

Оптимизация многосеточного метода на GPU для моделирования течений в трещинах гидроразрыва

Н.В. Мутовкин^{1,2}, И.Л. Софронов^{1,2}, Л.Е. Довгилевич¹

¹Московский научно-исследовательский центр Шлюмберже, Москва

²Московский Физико-Технический Институт, Москва

Задача построения быстрого алгоритма на основе многосеточного метода возникает при моделировании многофазного течения жидкости в трещине гидроразрыва. Такое течение может быть описано с помощью системы уравнения переноса и двумерного нелинейного эллиптического уравнения для давления с сильно неоднородными разрывными коэффициентами [1]. Решение эллиптического уравнения может занимать до 99% общего времени счета.

Нами было рассмотрено несколько подходов решения уравнения для давления с целью поиска наиболее эффективного. Среди них – итерационный метод Ричардсона, метод Ньютона и градиентные методы: несколько вариантов метода градиентного спуска с предобуславливателем и метод сопряженных градиентов с предобуславливателем. Ключевым элементом при решении линеаризованной задачи для давления в методах Ричардсона и Ньютона и при проведении предобуславливания в градиентных методах является многосеточный метод, идея которого была предложена в [2]. Мы используем вариант многосеточного метода, рассмотренный в [3, 4]. В этом алгоритме процесс сглаживания производится при помощи метода IBLU вместо часто используемых методов Якоби или Гаусса-Зейделя. Для рассматриваемого класса задач он приводит к существенному сокращению времени счета при реализации на CPU.

Как известно, реализация многосеточного метода на GPU может сопровождаться серьезной потерей желаемой производительности в силу определенных трудностей параллелизации расчетов на грубых сетках. В нашем случае, ситуация усугубляется еще и последовательной природой алгоритма IBLU, основанного на методе прогонки. Поэтому, при переносе многосеточного метода на GPU мы рассмотрели гибридный алгоритм. Согласно этому подходу на верхних уровнях метода (мелкие сетки, обрабатываемые на GPU) в качестве сглаживателя используются несколько итераций легко параллелизуемого метода Якоби, а на грубых сетках, обрабатываемых на CPU, используется исходная последовательная версия алгоритма со сглаживателем на основе IBLU. Схема алгоритма приведена на Рис. 1. Матрицы всех операторов, участвующих в циклах многосеточного метода, вычисляются заранее и копируются в нужный момент в память GPU.

Для оценки эффективности предложенного подхода были проведены расчеты на видеокарте Tesla K40c как с двойной, так и одинарной точностью. Сравнение проводилось с исходной CPU версией алгоритма. На Рис. 2 приведены ускорения для гибридной версии алгоритма по сравнению с CPU версией для трех сеток. Можно видеть, что выигрыш достигает от 4-х до 10-ти раз и растет с ростом числа узлов сетки. Основной причиной такого роста является то, что переход от CPU к GPU происходит, начиная с сетки 129^2 .

Также в докладе приводятся результаты по анализу различных подходов решения нелинейной задачи для давления с использованием графических процессоров при реализации многосеточного метода для линеаризованной задачи и предобуславливания. Использование GPU позволяет ускорить расчет численного решения нелинейной задачи. Наибольшее ускорение в 2.5 раза по сравнению с CPU версией соответствующего алгоритма достигается для метода Ричардсона, где требуется наибольший объем работы многосеточного метода. Однако, общее минимальное время счета обеспечивают гибридные версии алгоритмов градиентных методов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ, проект 15-11-00015.

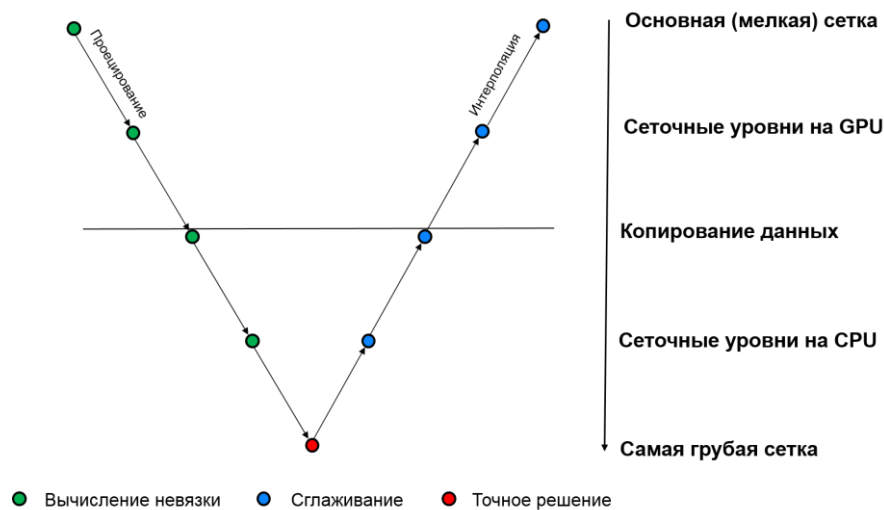


Рис. 1 Схема гибридного алгоритма многосеточного метода

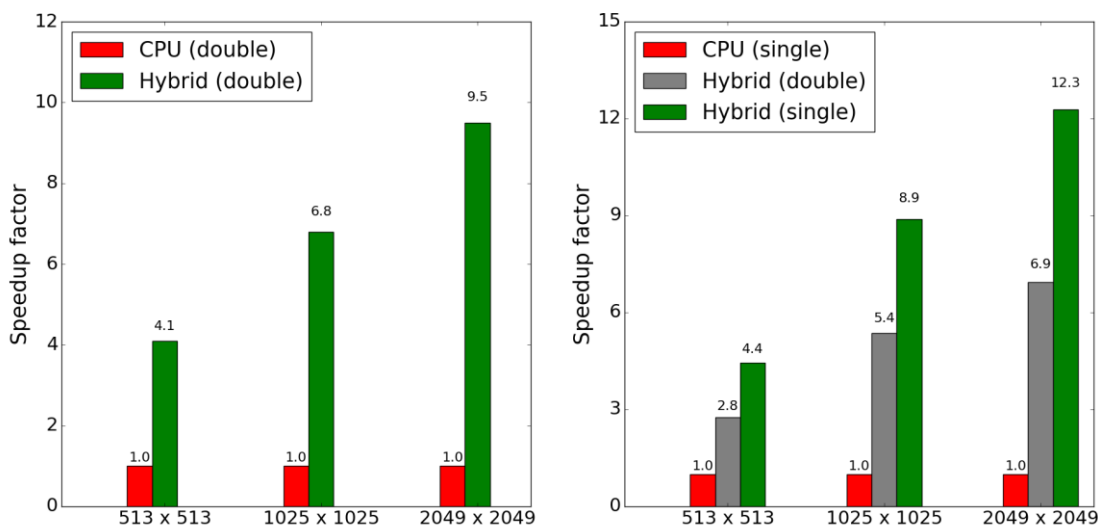


Рис. 2 Ускорения гибридного алгоритма с двойной (слева) и одинарной точностью (справа) по сравнению с CPU на сетках 513^2 , 1025^2 и 2049^2 узлов

Литература

1. Боронин С.А., Осипцов А.А. Влияние миграции частиц на течение суспензии в трещине гидроразрыва // Механика жидкости и газа, № 2, 2014. С. 80-94.
2. Федоренко Р.П. Релаксационный метод решения разностных эллиптических уравнений // ЖВМ и МФ, Т. 1, № 5, 1961. С. 922-927.
3. De Zeeuw P.M. Matrix-dependent prolongations and restrictions in a blackbox // Journal of Computational and Applied Mathematics, No. 33, 1990. pp. 1-27.
4. De Zeeuw P.M. Incomplete Line ILU as Smoother and Preconditioner // Notes on numerical fluid mechanics, No. 41, 1993. pp. 215-215.