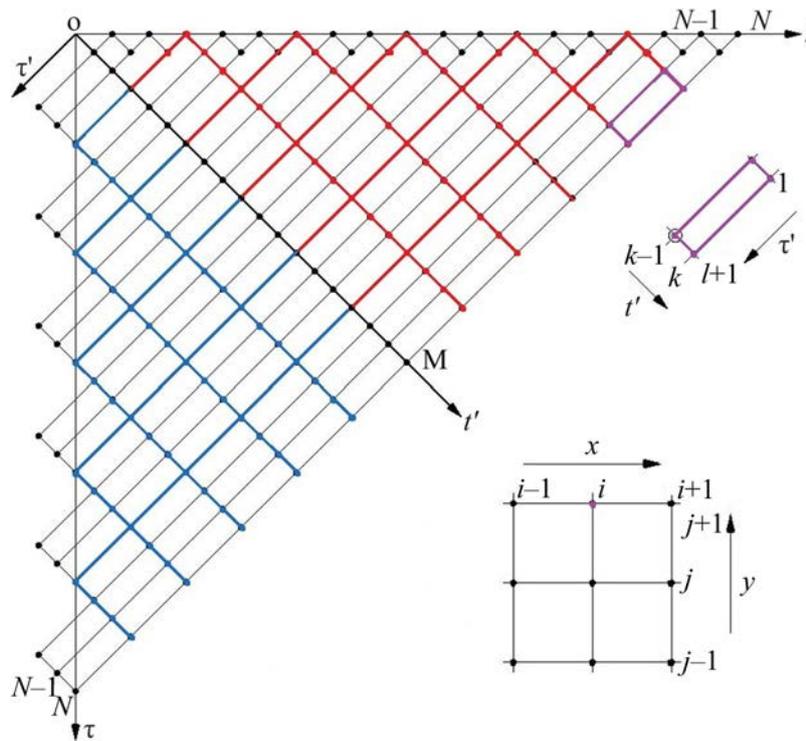


Рис. 1. Проекция конечно-разностной сетки на плоскость $t\tau$, а также две проекции четырехмерного сеточного шаблона на плоскости $t't'$ и xy

Fig. 1. The projection of the finite-difference grid onto a plane $t\tau$, and also two projection of four-dimensional grid pattern onto the plane $t't'$ and xy

ных в обратном порядке, что в случае волнового поля означает вычисление от u_N, u_{N-1} до u_1, u_0 [3].

Миграционный куб изображения по окончании продолжения волнового поля формируется в сеточных узлах, которым на проекции сетки на плоскость $t\tau$ отвечает линия τ . Продолжение поля происходит последовательно на временных срезах начиная с максимального N в обратном направлении до 1 уровня. При этом на каждом временном уровне поле пересчитывается в глубину от земной поверхности (ось t) и заканчивается при достижении узлов на оси τ .

Распараллеливание процесса вычислений производится по временным срезам, которые задаются очередью. В промежуточном кубе памяти сохраняется расчет по предыдущему срезу. Каждый срез в очереди на единицу меньше предыдущего. Далее проверяется номер этапа расчетов. На каждом этапе выполняется согласование работы с потоками, которые ведут расчеты на предыдущем и следующем временных срезах, так как очередной срез может продолжать расчеты по глубине только тогда, когда необходимый глубинный уровень на предыдущем временном срезу уже рассчитан другим потоком. Аналогично очередной поток по завершении расчетов на каждом глубинном уровне дает разрешение на использование этих данных другому потоку, который ведет вычисления на следующем временном срезу.

Результат вычислений на каждом шаге по глубине сохраняется в промежуточном кубе памяти

данного потока до окончания всех глубинных шагов временного среза, но во время завершения цикла глубинных шагов освобождается аналогичная память потока, который вел расчеты предыдущего временного среза. Результат вычисления последнего глубинного шага на первом этапе запоминается в промежуточной дисковой памяти, а на втором этапе заносится на диск как фрагмент результативного миграционного изображения. Таким образом, из фрагментов формируется общий результативный куб.

Программная реализация полноволновой трехмерной миграции суммы ОГТ с распараллеливанием процесса вычислений. Миграционное преобразование суммы ОГТ в изображение среды конечно-разностным методом желательно выполнять одновременно для всей площади работ, в связи с чем реализация этого процесса с использованием параллельной схемы вычислений имеет свои особенности по сравнению с миграцией по исходным данным и моделированием волнового поля, которые рассматривались ранее [1, 2, 4].

Остановимся более подробно на реализации распараллеливания процесса конечно-разностных вычислений с помощью процедур MUTEX и SEMAPHORES, что позволит организовать одновременное конечно-разностное обратное продолжение волнового поля по его временным срезам.

Количество одновременно рассчитываемых срезов будет отвечать количеству задействованных процессоров.



Рис. 2. Общая блок-схема вычислительного процесса при трехмерной конечно-разностной миграции после суммы с распараллеливанием на нескольких процессорах

Fig. 2. General block diagram of the computing process for the three-dimensional post stack finite-difference migration with parallelization on multiple processors

На рис. 2 показана общая блок-схема вычислительного процесса, основной составляющей которого является обратное продолжение волнового поля ОГТ. Рассмотрим более подробно некоторые этапы разработанной блок-схемы.

Введение и подготовка входных параметров.

Входные параметры: данные о размерах входного куба суммы ОГТ, значения шагов по координатам x и y , размеры шагов по глубине и времени, а также количество процессоров, которые будут использованы в вычислениях. Размеры куба скорости, входного куба сейсмоотражений ОГТ и результирующего миграционного куба совпадают.

Подготовка входных данных для конечно-разностных вычислений. Входные данные отвечают стандартному сейсмическому формату SEG-Y. В программе производится переход к формату данных, который функционирует на кластере, а дальше – переход от трассопоследовательного во временнопоследовательный формат данных, так как на разностной

сетке необходимо вести последовательный во времени расчет волнового поля. Аналогично на диске готовится файл скоростных данных в последовательности срезов куба скорости по глубине. Срезы волнового поля и скорости по краям дополняются узлами для минимизации влияния помех, обусловленных отражением волнового поля от краев сеточной области.

Инициализация MUTEX процедуры. Перед началом работы потоков готовятся к запуску процедур MUTEX (входят в комплекс программ библиотеки pthread.h системы LINUX), которые используются при создании файлов и записи информации отдельным потоком для блокирования в этот момент работы других потоков посредством двух команд: pthread_mutex_lock и pthread_mutex_unlock.

Старт первого и второго этапов сеточных вычислений. Процесс формирования изображения среды выполняется обратным продолжением волнового поля ОГТ по сейсмическим наблюдени-

ям. Положению земной поверхности соответствует линия оси времени t на проекции $t\tau$ разностной сетки. Каждому узлу на этой линии отвечает двумерный срез входного куба волнового поля ОГТ в определенный момент времени. Результативный куб изображения формируется в сеточных узлах на линии τ проекции $t\tau$.

В программе процесс продолжения поля разбит на 2 этапа (см. рис. 1): 1 – переход с земной поверхности (ось t) на промежуточную поверхность – линия ОМ (ось t'); 2 – заключительный этап – процесс продолжения поля с промежуточной поверхности на вертикальную (проекция оси τ).

Инициализация процедур SEMAPHORE. Перед стартом потоков происходит инициализация процедур SEMAPHORE (входят в комплекс программ библиотеки semaphore.h), которые используются в программе для организации обмена данными между отдельными потоками. Число семафоров определяется количеством временных срезов поля, перед началом вычислений по каждому из этапов все семафоры приводятся в замкнутое положение.

Подготовка потоковой информации. Запуск каждого из потоков сопровождается набором параметров, которые формируются в виде отдельной структуры и используются при выполнении потоком потоковой функции: файл семафоров; файл адреса с промежуточными данными для временных срезов поля; номер потока; общее количество вычисленных временных срезов; номер временного среза, стоящего первым в очереди.

Выполнение вычислений в потоковом режиме. Последовательный старт потоков выполняется программой pthread_create, которая запускает процесс выполнения потоковой функции, обеспечивающей последовательный и организованный расчет поля по всем временным срезам. Распределение временных срезов для потоков определяется очередью. Блок-схема выполнения потоковой функции показана на рис. 3.

Завершение работы каждого потока контролируется командой pthread_join, по окончании работы всех потоков работа семафоров прекращается командой sem_destroy.

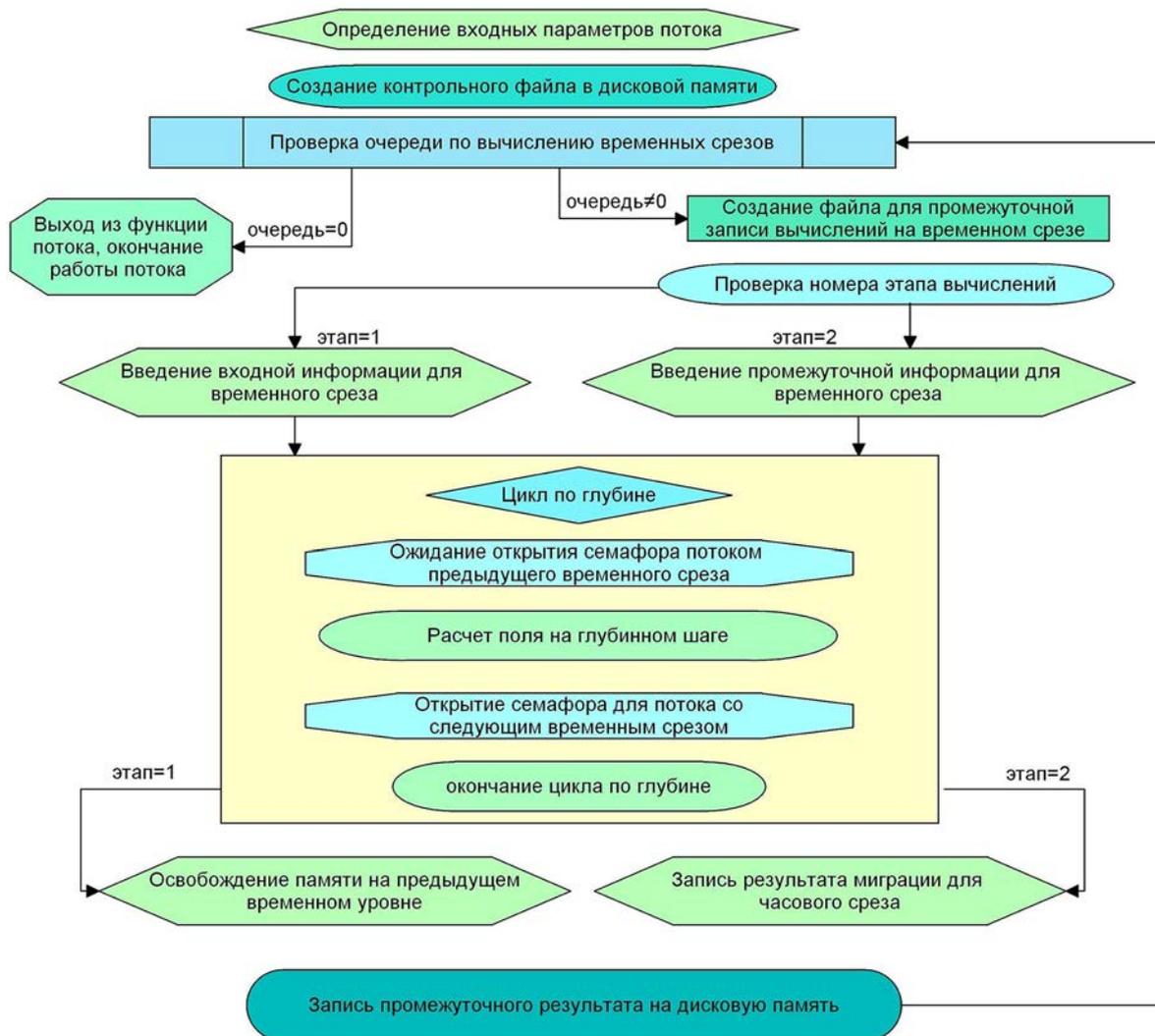


Рис. 3. Блок-схема выполнения потоковой функции отдельным процессором

Fig. 3. Block diagram of the implementation of the streaming function a separate processor

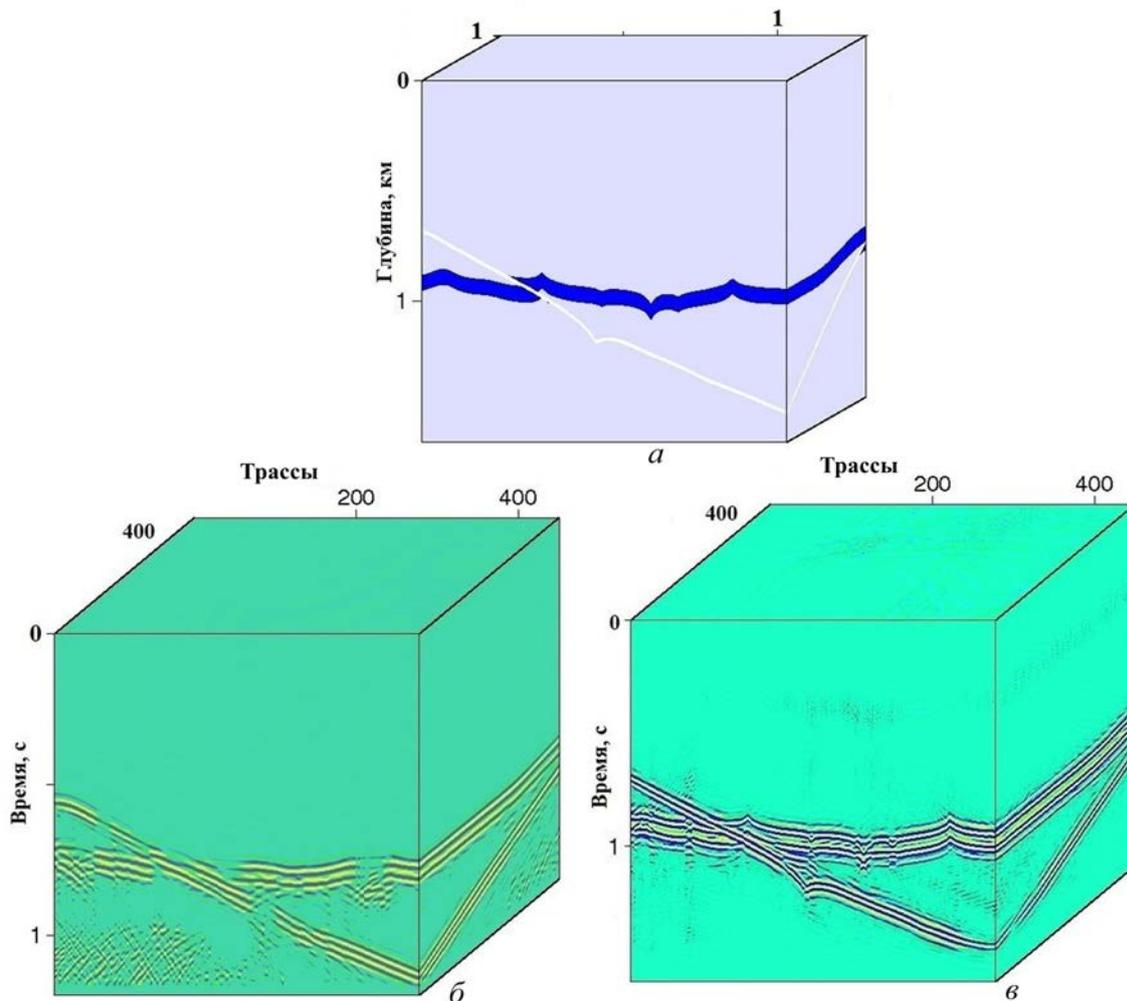


Рис. 4. Модельный пример применения трехмерной конечно-разностной полноволновой миграции после суммы с распараллеливанием процесса вычислений: *a* – скоростная модель среды; *б* – смоделированное волновое поле; *в* – глубинное изображение среды

Fig. 4. Model example of the application of three-dimensional post stack full-wave finite-difference migration with parallelization of the computing process: *a* – velocity model; *b* – the modeled wave field; *c* – depth image of the medium

Приведение результативного миграционного куба к стандартному формату сейсмических данных. После завершения работы второго этапа вычислений полученные результаты в виде временных срезов мигрированного куба изображения среды переводятся из временноформатного в трассоформатный вид и затем в стандартный формат сейсмических данных SEG-Y.

Блок-схема выполнения функции потока. Для каждого отдельного потока стартует своя копия функции, которая предполагает: создание в контрольной директории текстового файла с номером потока, в котором будет храниться информация о работе процессора; под защитой команд MUTEX выделение оперативной памяти для промежуточных расчетов, а также памяти для девяти двумерных матриц коэффициентов, которые входят в разностное уравнение; выполнение цикла по временным срезам: вначале проверяется очередь временных срезов (пустая – работа прекращается, не пустая – под защитой MUTEX выделяется куб промежуточной

памяти с номером временного среза, который на данный момент был первым в очереди). В дальнейшем в кубе будет храниться результативное поле для данного потока. Промежуточный куб памяти с номером на единицу больше используется этим потоком как источник исходной информации для разностных расчетов. В очереди временных срезов следующий срез будет по номеру на единицу меньше. Далее проверяется номер этапа расчетов, каждый из которых выполняется путем разностного продолжения волнового поля в цикле по сменному числу глубинных шагов. На первом этапе выполняется чтение входного волнового поля с земной поверхности (ось t) и пересчет на промежуточный уровень (линия ОМ), на втором – волновое поле продолжается с промежуточного уровня на срез сетки (ось τ'), где формируется результативный куб миграционного изображения.

На каждом этапе семафорами проверяется работа с потоками, которые выполняют расчеты на предыдущем и следующем временных срезах. Оче-

редной временной срез может продолжать расчеты по глубине, когда необходимый глубинный уровень на предыдущем временном срезе будет рассчитан другим потоком. Аналогично очередной поток по окончании расчета на каждом глубинном уровне дает разрешение на использование этих результатов потоку, который ведет вычисления на следующем временном срезе.

Результат вычислений на каждом шаге по глубине сохраняется в промежуточном кубе памяти очередного потока и по окончании всех глубинных шагов временного среза, но в момент окончания цикла глубинных шагов освобождается аналогичная память потока, который вел расчеты предыдущего временного среза. По окончании глубинных шагов результат последнего вычисления запоминается в промежуточной дисковой памяти (на первом этапе) или заносится на диск как фрагмент результативного миграционного изображения (на втором этапе).

Модельный пример применения трехмерной конечно-разностной полноволновой миграции после суммы с распараллеливанием процесса вычислений. Разработанная трехмерная конечно-разностная полноволновая миграция после суммы с распараллеливанием процесса вычислений была протестирована на модельном примере. Выбранная для при-

мера двухслойная скоростная модель и один из ее срезов показаны на рис. 4, а. Данная модель имеет границу раздела с разного вида нарушениями, что дало возможность оценить эффективность разработанной программы в условиях сложного строения изучаемой среды.

На рис. 4, б показан куб смоделированного волнового поля, а на рис. 4, в демонстрируются результаты применения трехмерной конечно-разностной полноволновой миграции после суммы с распараллеливанием процесса вычислений. Сравнение заданной модели (рис. 4, а) и полученного в результате миграции изображения (рис. 4, в) позволяет подтвердить возможности разработанного метода миграции при исследовании геологической среды с глубинным строением разной степени сложности.

Пример применения трехмерной конечно-разностной полноволновой миграции после суммы с распараллеливанием процесса вычислений при обработке реальных данных площадной сейсморазведки. Разработанная программа трехмерной конечно-разностной полноволновой миграции после суммы с распараллеливанием процесса вычислений была апробирована при обработке реальных наблюдений площадной сейсморазведки, проведенных с целью определения геологического строения структуры с

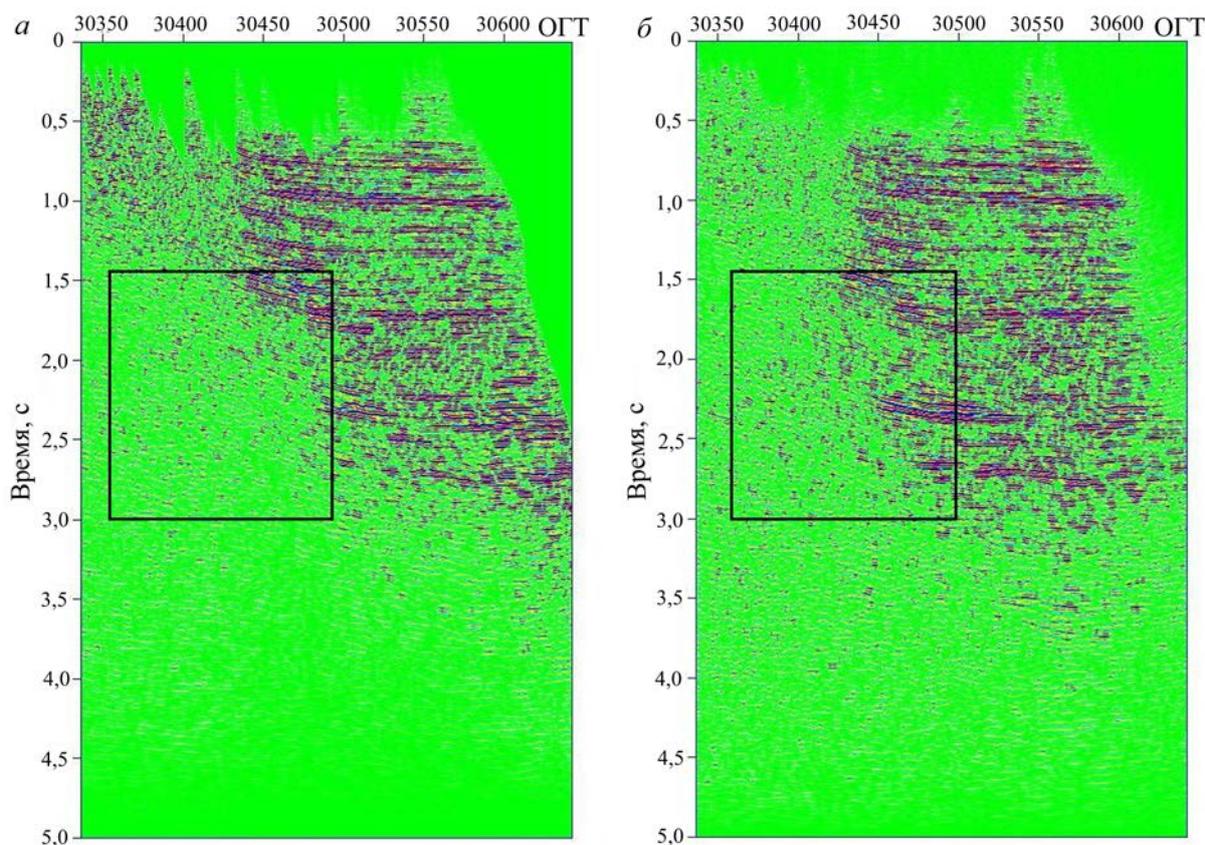


Рис. 5. Сравнение срезов результативных кубов изображений, полученных: а – стандартной программой в системе ProMAX (в ГПП “Укргеофизика”); б – предложенным вариантом трехмерной полноволновой миграции после суммы с распараллеливанием процесса вычислений

Fig. 5. Comparison of images of resultative cubes slices obtained: а – with the standard program in ProMAX system (GGP “Ukrgeofizika”); б – with the proposed version of three-dimensional post stack full-wave migration with parallelization of computing process

наличием соляного тела. В Технологическом центре ГПП “Укргеофизика” была выполнена обработка этих данных в системе ProMAX с применением временной миграции Кирхгоффа после суммы. В свою очередь, нами осуществлена предложенная процедура трехмерной полноволновой конечно-разностной миграции с распараллеливанием процесса вычислений. Для сравнения результатов применения разных вариантов миграционных преобразований были использованы идентичные исходные данные: куб распределения скорости в среде и исходный куб сейсмических данных после применения процедуры суммирования трасс методом общей глубинной точки (ОГТ).

На рис. 5 демонстрируется сравнение срезов кубов, полученных с использованием стандартной программы миграции в системе ProMAX и программы с распараллеливанием процесса вычислений на кластере, разработанной в Институте геофизики НАН Украины.

Сравнение результатов позволяет подчеркнуть общую схожесть результатов. Разница видна в некоторых отдельных деталях изображения. На выделенном прямоугольнике участка изображения наблюдается большее продление реперных отражающих горизонтов в сторону соляного тела на результате, полученном при использовании разработанного варианта конечно-разностной полноволновой миграции, в сравнении с результатом стандартной миграции Кирхгоффа. Соляное тело прогнозируется при отсутствии протяженных отражающих горизонтов. Это отличие может быть объяснено более точным миграционным преобразованием в разработанной программе.

Экспериментальные тесты показали, что сокращение времени вычислений в этой программе прямо пропорционально количеству задействованных процессоров. В данном примере к обработке был привлечен кластер с 32 процессорами. Времени для расчетов потребовалось примерно в 30 раз меньше, чем необходимо для вычислений на отдельном компьютере.

Выводы. Так как при обработке больших объемов сейсмических наблюдений важное значение имеют время и ресурсы, которые при этом затрачиваются, актуальной задачей современной сейсморазведки выступает разработка алгоритмов и программных реализаций методов обработки с учетом привлечения к расчетам кластеров. Особенно это касается процедуры миграции, которая нацелена на воссоздание изображения глубинного строения района исследований по наблюдаемому волновому полю с требованием повышения детальности результата.

Разработанный вариант конечно-разностной трехмерной полноволновой миграции после суммы с распараллеливанием процесса вычислений позволяет выполнять качественную обработку больших объемов данных пространственной сейсморазведки

в сжатые сроки, что связано с количеством процессоров в кластере. Согласно результатам испытаний, разработанные программы имеют достаточную точность и эффективность даже в условиях геологического строения среды, осложненного наличием соляного тела.

1. *Верпаховская А.О.* Миграция исходных сейсмограмм и моделирование волнового поля с распараллеливанием процесса вычислений на кластере / А.О. Верпаховская, В.Н. Пилипенко, Е.В. Пилипенко, Г.Д. Сидоренко // Геоинформатика. – 2013. – № 3. – С. 47–58.
2. *Верпаховская А.О.* 3D конечно-разностное моделирование волнового поля с распараллеливанием вычислительного процесса / А.О. Верпаховская, В.Н. Пилипенко // 2-я междунар. науч.-практ. конф. “Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур (Сейсмо-2011)”, 18–24 сент. 2011 г., Украина, АР Крым, г. Феодосия, пгт Курортное: тез. докл. – К., 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – 5 с.
3. *Годунов С.К.* Разностные схемы / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
4. *Пилипенко В.Н.* Миграция исходных сейсмограмм общего пункта взрыва во временной области конечно-разностным методом / В.Н. Пилипенко, А.О. Верпаховская, Е.В. Пилипенко // 2-я междунар. науч.-практ. конф. “Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур (Сейсмо-2011)”, 18–24 сент. 2011 г., Украина, АР Крым, г. Феодосия, пгт Курортное: тез. докл. – К., 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – 5 с.
5. *Пилипенко В.Н.* Формирование трехмерного изображения среды по сумме ОГТ для изучения геологического строения шахтных полей / В.Н. Пилипенко, А.О. Верпаховская, В.Б. Будкевич, Е.В. Пилипенко // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37, № 4. – С. 104–113.
6. *A Parallel Algorithm of Kirchhoff Pre-stack Depth Migration Based on GPU / Y. Wang, C. Li, Y. Tian, H. Yan, C. Zhao, J. Zhang // 14th Inter. conf. proceed. P. 2, “Algorithms and Architectures for Parallel Processing”, august, 24–27, 2014. – Dalian, China, 2014. – P. 207–218.*
7. *Claebout J.F.* Downward continuation of moveout-corrected seismograms / J.F. Claebout, S.M. Doherty // Geophysics. – 1972. – V. 37, iss. 5. – P. 741–768.
8. *Computing prestack Kirchhoff time migration on general purpose GPU / X. Shi, C. Li, S. Wang, H. Wang // Computers & Geosciences. – 2011. – V. 37, iss. 10. – P. 1702–1710.*
9. *GPU-accelerated direct sampling method for multiple-point statistical simulation / T. Huang, X. Li., T. Zhang, D. Lu // Computers & Geosciences. – 2013. – V. 57. – P. 13–23.*
10. *Li Z.* Wave-field extrapolation by the linearly transformed wave equation // Geophysics. – 1986. – V. 51, iss. 8. – P. 1538–1551.
11. *Parallelization Strategies for Seismic Modeling Algorithms / S. Chakraborty, S. Yerneni, S. Phadke, D. Bhardwaj // J. Ind. Geophys. Union. – 2003. – V. 7, no. 1. – P. 11–14.*

12. *PVM: Parallel Virtual Machine: A Users' Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing* / A. Geist, A. Beguelin, J. Dongarra, W. Jiang, R. Manchek, V. Sunderam. – Cambridge: The MIT Press, England, 1994. – 298 p.
13. *Sun W. Parallel Seismic Propagation Simulation in*

Anisotropic Media by Irregular Grids Finite Difference Method on PC Cluster / W. Sun, J. Shu, W. Zheng // Intern. Conf. "Computational Science and Its Applications – ICCSA", Singapore, May 9–12, 2005. Proceed. P. 4. – Singapore, 2005. – P. 762–771.

Поступила в редакцію 06.09.2016 г.

СКІНЧЕННОРІЗНИЦЕВА МІГРАЦІЯ У ТРИВИМІРНМУ ВАРІАНТІ З РОЗПАРАЛЕЛЮВАННЯМ ПРОЦЕСУ ОБЧИСЛЕНЬ

О.О. Вернаховська, В.М. Пилипенко, О.В. Пилипенко

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, просп. Акад. Палладіна, 32, м. Київ, 03680, Україна, e-mail: alversim@gmail.com, vpylypenko@gmail.com, lenasloboda@gmail.com

Перехід сейсморозвідки на тривимірні або площові системи спостережень приводить до значного збільшення обсягу зареєстрованих хвильових полів, які необхідно обробити у найкоротші терміни. При цьому потрібно враховувати постійно зростаючі вимоги до детальності результату і складність будови досліджуваної площі. Водночас, незважаючи на швидкий прогрес у сфері розвитку обчислювальної техніки, з'являється проблема недостатності ресурсів для обробки тривимірних сейсмічних спостережень на окремо взятому комп'ютері. Тому задача програмної реалізації існуючих процедур обробки із залученням кластера стає надзвичайно актуальною в сучасній сейсморозвідці. Розглянуто розроблені алгоритм і програмну реалізацію тривимірної скінченнорізницевої міграції після суми з розпаралелюванням процесу обчислень.

Ключові слова: сейсморозвідка, хвильове поле, моделювання, скінченнорізницевий метод, тривимірна міграція після суми, алгоритм, обчислювальна техніка, кластер, обробка даних, розпаралелювання процесу обчислень.

3D FINITE-DIFFERENCE MIGRATION WITH PARALLELIZATION OF COMPUTING PROCESS

О.О. Verpakhovska, N.V. Pylypenko, O.V. Pylypenko

¹Institute of Geophysics, National Academy of Science of Ukraine, 32, Palladin Ave., Kiev, 03680, Ukraine, e-mail: alversim@gmail.com, vpylypenko@gmail.com, lenasloboda@gmail.com

The purpose of the paper is to develop a three-dimensional post stack finite-difference migration with parallelization of computing process to process 3D seismic observations on a separate computer, taking into account the ever-increasing requirements for detailed results and the complexity of the structure of the study area. The effectiveness of the developed version of the post stack finite-difference migration is proved with practical examples, in particular, for the structure of medium complicated by the presence of the salt body.

Design/methodology/approach. Algorithm of a three-dimensional post stack migration is based on reverse full-wave field continuation in the medium that is carried out by solving the differential wave equation using a finite difference method. In this case the differential wave equation is approximated by the difference one in the four-dimensional space-time grid. In this approach, the coordinate system is converted according to the seismic wave propagation from the depths to the surface, ensuring optimal finite-difference wave field continuation. Parallelization of computations process is on time slices which are defined with a queue. The calculation of the previous slice is stored in the intermediate memory cube. In parallelizing we used library pthread, which is present in all modern versions of the Linux system and allows you to control the execution of the task in the separation calculations on several processors. The software was developed according to the proposed algorithm of a three-dimensional post stack finite-difference migration with parallelization of the computing process for processing.

Findings. The developed three-dimensional post stack full-wave finite-difference migration with parallelization of computing process for processing has been tested in a model and real mode. The obtained results confirm the applicability of the developed method of migration in studding the geological environment of deep structure with different degrees of complexity. To demonstrate the effectiveness of this method we compared the results obtained with those obtained using standard software migration system ProMAX and the developed program with parallelization of computing process on the cluster, developed at the Institute of Geophysics. The comparison of the results allows us to emphasize a general similarity of the results and the difference in some of the particular parts of the image (larger extension of reflecting horizons in the direction of the salt body as a result of applying the proposed variant of post stack full-wave finite-difference migration), which may be attributed to a more accurate migration transformation in the developed program.

Practical value/implications. The developed version of a three-dimensional post stack full-wave finite-difference migration with parallelization of computing process allows on to carry out high-quality processing of large volumes of spatial seismic data in a short time, which depend on the number of processors in the cluster. The results of the

testing of developed programs as in model and real data areal seismic survey, prove accuracy and efficiency even in the structure of the medium complicated by the presence of salt body, which is important for oil and gas companies, exploration activities.

Keywords: seismic survey, seismic wave propagation, wave field, modeling, full-wave field continuation, finite-difference method, three-dimensional post stack migration, space-time grid, computer technology, algorithm, cluster, data processing, parallelization of computing process.

References:

1. Verpakhovska A.O., Sydorenko G.D., Pylypenko V.N., Pylypenko E.V. A Finite-Difference Method of Pre-Stack Migration Procedures and Modeling of the Wave Field with Parallelizing of Calculation on Cluster. *Geoinformatika*, 2013, no. 3, pp. 47-58 (in Russian).
2. Verpakhovska A.O., Pylypenko V.N. 3-D finite-difference modeling of wave field with parallelization of computing process. *Sovremennye metody seysmorazvedki pri poiskakh mestorozhdeniy nefiti i gaza v usloviyakh slozhnopostroennykh struktur (Seysmo-2011)*, 2 mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, 18-24 sentyabrya 2011, Ukraina, AR Krym, Feodosiya, Kurortnoe: tezisy dokladov. CD-ROM, Kiev, 2011, 5 p. (in Russian).
3. Godunov S.K., Ryaben'kiy V.S. *Raznostnye skhemy*. Moscow: Nauka, 1977, 440 p. (in Russian)
4. Pylypenko V.N., Verpakhovska A.O., Pylypenko O.V. The migration of common shot seismograms in the time domain using finite-difference method. *Sovremennye metody seysmorazvedki pri poiskakh mestorozhdeniy nefiti i gaza v usloviyakh slozhnopostroennykh struktur (Seysmo-2011)*, 2 mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, 18-24 sentyabrya 2011, Ukraina, AR Krym, Feodosiya, Kurortnoe: tezisy dokladov. CD-ROM. Kiev, 2011, 5 p. (in Russian).
5. Pylypenko V.N., Verpakhovska A.O., Budkevych V.B., Pylypenko O.V. The formation of three-dimensional image of the medium on the CDP sum to study the geological structure of the mine fields. *Geofizicheskiy zhurnal*, 2015, vol. 37, no. 4, pp. 104-113 (in Russian).
6. Wang Y., Li C., Tian Y., Yan H., Zhao C., Zhang J. A Parallel Algorithm of Kirchhoff Pre-stack Depth Migration Based on GPU. *Algorithms and Architectures for Parallel Processing*, 14th International Conference. Proceedings. Part II, august, 24-27, 2014. Dalian, China, 2014, pp. 207-218.
7. Claebout J.F., Doherty S.M. Downward continuation of moveout-corrected seismograms. *Geophysics*, 1972, vol. 37, iss. 5, pp. 741-768.
8. Shi X., Li C., Wang S., Wang H. Computing prestack Kirchhoff time migration on general purpose GPU. *Computers & Geosciences*, 2011, vol. 37, iss. 10, pp.1702-1710.
9. Huang T., Li X., Zhang T., Lu D. GPU-accelerated Direct Sampling method for multiple-point statistical simulation. *Computers & Geosciences*, 2013, 57, pp. 13-23.
10. Li Z. Wave-field extrapolation by the linearly transformed wave equation. *Geophysics*, 1986, vol. 51, iss. 8, pp. 1538-1551.
11. Chakraborty S., Yerneni S., Phadke S., Bhardwaj D. Parallelization Strategies for Seismic Modelling Algorithms. *Journal of Indian Geophysical Union*, 2003, vol. 7, no.1, pp. 11-14.
12. Geist A., Beguelin A., Dongarra J., Jiang W., Manchek R., Sunderam V. *Parallel Virtual Machine: A Users' Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing*. Cambridge: The MIT Press, England, 1994, 298p.
13. Sun W., Shu J., Zheng W. Parallel Seismic Propagation Simulation in Anisotropic Media by Irregular Grids Finite Difference Method on PC Cluster. *Computational Science and Its Applications - ICCSA, 2005*: International Conference, Singapore, May 9-12, 2005. Proceedings. Part IV, pp. 762-771.

Received 06/09/2016