

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕШЕНИЯ МНОГОМАСШТАБНЫХ СОПРЯЖЕННЫХ ЗАДАЧ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ НА ЛАД-СЕТКАХ

В.С. Никитин

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г.Москва

zogorlol@gmail.com

Доклад посвящен разработанному докладчиком трехмерному параллельному программному комплексу, способному эффективно решать широкий класс задач газовой динамики. В этот класс входят нестационарные многомасштабные задачи обтекания подвижных твердых тел. Движение тел может быть как вынужденным, так и свободным, то есть вызванным взаимодействием со сплошной средой. Для эффективного решения таких задач необходимы адаптивные расчетные сетки, которые будут автоматически перестраиваться под решение на текущем временном шаге в процессе счета. Ручные и полуавтоматические методы создания сеток требуют априорную информацию о динамике задачи и затрат человеческих ресурсов. Так же ключевой является эффективная параллелизация программного комплекса, так как в трехмерном случае даже при использовании подходящих сеток увеличение точности расчета в 2 раза требует увеличения затрат вычислительных ресурсов приблизительно в 8 раз.

Для выполнения этих требований в представленном программном комплексе используется комбинация методов, эффективно работающих друг с другом. В первую очередь это локально-адаптивные декартовы сетки, для работы с которыми используется библиотека `r4est` [1]. Библиотека отвечает за модификацию сетки, декомпозицию областей и балансировку ячеек для распределения нагрузок между процессами, построение и синхронизацию «призрачных слоев» из ячеек, хранящихся на других процессах, но необходимых в вычислениях на текущем процессе. Для параллелизации библиотека `r4est` и данный программный комплекс использует стандарт MPI для распределенных вычислений. Отдельно стоит упомянуть реализованный в библиотеке алгоритм сглаживания сетки [2], который следит, чтобы соседние ячейки отличались не более чем на 1 уровень разбиения.

Для работы с твердыми телами используется метод свободной границы [3,4]. В данном методе уравнения Эйлера газовой динамики, которыми в данный момент ограничен программный комплекс, заменяются эквивалентной постановкой, в которой задача решается без внутренних граничных условий, а их влияние учитывается с помощью компенсационных потоков, вводимых в правые части уравнений. В численной реализации метода в ячейках считалась доля объема, занимаемого газом, от общего объема ячейки. На основании этих долей ячейки делились на полностью газовые, полностью твердые и пересекаемые поверхностью твердого тела. Расчеты в «твердых» ячейках были фиктивными и были нужны для построения гладкого продолжения решения,

которое использовалось в качестве начальных данных, в случае если на следующем шаге по времени в некоторых ячейках появится доля газа. Результатом многочисленных экспериментов с этим методом является его модификация автором доклада. В качестве начальных данных для ячеек, переставших быть фиктивными, используется аналитическое решение задачи о движении поршня, а в «твердых» ячейках никаких вычислений более не проводится. Для модифицированного метода выполняется условие галилеевой инвариантности, отсутствовавшее в многомерном случае для классического метода свободной границы.

Для динамической адаптации локально-адаптивной сетки к решению используется разработанный автором метод локальной вейвлетной адаптации на основе неравномерных В-сплайн вейвлетов [5]. В нем вейвлетный анализ каждой ячейки проводится независимо от других ячеек, и используются квазимногомерный подход, позволяющий отказаться от громоздких конструкций, связанных с тензорными произведениями. Вместо этого анализ проводится отдельно по каждой из осей, а затем совмещается. Это позволяет не тратить больших вычислительных затрат на адаптацию и не портит масштабируемость.

Возможности программного комплекса, в котором реализованы перечисленные методы, продемонстрированы на некоторых задачах со свободно движущимися телами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 075-15-2019-1623.

Список литературы:

1. Burstedde C., Wilcox L.C., Ghattas O. p4est: Scalable Algorithms for Parallel Adaptive Mesh Refinement on Forests of Octrees // *SIAM Journal on Scientific Computing*. 2011. V. 33. No. 3. P. 1103–1133.
2. Isaac T., Burstedde C., Ghattas O. Low-Cost Parallel Algorithms for 2:1 Octree Balance // *Proceedings of the 26th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium*. 2012.
3. Меньшов И.С., Корнев М.А. Метод свободной границы для численного решения уравнений газовой динамики в областях с изменяющейся геометрией // *Математическое моделирование*. 2014. Т. 26. № 5. С. 99–112.
4. Меньшов И.С., Павлухин П.В. Эффективный параллельный метод сквозного счета задач аэродинамики на несвязных декартовых сетках // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2016. Т. 56. № 9. С. 1677–1691.
5. Afendikov A.L., Nikitin V.S. Local Wavelet Adaptation of Cartesian Grids in Computational Fluid Dynamic // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2024. V. 64. P. 300–313. <https://doi.org/10.1134/S0965542524020027>.