

РАЗРАБОТКА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ INMOST

Василевский Юрий Викторович, Коньшин Игорь Николаевич, Никитин Кирилл
Дмитриевич, Терехов Кирилл Михайлович

ИВМ РАН, Москва

Современные задачи математического моделирования требуют использования одновременно и более качественной аппроксимации, и высокопроизводительных параллельных вычислительных комплексов для проведения расчетов. Создание комплексов программ, которые могут выполнять расчеты на таких параллельных компьютерах является достаточно сложной и очень трудоемкой задачей. При переходе от последовательных программ к параллельным требуется не только добавить в последовательную программу обмена данных между процессорами, но и значительно перестроить всю структуру используемых данных. Для помощи разработчикам в распараллеливании их программ математического моделирования была разработана программная платформа INMOST [4], являющаяся основой для всех этапов параллельного расчета: построения сеток, аппроксимации физической задачи на построенных сетках, а также для решения систем линейных уравнений, получающихся в результате этой аппроксимации.

В настоящее время существуют программные решения, частично приспособленные для этих же целей, как например, библиотеки FMDB и MOAB, сеточные библиотеки MSTK и STK, пакеты Salome и OpenFOAM. Однако ни одно из рассмотренных программных средств не оказалось полностью удовлетворительным. Лучшие особенности этих пакетов были реализованы в разработанной программной платформе INMOST, предназначенной для разработки параллельных численных моделей на сетках общего вида. В настоящее время программная платформа INMOST находится в открытом доступе [5]. Программная платформа INMOST представляет собой библиотеку программ на языке C++, использующую MPI для организации межпроцессорных обменов. Простота и удобство ее использования сочетается с гибкостью и универсальностью, а также надежностью и эффективностью.

В основе программной платформы лежит базовое ядро для работы с сетками, представляющее собой специальную сеточную базу данных. В докладе обсуждаются основные принципы работы сеточных баз данных в последовательном и в параллельном режимах работы. Вводится понятие базовых сеточных элементов: узел (или вершина), ребро, грань, ячейка. Рассматриваются как элементы общего вида, так и некоторые виды ячеек специального геометрического типа (тетраэдр, гексаэдр и т.д.). Описываются функции для работы с сеточными данными, включая ярлыки, атрибуты объектов и сами физические величины. Для удобства работы с множествами применяются различные виды итераторов. Приводятся наборы функций, необходимых для работы с сетками, а также обсуждаются алгоритмы их эффективной реализации. Представлен механизм работы с распределенными по процессорам сеточными данными. Обсуждаются особенности работы с собственными и фиктивными ячейками. Приводится минимальный набор функций, достаточный для выполнения всех необходимых базовых операций для работы с распределенными сетками.

Главной задачей описываемой программной платформы INMOST является обеспечение пользователя всеми необходимыми средствами для создания и исследования различных моделей дискретизации. Сюда входит не только работа с сеточными данными, но и удобный интерфейс для формирования систем линейных уравнений, а также дальнейшего их решения, как с помощью внутренних параллельных линейных решателей (например, на основе аддитивного метода Шварца с перекрытиями ASM и треугольного разложения второго порядка LU2), так и общедоступных пакетов линейной алгебры (Trilinos, PETSc и др.) эффективно работающих на современных параллельных вычислительных системах.

В рамках программной платформы INMOST реализованы несколько схем дискретизации операторов диффузии и переноса. Адекватный выбор методов дискретизации базовых дифференциальных операторов является залогом эффективного решения задач геофильтрации и геомиграции, а также моделирования многофазных течений в пористой среде.

Исходя из требования на консервативность, т.е. сохранение массы вещества на ячейках сетки, которое предъявляется к методам дискретизации, мы делаем основной упор на методы конечных объемов (МКО). МКО позволяют в явном виде вычислять фильтрационные потоки через грани сетки, что важно при сопряжении задач фильтрации и переноса. При дискретизации уравнений во времени оператор диффузии должен быть аппроксимирован неявно, чтобы избежать недопустимых ограничений на шаг по времени. Для оператора переноса рассматриваются как неявная, так и явная дискретизации. При необходимости четкого отслеживания фронта загрязнения ограничение на шаг по времени, накладываемое явной схемой (определяется числом Куранта), становится естественным, и явная схема выигрывает в эффективности.

Для пространственной дискретизации оператора переноса используются МКО с кусочно-линейным восполнением концентрации на ячейках сетки для вычисления конвективного потока [2]. Это должно обеспечить второй порядок точности по пространству и низкую численную диффузию. Для дискретизации оператора диффузии мы использовали различные варианты МКО: нелинейную монотонную схему [1, 2], линейную O-схему [3], а также наиболее простую традиционную двухточечную схему дискретизации.

Наиболее перспективным и активно развиваемым из предлагаемых методов является монотонный нелинейный метод конечных объемов. Метод обладает рядом важных свойств. Во-первых, метод обладает свойством монотонности в том смысле, что сохраняет неотрицательность дискретного решения, либо удовлетворяет дискретному принципу максимума (в зависимости от реализации). Во-вторых, как и в традиционной линейной схеме, шаблон дискретизации потока позволяет получать предельно компактный шаблон диффузионного оператора. В-третьих, в отличие от линейной двухточечной схемы, нелинейная схема точна на линейных решениях при любых тензорах диффузии и расчетных сетках с многогранными ячейками произвольной формы. Таким образом, нелинейная схема позволяет получать качественное решение с высокой точностью для широкого круга задач, сохраняя при этом максимально компактный шаблон. Стоит отметить, что использование монотонной нелинейной схемы при создании численной модели многофазной фильтрации в пористой среде заметно повышает качество получаемых решений по сравнению с традиционной двухточечной схемой, обладая при этом относительно невысокой вычислительной сложностью.

Данная работа является логическим продолжением работы [6], где основное внимание было уделено проблемам дискретизации. Стоит также отметить, что основные принципы

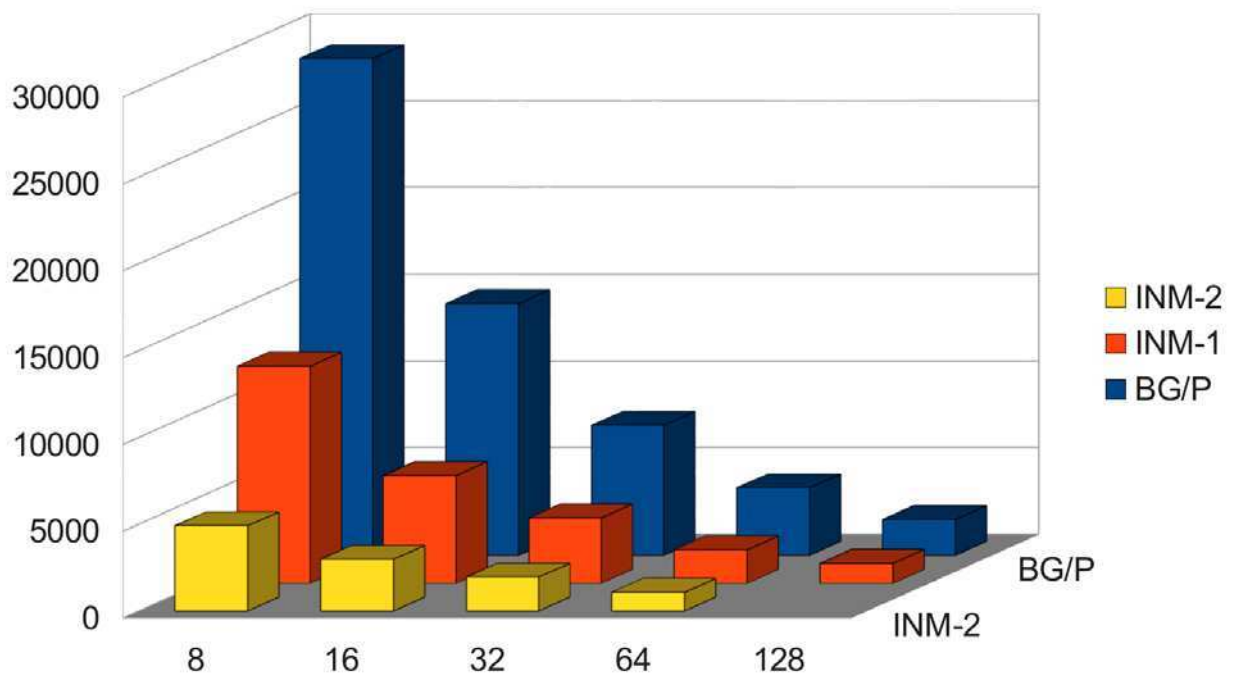
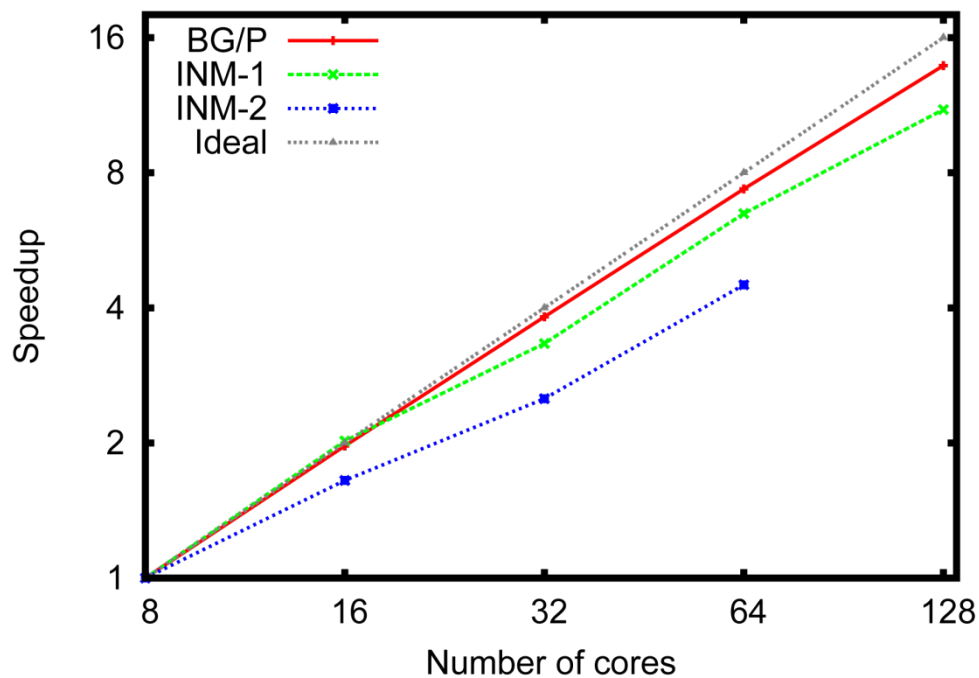
работы программной платформы аналогичны используемым в работе [7], что показывает их применимость не только к задачам многофазной фильтрации, но и для задач геофильтрации и геомиграции.

Для проведения численных экспериментов был использован параллельный сеточный генератор, написанный с использованием той же параллельной сеточной структуры данных INMOST. На первом этапе расчетная область разбивалась на подобласти, которые распределялись на имеющиеся процессоры. На втором этапе на каждом вычислительном ядре строилась локальная сетка внутри подобласти и происходил обмен данными о соседних ячейках. Вследствие компактности шаблона дискретного оператора использовался только один слой ячеек перекрытия. Общая размерность составляла $128 \times 128 \times 16$ ячеек, что соответствовало 304 192 неизвестным (ячейки и приграничные элементы).

Расчеты проводились на вычислительной системе BlueGene/P суперкомпьютерного центра МГУ и на двух сегментах кластера ИВМ РАН:

- Система BG/P, состоящая из относительно медленных вычислительных ядер PowerPC 450 (850 MHz) с 2 ГБ RAM.
- Первый сегмент кластера ИВМ (INM-1), состоящий из вычислительных узлов с двумя 4-х ядерными процессорами Intel Xeon X5355 (2.66 GHz) или процессорами Intel Xeon E5462 (2.80 GHz) с 8 ГБ RAM на узел.
- Второй сегмент кластера ИВМ (INM-2), состоящий из вычислительных узлов с двумя 6-и ядерными процессорами Intel Xeon X5650 (2.67 GHz) с 24 ГБ RAM на узел.

Линейные системы решались с помощью общедоступного пакета PETSc. Применялся итерационный метод BiCGStab с использованием переобуславливания по методу Шварца с перекрытиями AS(1) и неполного разложения ILU0 в подобластях. Полученные значения ускорения расчета приведены на рисунках. Максимальное ускорение на 128 ядрах относительно расчета на 8 ядрах составило 13.86 на компьютере BG/P и 11.06 на кластере INM-1.



1. Danilov A., Vassilevski Yu. A monotone nonlinear finite volume method for diffusion equations on conformal polyhedral meshes // RJNAMM – 2009. – Vol.24, no.3. – Pp.207-227.

2. Nikitin K., Vassilevski Yu. A monotone nonlinear finite volume method for advection–diffusion equations on unstructured polyhedral meshes in 3D // RJNAMM – 2010. – Vol.25, no.4. – Pp.335-358.

3. Aavatsmark I., Barkve T., Boe O., Mannseth T. Discretization on unstructured grids for inhomogeneous, anizotropic media. part I: Derivation of the methods // SIAM. J. Sci. Comput. - 1998. - Vol. 19, no. 5. - Pp. 1700–1716.

4. Ю.В.Василевский, И.Н.Коньшин, Г.В.Копытов, К.М.Терехов. INMOST – программная платформа и графическая среда для разработки параллельных численных моделей на

сетках общего вида. - М. Изд-во Московского ун-та, серия Суперкомпьютерное образование, 2013, 144 стр.

5. INMOST. <https://github.com/INM-RAS/INMOST>

6. Никитин К. Д., Программная платформа для разработки параллельных численных моделей многофазной фильтрации на сетках общего вида. III научно-практическая конференция: Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. - М., Суперкомпьютерный центр МГУ имени М.В.Ломоносова. 28-30 ноября 2012 г.

7. Капырин И. В., Программный комплекс GeRa для геофильтрационного и геомиграционного моделирования. IV научно-практическая конференция: Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение. - М., Суперкомпьютерный центр МГУ имени М.В.Ломоносова. 14-15 ноября 2013 г.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИМУЛЯТОРА MUFITS

Афанасьев Андрей Александрович

НИИ механики МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва

Гидродинамический симулятор MUFITS [1] – некоммерческий комплекс программ, предназначенный для параллельного моделирования многофазных фильтрационных течений на суперкомпьютерных системах. К настоящему моменту времени симулятор использовался при решении неизоэнтальпических фильтрационных задач, связанных с получением геотермальной энергии и при моделировании подземного захоронения углекислого газа [2, 3]. В настоящей работе приводятся результаты дальнейшего развития комплекса программ для задач, связанных с разработкой углеводородных месторождений. Симулятор может использоваться как в классических гидродинамических расчётах, основанных на расширенной модели Чёрной нефти, так и в более сложном моделировании газоконденсатных месторождений.

В докладе приводится краткое описание внутренней структуры – логической модели - месторождений в симуляторе MUFITS. Гидродинамические модели представляются в виде логически связанного набора примитивов: блоков и граней ячеек сетки, сегментов скважин и трубопроводов, перфораций, компрессоров и т.д. В симуляторе данные примитивы связаны в 3D граф, который конструируется на основе загруженных сеток и данных о расположении скважин и интервалах перфораций. Управление отдельной скважиной на различных режимах эксплуатации (заданный дебит; фиксированное забойное давление) осуществляется с помощью компрессора, который является составным логическим элементом, моделирующим скважину. В расчётах вертикальные скважины логически представляются в виде сегмента скважины (трубы), соединённого компрессором с поверхностным резервуаром, однако возможны и более сложные ситуации с несколькими сегментами скважин. Все интервалы перфораций логически соединены с сегментом скважины.

Данное логическое представление гидродинамических моделей может использоваться с различными PVT-модулями для расчёта теплофизических свойств пластовых флюидов, в частности с модулем Black-oil, предназначенным для классического моделирования месторождений нефти и газа в рамках модели Чёрной нефти.