

## **ОСОБЕННОСТИ КЛАСТЕРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ 3-D ГЛУБИННОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ МИГРАЦИИ ДО СУММИРОВАНИЯ.**

Г.Н. Гогоненков<sup>1</sup>, В.П. Мясников<sup>2</sup>, А.Л.\*Плешкевич<sup>1</sup>, В.И. Турчанинов<sup>2</sup>

1 – ОАО Центральная геофизическая экспедиция (Москва, ул. Народного Ополчения, 38/3),

2 – Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

### **Some aspects of cluster-oriented 3-D PSDM realization.**

G.N. Gogonenkov<sup>1</sup>, V.P. Myasnikov<sup>2</sup>, A.L.\*Pleshkevich<sup>1</sup>, V.I. Turchaninov<sup>2</sup>

1 – Central Geophysical Expedition (Moscow, Narodnogo Opolcheniya Str., 38/3), 2 – Keldysh Institute of Applied Mathematic

#### **Summary.**

The advent and wide-spread use of new generation parallel-computing systems – the clusters – has made it possible to deploy the expensive 3-D prestack depth migration (3-D PSDM) as an ordinary procedure of seismic processing sequence. This paper highlights development and implementation of proprietary 3-D PSDM to run on domestic clusters of various configurations. The said 3-D PSDM is based on the linearized inversion, formulated in terms of “Born + ray” approximation. Due regard for wave propagation phenomena under the assumptions made and acquisition geometry used allows the 3-D PSDM to be referred to as “true amplitude” migration, and PSDM results to be used to quantitatively predict the subsurface medium properties. An example shows PSDM-processed actual 3-D marine seismic data using proprietary software, and compares the data to a standard equivalent.

#### **Аннотация.**

Появление и широкое распространение вычислительных систем нового поколения - кластеров, - осуществляющих параллельные вычисления, сделало возможным ввести в практику рутинной обработки сейсмических данных такую дорогостоящую процедуру как 3-D глубинная сейсмическая миграция до суммирования. Приведен опыт разработки и реализации указанного математического обеспечения на отечественных кластерах различной конфигурации. Созданное математическое обеспечение основано на решении обратной задачи рассеяния в ее линейаризованном борновско-лучевом приближении. Корректный учет законов распространения волн в рамках сделанных предположений и геометрии наблюдений позволяет называть такую миграцию «истинно-амплитудной» и использовать ее результаты для целей количественного прогноза свойств среды. Приведен пример обработки реальных сейсмических данных морских наблюдений и его сопоставление с западным аналогом.

#### **Введение.**

Революция в сфере вычислительной техники сделала актуальными постановку и практическое решение такой сложнейшей по своей трудоемкости задачи, каковой является 3-D глубинная сейсмическая миграция до суммирования. Напомним, что целью решения данной задачи является восстановление пространственных форм скоростных и плотностных неоднородностей внутри неоднородной земной среды по данным регистрации на поверхности наблюдений отраженных или рассеянных на этих неоднородностях волн упругих колебаний. В настоящее время общепринятой математической постановкой данной задачи является модель однократного акустического рассеяния зондирующих волн на малых неоднородностях. Это позволяет свести задачу миграции к линейному интегральному уравнению относительно неизвестной функции потенциала рассеяния, описывающей малые отклонения акустических свойств реальной среды от ее сглаженной опорной модели. Благодаря работам ряда исследователей в начале-середине 80-х годов [Beylkin, G., 1982] был разработан приближенный аналитический метод решения, позволяющий в явном виде разрешить указанное интегральное уравнение относительно функции потенциала рассеяния. Полученные формулы в целом имеют привычный для сейсморазведчиков вид, отвечающий эвристическому методу миграции Кирхгофа. Напомним, что в соответствии с этой формулой для построения изображения в каждой глубинной точке изучаемой среды необходимо выполнить интегрирование поля однократно-рассеянных или отраженных волн вдоль поверхностного годографа дифрагированной волны от данной точки. Важным отличием полученных формул обращения от известных эвристических формул миграции Кирхгофа является присутствующий в них вес интегрирования, позволяющий корректно учесть физику распространения волн в исследуемой среде для конкретной геометрии наблюдений в рамках сделанных предположений. Данное важное свойство

позволяет характеризовать миграцию на основе полученных формул как «истинно-амплитудную», а ее результаты использовать для количественного прогноза свойств слагающих пород. Последнее свойство особенно важно для целей AVO-анализа и для комплексной интерпретации результатов сейсморазведки при увязке динамических параметров получаемых изображений с каротажными данными.

### **Реализация 3-D глубинной миграции до суммирования на многопроцессорных вычислительных системах кластерного типа.**

На основе указанной постановки линеаризованной обратной задачи рассеяния была реализована быстродействующая программа 3-D глубинной сейсмической миграции до суммирования. В силу того, что изображение в произвольной точке исследуемой среды строится независимо от остальных точек, численный алгоритм позволяет с успехом использовать методику параллельных вычислений. Именно данная методика и соответствующая ей вычислительная техника позволили в последние годы произвести прорыв в решении ряда важнейших научно-технических задач, к которым принадлежит и 3-D глубинная сейсмическая миграция до суммирования. К числу важнейших достижений вычислительной техники последних лет следует отнести появление многопроцессорных вычислительных систем под общим наименованием «кластеры». Среди наиболее экономически оправданных решений на сегодняшний день следует отметить PC-кластеры, объединяющие вычислительные узлы на базе процессоров типа «Intel Pentium IV». В настоящее время указанные вычислительные системы, частью которых является также специализированное математическое обеспечение, производятся и поставляются рядом отечественных предприятий и организаций. К числу основных отечественных изготовителей следует отнести НИИ «Квант» совместно с ИПМ им. М.В.Келдыша (серия кластеров МВС 1000/32), а также НИИЦЭВТ. В настоящее время осуществлена поставка вычислительных кластеров в десятки различных отечественных научных и производственных организаций и предприятий. Помимо указанных отечественных PC-кластеров, имеющих, обычно, от 32 до 64 вычислительных узлов, следует упомянуть мощный отечественный суперкомпьютер кластерного типа МВС-1000М, расположенный в Межведомственном суперкомпьютерном центре РФ. Данный кластер коллективного пользования содержит 768 процессоров «Alpha» и предназначен для решения наиболее трудоемких в вычислительном отношении задач.

Основываясь на данной передовой компьютерной технологии специалистами ОАО ЦГЭ и ИПМ им. М.В.Келдыша совместно был разработан и реализован комплекс программ 3-D глубинной сейсмической миграции до суммирования, работа которого была опробована как на PC-кластерах, так и на 768-процессорном кластере МВС-1000М для решения конкретных задач опытно-методической и производственной обработки. Касаясь внутренней структуры созданного программного комплекса, можно выделить в нем несколько важных сравнительно автономных частей. Сервисная часть комплекса, включающая средства транспорта, сортировки и хранения данных, предназначена для подготовки входных сейсмических данных к последующему счету, а также для оформления окончательных результатов в стандартном представлении. Основная счетная часть комплекса содержит две компоненты: блок расчета полей времен внутри модели неоднородной среды для заданных положений источников и приемников, и блок вычисления поверхностных (двойных) интегралов вдоль поверхностных годографов дифрагированных волн. Обе указанные вычислительные задачи в силу весьма большого объема требуемых вычислений и необходимой точности потребовали разработки специальных оптимизированных методик. Так для расчета полей времен в неоднородных средах произвольной сложности был специально разработан и реализован высокоэкономичный сеточный метод решения уравнения эйконала второго порядка точности. Данный метод позволяет в произвольных неоднородных изотропных средах получать кратчайшие времена пробега волн во внутренних точках среды с точностью 1-2 мс на сетке  $100 \times 100 \times 100 \text{ м}^3$ , или 0,1-0,2 мс на сетке  $50 \times 50 \times 50 \text{ м}^3$ . Разработанная и реализованная экономичная схема интегрирования позволила сократить объем необходимых расчетов в 5-10 раз без существенной потери точности решения. Характеризуя общее время прохождения заданий на конкретных проектах, следует указать, что в силу ряда особенностей миграция результатов морских сейсморазведочных работ требует, как правило, значительно больших затрат времени и ресурсов вычислительных средств в сравнении с миграцией данных сухопутных наблюдений. Это связано с несколькими причинами. Первая причина – значительная величина площади морских сейсморазведочных работ, которая может достигать многих сотен квадратных километров, а также традиционно большая кратность перекрытий,

достигающая значений 60-80. Объем получаемых при этом исходных данных может достигать 1 Тбт и более. Другая важная причина состоит в существенно большей плотности физических наблюдений и связанной с этим проблемой расчета и хранения полей времен. Характеризуя техническую сложность последней проблемы можно указать, что объем требующей хранения информации для полей времен может существенно превышать общий объем исходных сейсмических данных. Поскольку каждый вычислительный узел имеет относящиеся к нему ресурсы локальной дисковой памяти объема порядка 100 Гбт, хранение указанной информации не встречает принципиальных затруднений. От программы миграции требуется при этом минимизировать общее число перекрестных обращений между отдельными узлами, которые могут существенно снизить общую скорость вычислений. В разработанной версии программы данная проблема была успешно решена.

С точки зрения планирования параллельных вычислений имеются две дополняющих друг друга основные возможности. Первая - наиболее очевидная, - состоит в распараллеливании вычислений по данным. Примером ее может служить расщепление исходных сейсмических данных на известное число независимых совокупностей - кубов равных удалений, каждый из которых может быть мигрирован независимо от остальных. Вторая возможность состоит в распараллеливании вычислений внутри одной независимой совокупности сейсмических данных. Объединение этих двух возможностей приводит к высокоэффективному использованию многих сотен процессоров.

### **Пример результатов 3-D глубинной миграции до суммирования реальных данных.**

Для демонстрации созданного математического обеспечения приведены примеры результатов 3-D глубинной сейсмической миграции до суммирования данных, полученных при наблюдениях с 60-кратным перекрытием в одном из районов шельфа Вьетнама. В опытно-методических целях был рассчитан куб изображения среды до глубины 6 км на площади около 100 км<sup>2</sup>. При расчетах были использованы 400 процессоров «Alpha» кластера МВС-1000М. Расчеты на сетке с параметрами 25x25 м<sup>2</sup> (вдоль поверхности наблюдений) и 5 м (по глубине) заняли около 2 суток. На рис. А приведен характерный вертикальный разрез полученного по результатам миграции суммарного куба. Для сравнения на рис. В приведен аналогичный результат, полученный с помощью западного математического обеспечения.

### **Выводы.**

В настоящее время открывается реальная возможность широкого оснащения обрабатывающих вычислительных центров современными компактными РС-кластерами, содержащими от 32 до 64 процессоров, мощности которых достаточно для глубинной миграционной обработки до суммирования значительных объемов 3-D сейсмических данных. Можно ожидать, что в ближайшем будущем 3-D глубинная сейсмическая миграция до суммирования станет рутинной обработкой и войдет в число процедур базового графа. Растущая потребность в результатах глубинной миграции до суммирования требует развития и усовершенствования методов построения опорной глубинно-скоростной модели исследуемой среды, необходимой для выполнения миграции.

### **Благодарности.**

Авторы выражают искреннюю благодарность всем коллегам и сотрудникам, участвовавшим в обсуждении проекта, его непосредственной реализации, а также оценке полученных результатов. Особую признательность хотелось бы выразить генеральному директору ОАО ЦГЭ доктору тех. наук А.С.Кашику, осуществлявшему постоянную поддержку данной разработки; доктору тех. наук А.Г.Авербуху (ЦГЭ), постоянно участвовавшему в обсуждении и анализе результатов на всех стадиях проекта; зам. директора ИПМ им. М.В.Келдыша член-корр. РАН А.В.Забродину и гл. инженеру Ю.П.Смольянову (ИПМ) – за их большую помощь в организации вычислений; а также Б.П.Морозу, выполнившему большой объем работы по программированию сервисной части комплекса, подготовке исходных данных к счету и представлению его окончательных результатов.

