

Разработка параллельных алгоритмов, моделирующих распространение лесных пожаров

М.С. Вдовенко, Г.А. Доррер

В статье сравниваются различные способы декомпозиции сеточной области при численном решении задачи моделирования динамики распространения лесного пожара. Проведен предварительный теоретический анализ ускорения вычислений, а также выполнен вычислительный эксперимент на кластере ИВМ СО РАН (г. Красноярск), показавший, что наиболее эффективным при использовании, по крайней мере, от 4 до 16 процессоров является двумерное разбиение исходной области.

Введение

С давних пор пожары приносили человечеству огромный вред. Во всем мире они относятся к числу стихийных бедствий приносящих большой ущерб и экономике, и экологии, и социуму.

Лесные пожары повреждают ценную древесину и пагубно влияют на возобновление ее ресурсов. В результате пожаров снижаются защитные, водоохранные и другие полезные свойства леса, уничтожается флора и фауна, наносится ущерб близлежащим сооружениям, а в отдельных случаях страдают и целые населенные пункты. Кроме того, лесной пожар представляет серьезную опасность для людей и сельскохозяйственных животных.

В нашей стране необходимость повышения пожароустойчивости лесов постоянно подчеркивается еще с 60-х годов прошлого века, и усилия в этом направлении принесли фундаментальные и практические результаты. Были разработаны критерии и методы повышения пожароустойчивости крупных лесных массивов.

Проблеме лесных пожаров посвятили свои труды Р. Ротермел, Н. П. Курбатский, Э. Н. Валендик, А. М. Гришин, Ю. А. Гостинцев, Г. Н. Коровин и другие. Содержательный обзор исследований в мире по проблеме моделирования распространения лесных пожаров дан в работе [6].

Эффективная борьба с пожаром невозможна без предсказания его поведения, для чего требуются математические модели его поведения. В настоящее время сложились благоприятные условия для разработки систем моделирования и прогнозирования лесных пожаров на все территории РФ. Это связано с созданием и вводом в эксплуатацию Информационной системы дистанционного мониторинга ИСДМ-Рослесхоз, с помощью которой осуществляется мониторинг лесных пожаров. Данная система, основанная на использовании спутниковой информации о пожарной обстановке в лесах и действующих пожарах, позволяет получать необходимые данные для осуществления процесса прогнозирования. При этом задачи математического моделирования требуют серьезных вычислительных ресурсов. Одним из способов решения этой проблемы является использование кластерных вычислительных систем. Наиболее общим подходом равномерного распределения вычислительной нагрузки между процессорами при решении задач динамики лесных пожаров является разделение вычислительной области (карты лесной территории) на подобласти, количество которых совпадает с числом используемых процессоров, т. е. использование принципа геометрической декомпозиции [1].

Целью настоящей работы является разработка и исследование эффективного параллельного вычислительного алгоритма моделирования распространения кромки лесного пожара.

1. Анализ задачи и выявление ее потенциального параллелизма

Разработка программных комплексов для проведения крупномасштабных вычислительных экспериментов на параллельных вычислительных системах представляет собой сложную в теоретическом и практическом плане задачу. Разработка параллельных программ практического уровня сложности представляет собою многоэтапный технологический процесс: анализ задачи, выбор модели программы, декомпозиция задачи на параллельные процессы, анализ производи-

тельности и организации вычислительного эксперимента. Все эти проблемы возникают при моделировании динамики распространения лесного пожара.

1.1 Постановка задачи

Пусть массив горючего представляет собой в общем случае n плоских горизонтальных однородных по вертикали слоев горючего, расположенных один над другим. Произвольный i -й слой занимает по вертикали область Z_i , с координатами от z_{iH} до z_{iK} .

Вертикальная координата середины i -го слоя обозначается z_{icp} , а его толщина δ_i . При этом $z_{icp} = (z_{iH} + z_{iK})/2$, $\delta_i = z_{iK} - z_{iH}$, $i = 1, \dots, n$.

Свойства горючего в пределах каждого слоя не зависят от z .

Горючий материал в окрестностях точки C в некоторый момент времени может находиться в одном из трех состояний, описываемых функцией: $S(x, y, z, t)$

$$S(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, & \text{если в точке } C \text{ в момент } t \text{ имеется ненулевой запас горючего (т. е.} \\ & \omega(x, y, z, t) > 0), \text{ но горения не происходит;} \\ 1, & \text{если } \omega(x, y, z, t) > 0 \text{ и происходит горение;} \\ 2, & \text{если } \omega(x, y, z, t) = 0 \text{ т. е. горение невозможно.} \end{cases}$$

Области, соответствующие состояниям $S = 0$, $S = 1$, $S = 2$ обозначаются соответственно $\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2$. Проекции областей $\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2$ на D будем обозначать соответственно D_0, D_1, D_2 , причем $D_0 \cup D_1 \cup D_2 = D$.

Уравнение нагрева для горючего в окрестности точки $C = (x, y, z)$, которое в момент времени t находится в состоянии $S(x, y, z, t) = 0$:

$$\frac{\partial H_j(x, y, t)}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \iint_{D_{1i}} \Phi_i(x_1, y_1, t) \xi_{ij}(x - x_1, y - y_1) dx_1 dy_1 + \Phi_e(x, y, t) - k_j(x, y) [H_j(x, y, t) - H_{0j}(x, y)], \quad (1)$$

где $H_j(x, y, t) = \frac{1}{z_{jK} - z_{jH}} \int_{z_{jH}}^{z_{jK}} H_v(x, y, z, t) dz$, при начальном условии:

$$H_j(x, y, 0) = H_{0j}(x, y), \quad (x, y) \in D_{0j}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Здесь $H(x, y, z, t)$ - значение энтальпии в точке (x, y, z) , в момент времени t ;

Φ, Φ_e - соответственно, энергия, образующаяся при горении и поступающая от внешних источников, вт/м^3 ;

$\xi_{ij}(x - x_1, y - y_1)$ - функция влияния пламени из точки (x_1, y_1) на точку (x, y) (функция Грина) из i -го слоя на j -й слой;

$$k(x, y, z) = \frac{\alpha \delta}{\rho c'}, \quad \text{где}$$

α - коэффициент теплоотдачи, $\text{вт/м}^2 \cdot \text{град}$;

δ - удельная поверхность слоя, м^{-1} ;

c' - приведенная теплоемкость влажного материала.

Условие воспламенения горючего в j -м слое, т.е. перехода горючего в состояние $S_j(x, y, z, t) = 1$ имеет вид:

$$H_j(x, y, t_j^*) \geq H_j^*(x, y), \quad (3)$$

где $t_j^* = t_j^*(x, y)$ – время воспламенения горючего в j -м слое в точке $(x, y) \in D_{0j}$, H^* – энтальпия начала газификации.

Уравнение расходования горючего:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\omega_j(x, y, t)}{\omega_{0j}(x, y)} \right] = \begin{cases} -r_j & \text{при } \omega_j(x, y, t) > 0 \\ 0 & \text{при } \omega_j(x, y, t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

с начальным условием $\omega_j(x, y, t_j^*) = \omega_{0j}(x, y)$, $(x, y) \in D_{1j}$.

Здесь ω_j – активный запас горючего материала, в j -м слое, кг/м³;

r_j – относительная скорость сгорания j -го слоя, 1/с.

Уравнение тепловыделения в j -м слое:

$$\Phi_j(x, y, t) = -h_j(x, y) \frac{\partial \omega_j(x, y, t)}{\partial t}, \quad (x, y) \in D_{1j}, \quad j = 1, \dots, n \quad (5)$$

где h_j – теплота сгорания горючего, дж/кг.

Условие погасания (перехода в состояние $S_j(x, y, t) = 2$):

$$\omega_j(x, y, t_{j*}) = 0, \quad (x, y) \in D_{2j}, \quad j = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Существенным элементом рассматриваемой модели распространения и развития пожара является модель теплопередачи из зоны горения к горючим материалам, задаваемая функцией влияния (функцией Грина) $\xi_{ij}(x - x_1, y - y_1)$, которая подробно рассмотрена в [2].

Система уравнений (1) – (6) представляет собой модель процесса распространения горения по неоднородным слоям горючего. Особенностью рассмотренной модели является то, что часть входных и выходных переменных представляет собой множества $\Omega_0(t)$, $\Omega_1(t)$ и $\Omega_2(t)$.

1.2. Метод решения

Рассмотрим алгоритм построения горячей кромки, основанный на численном решении уравнений, описывающих распространение процесса горения. Введя в каждом из слоев прямоугольную сетку с шагами по координатам x и y соответственно Δx и Δy , заменим области D_{0l} , D_{1l} и D_{2l} соответствующими сеточными областями $D_{\Delta 0l}$, $D_{\Delta 1l}$, $D_{\Delta 2l}$, $l = 1, 2$.

Перейдем к дискретному времени, рассматривая систему в моменты $t = 0, 1, 2, \dots$ с шагом Δt . Заменив в (1) – (2) частную производную по времени разностными отношениями, а интеграл по области D_{1l} суммой, получим уравнение нагрева в виде:

$$H_e(i, j, t + 1) = H_e(i, j, t) + \Delta t \Delta x \Delta y \sum_{s=1}^2 \sum_{(m, n) \in D_{1s}} \Phi(m, n, t) \times \xi_{sl}(m - i, n - j) + \\ + \Phi_{el}(i, j, t) \Delta t - \Delta t k_l(i, j) \times [H_l(i, j, t) - H_{0l}(i, j)] \quad (7)$$

С начальными условиями:

$$H_l(i, j, 0) = H_{0l}(i, j), \quad (i, j) \in D_{\Delta 0l}, \quad l = 1, 2.$$

Условие воспламенения горючего в l -м слое, при $t = t^*$: $H_l(i, j, t^*) \geq H_l^*(i, j)$, узел (i, j) исключается из $D_{\Delta 0l}(t^*)$ и присоединяется к $D_{\Delta 1l}(t^*)$.

Уравнение расходования горючего:

$$\omega_l(i, j, t + 1) = \begin{cases} \omega_l(i, j, t) - r_l \Delta t & \text{при } \omega_l(i, j, t) > 0 \\ \omega_l(i, j, t) & \text{при } \omega_l(i, j, t) \leq 0 \end{cases}, \quad (8)$$

с начальным условием: $\omega_l(i, j, t^*) = \omega_{0l}(i, j)$, $(i, j) \in D_{\Delta 1l}$, $l = 1, 2$.

Уравнение тепловыделения:

$$\Phi_l(i, j, t) = \frac{-h_l(i, j)[\omega_l(i, j, t) - \omega_l(i, j, t - \Delta t)]}{\Delta t}, \quad (i, j) \in D_{\Delta l}, \quad l = 1, 2. \quad (9)$$

Условие погасания, при $t = t_*$: $\omega_l(i, j, t_*) = 0$, $(i, j) \in D_{\Delta l}$, точка (i, j) исключается из $D_{\Delta l}(t_*)$ и присоединяется к $D_{\Delta 2l}(t_*)$.

Функции влияния $\xi_{ij}(x - x_1, y - y_1)$, задаются формулами с учетом дискретизации по пространству [2].

В качестве исходных данных используются:

- область моделирования в виде двух множеств узлов $D_{\Delta l} = \{(i, j), i = 1, \dots, n_l, j = 1, \dots, m_l\}$, $l = 1, 2$;
- начальный и конечный моменты времени t_0 и t_f , временной шаг Δt ;
- участки с одинаковыми характеристиками горючих материалов Ω_{kl} , $k = 1, \dots, K$, $\bigcup_k \Omega_{kl} = D_{\Delta l}$, $l = 1, 2$.
- теплофизические характеристики горючего для каждого из участков Ω_{kl} в каждый момент времени: $H_{0kl}(t)$, $H_{kl}^*(t)$, $k_{kl}(t)$, $h_{kl}(t)$, ω_{0kl} , $\Phi_{ekl}(t)$, $l = 1, 2$, $k = 1, \dots, K$, $t = t_0, t_0 + \Delta t, \dots, t_f$.
- параметры функции, описывающей тепловое воздействие локального пламени $\rho_{0kl}(t)$, $a_{0kl}(t)$, $\delta_{kl}(t)$, $h_{fkl}(t)$, $\varphi_b(t)$, $w(t)$
- скорости сгорания $r_{kl}(t)$, для всех участков Ω_k в каждый момент времени $t = t_0, t_0 + \Delta t, \dots, t_f$, $k = 1, \dots, K$.
- начальное состояние системы – области $D_{\Delta 0l}(t_0)$, $D_{\Delta 1l}(t_0)$, $D_{\Delta 2l}(t_0)$.

Исходные данные могут быть получены, используя информацию о лесном горючем и внешней среде, а необходимые для расчетов значения скоростей могут быть вычислены на основании снимков пожара.

Итак, пусть границы горящей кромки тем или иным способом получены и преобразованы в цифровую форму. Конфигурация кромки реальных пожаров часто является очень сложной, поэтому для упрощения расчетов применяется сглаживание границы контура пожара. Применением формул оценки процесса распространения по экспериментальным данным («оценка» эллипсом) [2] позволяют определить скорости, на основании которых, используя модель процесса горения, получают информацию о распространении кромки пожара в последовательные моменты времени.

1.3. Распараллеливание

Для распараллеливания процесса вычислений предлагается схема, вытекающая из физического содержания данной задачи. Расчет энтальпии для точки (i, j) на $(t + 1)$ -ом временном шаге происходит с использованием некоторого количества точек на t -м шаге. Численный расчет ведется итеративно: по имеющимся значениям t -го временного шага выстраивается $(t + 1)$ -й, и т.д.

Таким образом, исходную задачу можно разбить на несколько подзадач для областей, пересекающихся только по границе разбиений, независимых друг от друга на каждом расчетном шаге. В рассматриваемом примере возможны два различных способа разбиения исходной области по вычислительным узлам – одномерное и двумерное разбиение. В обоих случаях исходная область не включает взаимно перекрывающиеся подобласти, поэтому пересчет значений на границах между данными областями предполагает согласно алгоритму суммирование при обходе вычисленными значениями для граничных элементов. При этом для перехода к следующему

шей итерации необходимо согласование значений на границах расчетных подобластей. Пересылка данных осуществляется с использованием процедур библиотеки MPI [4].

Определим теперь потенциальное ускорение алгоритма. Будем оценивать время работы параллельной программы исходя из следующего соотношения $S_p = T_1 / T_p$, где S_p – ускорение, T_1 – время вычислений на одном процессоре, T_p – время вычислений на p процессорах.

Для получения реалистических оценок будем учитывать время, затрачиваемое программой на обмены. Как следует из принятой нами схемы распределения данных, на каждом временном шаге требуется обмен границами. Время пересылок для различных способов декомпозиции можно приблизительно выразить через количество пересылаемых данных [1]:

$$V^{1D}_{comm} = 2 \cdot N^3 \cdot \tau, \text{ при одномерном разбиении;}$$

$$V^{2D}_{comm} = \frac{4}{\sqrt{p}} \cdot N^3 \cdot \tau, \text{ при двумерном разбиении;}$$

где N^3 – размерность задачи, p – количество вычислительных узлов, τ – время пересылки одного числа.

Алгоритм и его программная реализация являются масштабируемыми, если ускорение и производительность зависят линейно от количества используемых процессоров [1]: $S_p = O(p)$. На практике алгоритмы, для которых $S_p = O(p / (\ln p))$ также считаются масштабируемыми.

2. Проведение вычислительного эксперимента и анализ результатов

Расчеты производились на кластерной системе ИВМ СО РАН на тестовой сетке 400×400 при использовании до 16 процессоров. Тестовая область Ω представляет «квадрат» на сфере: $\Omega = [1.6\pi] \times [1.6\pi]$. Возвышение поверхности задаются косинусоидой $z(x) = 1 + \cos(x) / 150$. В вычислительных экспериментах было сделано 100 шагов по времени. Значения ускорения показанного на кластере ИВМ СО РАН приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значение ускорения показанного на кластере ИВМ СО РАН

Количество процессоров	1	2	4	8	16
Разбиение расчетной области на квадраты (двумерное разбиение)					
Время выполнения основного цикла, $T[c]$	700,868934	359,8456	188,142001	81,975424	53,29919
Ускорение, S	1,000000	1,947693	3,725213	8,549745	13,14971
Эффективность, $E = S / p$	1,000000	0,973847	0,931303	1,068718	0,821857
Разбиение расчетной области на полосы (одномерное разбиение)					
Время выполнения основного цикла, $T[c]$	700,868934	359,8456	207,0777	105,2597	87,26806
Ускорение, S	1,000000	1,947693	3,384569	6,658474	8,031219
Эффективность, $E = S / p$	1,000000	0,973847	0,846142	0,832309	0,501951

При применении двумерной декомпозиции и 8 процессорах значение эффективности больше единицы, что объясняется использованием в программе «динамических» массивов с подстраиваемыми под выделенное число процессоров размерами. Таким образом, необходимы меньшие временные затраты на выборку обрабатываемых данных из оперативной памяти и передачу их через КЭШ-память. В случае использования 8 процессоров при данной размерности сетки весь массив помещается в КЭШе, что и определяет более быстрое выполнение вычислений за счет отсутствия необходимости обмена между оперативной памятью и КЭШем.

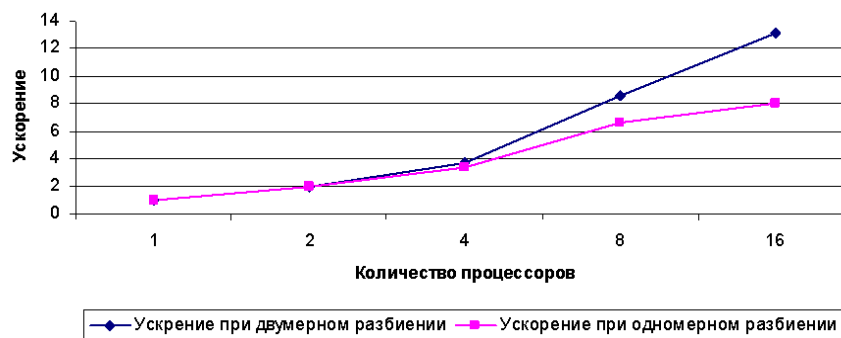


Рис. 1. Зависимость ускорения от количества доступных процессоров

Как видно из рис.1, результаты вычислительного эксперимента показали наличие хорошего ускорения при решении данной задачи.

Также был проведен вычислительный эксперимент, выявивший зависимость ускорения от роста размерности задачи. Пусть тестовая область Ω представляет «квадрат» на сфере: $\Omega = [1.6\pi] \times [1.6\pi]$. Возвышение поверхности задаются косинусоидой $z(x) = 1 + \cos(x)/150$. В вычислительных экспериментах было сделано 100 шагов по времени. Декомпозиция расчетной области – двумерная. Полученные значения ускорения показанного на кластере ИВМ СО РАН приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значение ускорения показанного на кластере ИВМ СО РАН

Размерность задачи	100×100	200×200	400×400	800×800
Время выполнения основного цикла на 1 процессоре, $T[c]$	0,464515	7,300380	122,961800	1532,029398
Время выполнения основного цикла на 4 процессорах, $T[c]$	0,185772	2,149292	33,887110	394,943400
Ускорение, S	2,5004621	3,3966438	3,6285715	3,879111
Эффективность, $E = S / p$	0,625116	0,849161	0,907143	0,969778

Выполненные расчеты показали (табл. 2), что при увеличении размерности задачи наблюдается увеличение ускорения вычислений, по крайней мере, для задач размерностью не более 800×800 и применения четырех процессоров. Значения ускорения вычислений с увеличением размерности задачи при использовании двумерной декомпозиции расчетной области возрастают логарифмически ($y = 0,9851 \ln(x) + 2,5685$, с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,9729$).

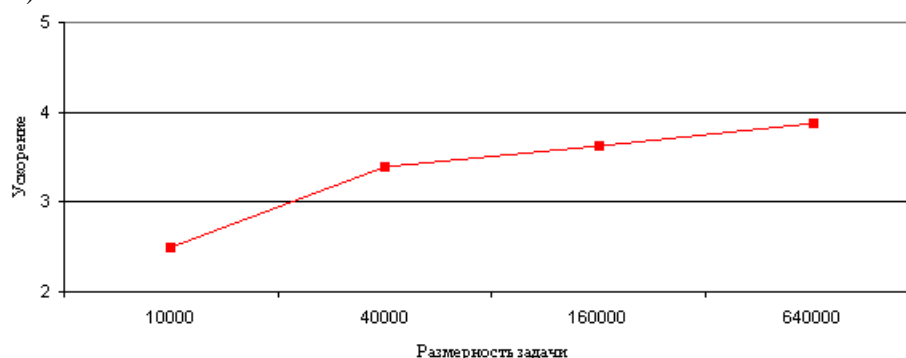


Рис. 2. Зависимость ускорения от размерности задачи

На рис.2 показана зависимость ускорения вычислений от размерности задачи. При увеличении размерности задачи в 4 раза ускорение вычислений при использовании 4 процессоров возрастает. Средний уровень эффективности распараллеливания составляет около 83%, что связано с неизбежными затратами времени на организацию межпроцессорных обменов и записи результатов в файл.

Заключение

В результате исследования были созданы следующие программы: программа решающая обратную задачу – получения значений скоростей, используя информацию о контурах пожара в последовательные моменты времени; программа для препроцессорной обработки данных – «разрезания» данных на отдельные файлы для многопроцессорных вычислений; и программа для численного моделирования распространения кромки лесного пожара. При численном решении задачи моделирования динамики распространения лесного пожара возможно применение как одномерной, так и двумерной декомпозиции, однако результаты тестирования программ показали, что наиболее эффективной при использовании, по крайней мере, от 4 до 16 процессоров является двумерное разбиение исходной области. При этом наблюдается увеличение ускорения при возрастании размерности задачи.

Литература

1. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
2. Доррер Г. А. Динамика лесных пожаров. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 404 с.
3. Корнеев В. Д. Параллельное программирование в MPI. – 2-е изд. Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 2002. – 215 с.
4. Message-Passing Interface Forum, MPI-2: Extensions to the Message-Passing Interface, 1997. [<http://www.unix.mcs.anl.gov/mpi/>], 13.03.2007
5. RS/6000 SP: Practical MPI Programming. [www.redbooks.ibm.com], 11.08.2008
6. Weber R. O. Modeling fire spread through fuel beds // Prog. Everg. Combust. Sci. 1990. V. 17. P. 65-82.