Основные принципы параллельной реализации общей математической модели лесных пожаров

Н.В. Барановский

Разработаны основные принципы параллельной реализации общей математической модели лесных пожаров для моделирования процессов возникновения, развития и распространения лесных пожаров с учетом физико-химических процессов. Изложены подходы параллельной реализации и предложены схемы декомпозиции области решения для двумерных случаев. Предложено использовать крупнозернистые методы распараллеливания в SPMD-модели вычислений. Статья открывает цикл публикаций по созданию комплексной системы прогноза распространения низовых и верховых пожаров.

1. Введение

Лесной пожар представляет собой сложное нестационарное физико-химическое явление [1-3] и не вызывает сомнений актуальность всестороннего теоретико-экспериментального исследования данного явления. Однако следует заметить, что изучение лесных пожаров экспериментально в натурных условиях сопряжено с очень большими трудностями и на передний план выходит математическое моделирование данного явления [1-4].

В работе [5] предлагается новый алгоритм моделирования катастроф, в рамках которого оценивается вероятность катастрофы, время индукции катастрофы t^* и время ее прогноза t_{pr} на ЭВМ. В том случае, если $t_{pr} > t^*$ математическую модель следует заменить на экспертную систему [5]. Но в любом случае необходимо проводить математическое моделирование лесных пожаров, так как база знаний конкретной экспертной системы должна быть наполнена информацией, которая может быть получена в результате многовариантных по входным данным и параметрам задачи численных расчетов. Для прогноза времени опасного воздействия лесного пожара на объект (например, населенный пункт) надо оценить период индукции катастрофы t^* - время распространения фронта лесного пожара от очага возникновения лесного пожара до интересующего нас объекта. Данный параметр может быть определен в результате численного решения задачи о распространении лесного пожара и необходимо, чтобы время численного решения задачи о распространении лесного пожара t_{pr} было значительно меньше t^* [5].

При решении этих задач возникают проблемы большой вычислительной нагрузки и большого объема обрабатываемых данных. Необходимо применять многопроцессорные вычислительные системы (МВС) [6] и необходима разработка соответствующих принципов распараллеливания общей математической модели лесных пожаров, оценка времени выполнения, ускорения и эффективности работы параллельных программ. Следует ориентироваться на решение задачи в рамках крупнозернистого параллелизма [7].

Цель настоящей работы - разработать основные принципы параллельной реализации на МВС комплексной математической модели лесных пожаров (процессов возникновения, развития и распространения) с учетом физико-химических процессов.

2. Общая математическая модель лесного пожара

В работах [1-5] рассматриваются различные математические модели разных катастроф, в том числе лесных пожаров. Общая математическая модель лесных пожаров, отражающая современное состояние в данной области представлена в [4], где дается уточненная по сравнению с [1-3] схема физико-химических процессов в зоне лесного пожара и в приземном слое атмосферы и замкнутая система уравнений для математического моделирования. Лес в данной модели рассматривается как многофазная многоярусная пористо-дисперсная, пространственно-неоднородная среда [4].

В основной системе уравнений представлены закон сохранения массы газодисперсной фазы; закон сохранения количества движения газодисперсной фазы в проекциях на оси декартовой системы координат; закон сохранения энергии в газодисперсном потоке; закон сохранения и изменения массы отдельных компонентов в газодисперсном потоке; закон сохранения энергии в конденсированной фазе; уравнения кинетики пиролиза и сушки ЛГМ; уравнения баланса массы коксика и пепла и ряд других соотношений [4].

Общая математическая модель лесных пожаров [4] позволяет разработать согласованные с ней частные модели для расчета сушки слоя лесных горючих материалов (ЛГМ) для прогноза вероятности возникновения лесных пожаров, расчета зажигания слоя ЛГМ, для прогноза возникновения очагов лесных пожаров, распространения лесных пожаров и расчета выбросов поллютантов для оценки экологических последствий лесных пожаров.

3. Основные принципы параллельной реализации общей математической модели на МВС

3.1 Общие замечания

Отметим, что настоящая работа представляет собой комплексный анализ проблемы и направлена на разработку новых принципов и подходов (так как данный этап имеет очень важное стратегическое значение при разработке параллельных программ), а также методологии распараллеливания задач теории лесных пожаров для качественного повышения уровня фундаментальных и прикладных исследований в области математического моделирования задач теории лесных пожаров.

Проблемы численной реализации рассматриваемых задач теории лесных пожаров связаны с обеспечением точности и устойчивости решений систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. С одной стороны, это требует уменьшения размеров шагов дискретизации и увеличения разрядности, что в свою очередь усложняет алгоритм и требует больших вычислительных ресурсов и, как следствие, распараллеливания вычислительных операций. С другой стороны, применяются неявные численные методы, что в свою очередь затрудняет распараллеливание.

3.2 Физико-математическая декомпозиция задачи по составляющим подпроцессам

Одним из подходов является декомпозиция исследуемого сложного физического явления лесного пожара по составляющим его подпроцессам, и соответственно разбиение алгоритма решения полной задачи на ряд алгоритмов для решения составляющих подзадач. Физическая декомпозиция может быть применена для решения задачи моделирования сложного лесного пожара, когда задача решается в сопряженной постановке. Примерами таких задач может служить сложный верховой пожар, когда снизу идет его подпитка низовым лесным пожаром, а в верху осуществляется сопряженный тепло- и массообмен с приземным слоем атмосферы. Кроме того, в каждом отдельном блоке может использоваться более глубокий уровень распараллеливания уже каждого отдельно взятого подпроцесса, отвечающего какому-либо физико-математическому процессу.

3.3 Геометрическая декомпозиция области решения

Вторым подходом к организации распараллеливания задач теории лесных пожаров является метод геометрической декомпозиции области решения задачи. Это позволяет существенно снизить временные затраты на получение результата, а так же решить проблему с разделением и рассылкой всего объема данных на различные узлы МВС. Данный вид декомпозиции заключается в разделение всей области интегрирования на ряд подобластей и одновременном расчете в каждой такой подобласти с последующей сшивкой решений.

Однако при геометрической декомпозиции возникает целый ряд проблем. Очень важным фактом является то, что геометрическая декомпозиция существенно зависит от математической постановки задачи, вида систем уравнений, используемых численных методов. Наиболее полный перечень требований представлен в работах [8,9]. Отметим, что ключевым моментом является однородность математической модели, однородность постановки задачи, однородность алгоритма, однородность информационной среды. В большинстве случаев этим требованиям отвечают явные разностные схемы, в особенности одношаговые, с коротким вычислительным шаблоном [10]. Проблема состоит в том, что при математическом моделирование лесных пожаров используются неявные численные методы, а также очень часто не выполняются ряд требований однородности [8,9].

В общем случае лесной пожар представляет собой трехмерный объект, однако для понимания сути физического явления, а также принятия конкретных решений по результатам математического моделирования достаточно иметь представления о его распространении, рассмотрев два частных 2D-случая: распространение в пространственно однородном по координате *y* лесном массиве в плоскости *Oxz*, а также в плоскости *Oxy*, когда по координате *z* проводится осреднение.

1) 2D-случай в плоскости *Oxz*. Предполагается, что ось *x* связана с направлением ветра, тогда имеется преобладание распространения фронта лесного пожара в данном направление и может быть применена следующая геометрическая декомпозиция - в плоскости *Oxz* параллельно направлению ветра разрежем лесной массив по высоте древостоя на одинаковые по толщине полоски и в каждой такой полосе организуем свой вычислительный процесс (следует заметить, что в общем случае толщина полос может быть и неодинаковой, так как разные ярусы леса могут иметь различные толщины [1-3]). Однако следует заметить, что распространение фронта лесного пожара по каждой из полос вносит влияние на процесс распространения фронта на соседних полосах и это необходимо учитывать при организации параллельного процесса по всем полосам. Данные в процессорных узлах МВС необходимо расположить с перекрытием полос и на каждом шаге организовать обмен информационными пакетами, содержащими информацию о параметрах среды на гранях [11,12]. Схема декомпозиции области решения представлена на рисунке 1.

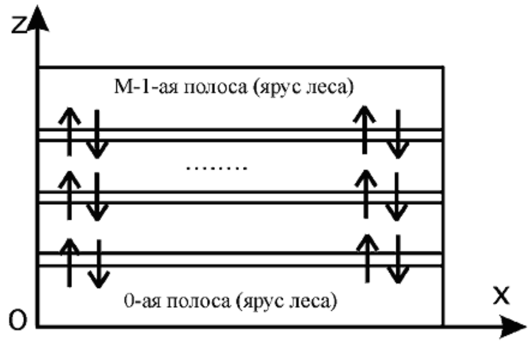

Рис.1 Декомпозиция области решения и схема межпроцессорных обменов при параллельной реализации: 2D-случай в плоскости Oxz

2) 2D-случай в плоскости *Oxy*. В целом распараллеливание производится аналогичным образом вышеописанному случаю. В плоскости *Oxy* параллельно направлению ветра лесной массив разрезается на одинаковые по ширине полоски и в каждой такой полосе организуем свой вычислительный процесс. Остаются справедливы положения о направлении ветра, учете взаимного влияния полос, организации итерационного процесса и передаче информационных пакетов.

3.4 Конвейерный алгоритм распараллеливания

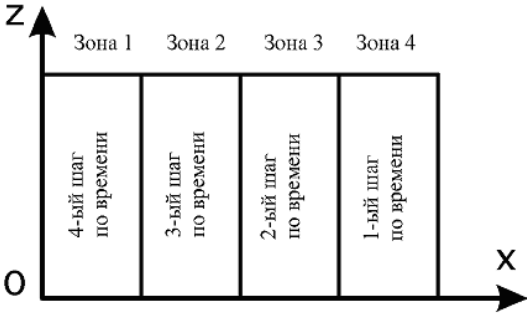

Рис. 2 Конвейерный алгоритм

В случае преобладания распространения фронта лесного пожара в каком-либо направлении возможен еще один способ геометрической декомпозиции. Разделение области ведется крупными полосами, перпендикулярными направлению движения фронта лесного пожара. Например, могут быть естественным образом выделены участки леса, соответствующие различным типам леса, дорогам, просекам, зонам лесного массива, по которым фронт лесного пожара еще не прошел. Кроме того, сам фронт лесного пожара имеет сложную структуру, в которой могут быть выделены зоны нагрева, сушки и пиролиза ЛГМ, горения газообразных и догорания конденсированных продуктов пиролиза ЛГМ [1-3]. В этом случае на первом этапе вычислений рассчитывается решение на первом временном шаге в зоне 1, на втором этапе рассчитывается решение на втором временном шаге в зоне 1 и на первом в зоне 2, и т.д. То есть выполняется конвейерный вариант расчета. На рисунке 2 представлена, например, декомпозиция области решения при конвейерной параллельной реализации для области Oxz (Четвертый этап для случая, когда МВС содержит 4 процессора. В реальной ситуации число задействованных процессоров может быть больше). Ступени вычислительного конвейера могут быть построены таким образом, что каждая ступень будет обладать своей вычислительной нагрузкой, либо конвейерные ступени будут равны по вычислительной нагрузки. Заметим, что не следует в таком случае выделять много геометрических зон, так как увеличится время простаивания процессоров МВС, которые не задействованы на первых и заключительных этапах вычислительного процесса. Данный алгоритм распараллеливания будет более эффективен на МВС с небольшим числом процессоров.

4. Оценки производительности параллельных программ

При разработке параллельных программ (в SPMD-модели вычислений) необходимо будет задействовать ряд функций из библиотеки MPI [13]. Для оптимального отображения структуры задачи на топологию МВС следует воспользоваться механизмом виртуальных топологий [13], что обеспечивает система MPI. Может быть произведена оценка общего времени, которое необходимо затратить на реализацию комплексного математического вычислительного эксперимента

$$T_M^{CE} \approx n_i \cdot n_e \cdot n_p \cdot n_l \cdot n_t \cdot n_0 \cdot T_M + T_M^{'} .$$

Множители, которые присутствуют в данной формуле, соответствуют следующим операциям [14]: 1) проведение n_i "внутренних" итераций для решения линейных подсистем в сеточных подобластях (полосах); 2) проведение n_e "внешних" итераций между подобластями (ярусы либо полосы лесного массива) для решения полной алгебраической системы в сеточной области решения; 3) проведение n_p итераций по различным физическим процессам (например, в нашем случае когда рассматривается распространение верхового лесного пожара по нескольким ярусам лесного массива, либо по однородным полосам лесного массива); 4) проведение n_l "нелинейных" итераций, так как свойства коэффициентов уравнений зависят от искомых функций процесса; 5) расчет n_t временных шагов; 6) реализация n_0 вариантов расчетов, которые соответствуют различным сценариям распространения верхового пожара (многовариантный расчет по входным данным и параметрам задачи); 7) множитель T_M - время реализации базового элемента вычислительного алгоритма на МВС, содержащей М процессоров.

Кроме того, перед выполнением расчета, как правило, необходимо разослать исходные данные по узлам вычислительной системы, а после выполнения необходимо собрать результаты с процессорных узлов. Время, которое необходимо на выполнение указанных действий, обозначено через T'_M. Если при распределении данных по узлам была использована некоторая эвристика, то на часть узлов попадут "лишние" данные [15], время обработки которых тоже присоединим к T'_M. Ускорение в свою очередь определяется по формуле

$$S_M^{CE} = T_0^{CE} / T_M^{CE} = M / (1 + \alpha_M^{CE}) ,$$

где T_0^{CE} - время последовательной реализации комплексного математического вычислительного эксперимента на однопроцессорной вычислительной технике, α_M^{CE} - потери на коммуникации и дополнительные итерации, M - число процессоров МВС. Эффективность определится как

$$E_M^{CE} = T_0^{CE} / (M \cdot T_M^{CE}) .$$

5. Выводы

Таким образом, в процессе исследования была решена важная научно-практическая задача – разработаны основные принципы параллельной реализации общей математической модели лесных пожаров с учетом физико-химических процессов на МВС.

Разработка параллельного программного комплекса моделирования лесного пожара на основе представленных в данной работе принципов и подходов к распараллеливанию приведет к существенному подъему уровня исследований и создаст условия для решения многих задач теории лесных пожаров, которые ранее не были решены в силу огромных требований вычислительных ресурсов и объемов оперативной памяти. Настоящая работа открывает перспективы создания комплекса параллельных программ для моделирования процессов возникновения, развития и распространения лесных пожаров на основе частных моделей, которые согласованы с общей математической моделью лесных пожаров.

Литература

1. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 407 С.
2. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. 218 С.
3. Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them. Russia, Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University, 1997. 390 P.
4. Гришин А.М. Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложения для охраны и защиты лесов // Сопряженные задачи механики и экологии: Избранные доклады международной конференции. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. С. 88–137.
5. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 122 С.
6. Корнеев В.В. Параллельные вычислительные системы. М.: Нолидж, 1998, 320 С.
7. Бандман О.Л. Мелкозернистый параллелизм в вычислительной технике // Программирование. 2001, № 4. С.5–20.
8. Ковеня В.М., Тарнавский Г.А., Черный С.Г. Применение метода расщепления в задачах аэродинамики. Новосибирск: Наука, 1990. 245 С.
9. Хмельнов Д.Е Улучшенные алгоритмы решения разностных и q-разностных уравнений // Программирование. № 2. С.70–78.
10. Тарнавский Г.А., Шпак С.И. Декомпозиция методов и распараллеливание алгоритмов решения задач аэродинамики и физической газовой динамики: вычислительная система "ПОТОК-3" // Программирование. 2000. № 6. С.45–57.
11. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Аддитивные схемы для задач математической физики. М.: Наука. 2001. 320 С.
12. Ngiamsoongnirn K., Juntasaro E., Juntasaro V., Uthayopas P. A parallel semi-coarsening multigrid algorithm for solving the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations // Proceedings of International Conference HPCAsia-04. IEEE Computer Society, 2004. P. 258 – 266.
13. M. Snir, S.M. Otto, S. Huss-Lederman, D. Walker, and J. Dongarra. MPI: The Complete Reference. Boston: MIT Press., 1996.
14. Ильин В.П. О стратегиях распараллеливания в математическом моделировании // Программирование. 1999. № 1. С. 41–46.
15. Аветисян А.И., Гайсарян С.С., Самоваров О.И. Возможности оптимального выполнения параллельных программ, содержащих простые и итерированные циклы, на неоднородных параллельных вычислительных системах с распределенной памятью // Программирование, 2002. № 1. С. 38–54.