ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ОБЩЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ДВУМЕРНОМ СЛУЧАЕ

УДК 519.683

БАРАНОВСКИЙ Николай Викторович
к.ф.-м.н., доцент каф. Теоретической и промышленной теплотехники ТПУ (Томск, Россия)
Научные интересы: прогноз лесной пожарной опасности, физическое и математическое моделирование процессов при лесных пожарах, параллельные вычисления.

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 [6], 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. Которое в свою очередь может быть определено 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) и необходима разработка соответствующих принципов распараллеливания общей математической модели лесных пожаров, оценка времени выполнения, ускорения и эффективности работы параллельных программ.

КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существуют различные типы МВС [7]. Кластерные вычислительные системы представляют собой недорогой аналог массивно параллельных систем. Невысокая стоимость кластерных вычислительных систем оборачивается большими накладными расходами на организацию межпроцессорных взаимодействий. Данное обстоятельство сильно сужает класс решаемых задач.

В случае неоднородности (неоднородная вычислительная система, неоднородный параллельный алгоритм или структура данных), возникает проблема неравномерного распределения данных по процессорным узлам вычислительной системы (балансировка вычислительной нагрузки) [8]. Существует мелкозернистый и крупнозернистый параллелизм [9]. Как правило, при решение задач теории лесных пожаров следует применять крупнозернистый параллелизм. Отметим, что к настоящему моменту

МВС (в том числе и кластерные вычислительные системы) нашли широкое применение в различных областях науки.

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.

ОБЩАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕСНОГО ПОЖАРА

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 ЛГМ для прогноза лесопожарного созревания слоя ЛГМ и 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. Так как модель является достаточно сложной и численная реализация требует больших затрат машинного времени, большого объема оперативной памяти и большой мощности вычислителя, то представляется целесообразным разработать принципы параллельной реализации данной модели. В настоящей статье рассматриваются алгоритмы параллельной реализации частной математической модели распространения верхового лесного пожара по кронам деревьев в однородном лесном массиве.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ОБЩЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА МВС

Общие замечания. Рассматриваемые задачи теории лесных пожаров в настоящее время распараллелить средствами мелкозернистого распараллеливания не представляется целесообразным, т.к. в этом случае в работе параллельной программы доля времени, соответствующая межпроцессорным обменам будет сравнима, а может быть и превысит, время расчетов, что повлечет за собой крайне низкую эффективность. Более того, применение в качестве вычислителя кластерных систем станет невозможным, т.к. потребуется вычислительная система с очень высокими показателями работы коммуникационной подсистемы. Поэтому в настоящей работе рассматривается крупнозернистое распараллеливание.

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 (например, итерационно-интерполяционный метод [10]), что в свою очередь затрудняет распараллеливание.

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.

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 [11,12]. Отметим, что ключевым моментом является однородность математической модели, однородность постановки задачи, однородность алгоритма, однородность информационной среды.

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 [13,14] (следует заметить, что в общем случае толщина полос может быть и неодинаковой, так как разные ярусы леса могут иметь различные толщины [1-3]). Схема декомпозиции области решения представлена на рисунке 1.а.

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 [13,14]. На рисунке 1.б представлена схема декомпозиции области решения. Геометрическая декомпозиция может быть использована как распараллеливание более глубокого уровня на следующем этапе после декомпозиции по физико-математическим процессам явления.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ В СИСТЕМЕ MPI

Недавно Томский государственный университет приобрел суперкомпьютер СКИФ Cyberia [15], на котором установлены средства распараллеливания Message Passing Interface (MPI) [16] и Open MP [17]. При кластерных вычислениях для распараллеливания внутри каждого SMP-узла возможны два подхода. В первом случае для каждого процессора в SMP-узле порождается отдельный MPI-процесс. MPI-процессы внутри данного узла обмениваются сообщениями через разделяемую память. Во втором случае на каждом узле запускается только один MPI-процесс, а внутри каждого MPI-процесса производится распараллеливание в модели общей памяти, например с помощью OpenMP-интерфейса. Система MPI предполагает две модели вычислений, а именно: MPMD (Multiple Program - Multiple Data) и SPMD (Single Program - Multiple Data) модели вычислений [16]. На практике чаще всего встречается SPMD-модель программирования. Для оптимального отображения структуры задачи на топологию МВС следует воспользоваться механизмом виртуальных топологий [16], что обеспечивает система MPI.

ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ИСПОЛНЕНИЯ, УСКОРЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Может быть произведена оценка общего времени, которое необходимо затратить на реализацию комплексного математического вычислительного эксперимента:

$$T_M^{CE} \approx n_i\, n_e\, n_p\, n_l\, n_t\, n_0\, T_M + T'_M. \qquad (1)$$

Множители, которые присутствуют в данной формуле, соответствуют следующим операциям [18-20]: 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 M процессоров.

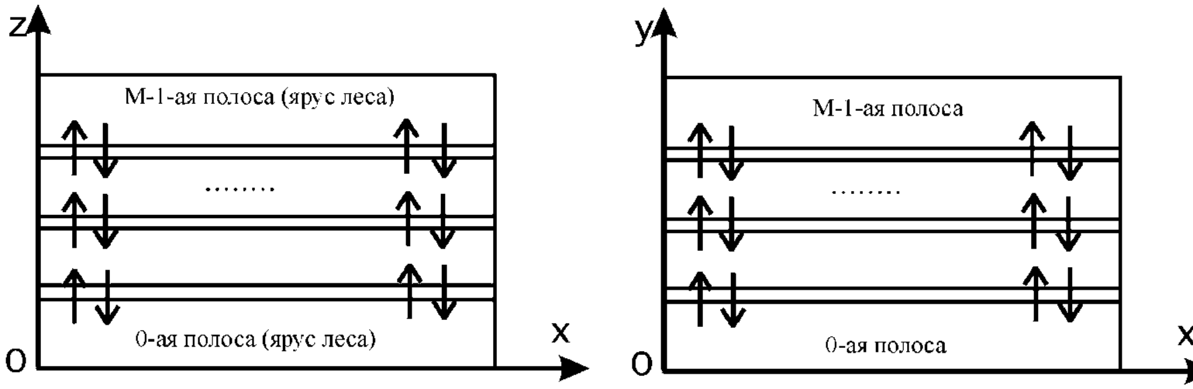

Рисунок 1 – Декомпозиция области решения и схема межпроцессорных обменов при параллельной реализации: 2D-случаи в плоскости Oxz (а) и Oxy (б)

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. Grishin A.M. Matematicheskoe modelirovanie lesnyih pozharov i novyie sposobyi borbyi s nimi. Novosibirsk: Nauka, 1992. 407 s.
2. Grishin A.M. Fizika lesnyih pozharov. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 1994. 218 s.
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. Grishin A.M. Obschaya matematicheskaya model lesnyih pozharov i ee prilozheniya dlya ohranyi i zaschityi lesov // Sopryazhennyie zadachi mehaniki i ekologii: Izbrannyie dokladyi mezhdunarodnoy konferentsii. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 2000. S. 88-137.
5. Grishin A.M. Modelirovanie i prognoz katastrof. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 2002. 122 s.
6. Dzharratano Dzh., Rayli G. Ekspertnyie sistemyi: printsipyi razrabotki i programmirovanie, 4-e izd. Per. s angl. M.: Vilyams, 2007. 1152 S.
7. Bogdanov A.V., Korhov V.V., Mareev V.V., Stankova E.N. Arhitektura i topologii mnogoprotsessornyih vyichislitelnyih sistem. Uchebnoe posobie. M.: "INTUIT.RU Internet-Universitet Informatsionnyih Tehnologiy", 2004. 176 S.
8. Vshivkov V.A., Kraeva M.A., Malyishkin V.E. Parallelnyie realizatsii metoda chastits // Programmirovanie. 1997. # 2. S. 39-51.
9. Bandman O.L. Melkozernistyiy parallelizm v vyichislitelnoy tehnike. // Programmirovanie. 2001, # 4. S.5-20.
10. Grishin A.M., Bertsun V.N., Zinchenko V.I. Iteratsionno-interpolyatsionnyiy metod i ego prilozheniya. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 1981. 160 s.
11. Kovenya V.M., Tarnavskiy G.A., Chernyiy S.G. Primenenie metoda rasschepleniya v zadachah aerodinamiki, 1990. 245 S.
12. Hmelnov D.E Uluchshennyie algoritmyi resheniya raznostnyih i q-raznostnyih uravneniy // Programmirovanie. # 2. S.70-78.

13. Samarskiy A.A., Vabischevich P.N. Additivnyie shemyi dlya zadach matematicheskoy fiziki. M.: Nauka. 2001. 320 S.
14. 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.
15. Prohanov S.A. Programmnoe obespechenie vyichislitelnogo klastera SKIF Cyberia // Programma i tezisyi 4-oy Sibirskoy shkolyi-seminara po parallelnyim i vyisokoproizvoditelnyim vyichisleniyam. Tomsk: TGU. 2007. S. 59 – 60.
16. Dagum L., Menon R. OpenMP: An Industry-Standard API for Shared-Memory Programming // Computational Science & Engineering, Vol. 5, No. 1, 1998. P. 46 – 55.
17. Korneev V.D. Parallelnoe programmirovanie v MPI. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000. 213 s.
18. Ilin V.P. O strategiyah rasparallelivaniya v matematicheskom modelirovanii // Programmirovanie. 1999. # 1. S. 41-46.
19. Avetisyan A.I., Gaysaryan S.S., Samovarov O.I. Vozmozhnosti optimalnogo vyipolneniya parallelnyih programm, soderzhaschih prostyie i iterirovannyie tsiklyi, na neodnorodnyih parallelnyih vyichislitelnyih sistemah s raspredelennoy pamyatyu // Programmirovanie, # 1, 2002, S. 38-54.
20. Baranovskiy N.V. Landshaftnoe rasparallelivanie i prognoz lesnoy pozharnoy opasnosti // Sibirskiy zhurnal vyichislitelnoy matematiki. 2007. Tom 10, # 2. S. 141 – 152.