

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Факультет вычислительной математики и кибернетики

Отчет

По курсу: «Суперкомпьютерное моделирование и технологии»
«MPI + OpenMP»

Выполнила:
Казанцева Варвара Денисовна
Группа: 608

11 декабря 2025 г.

Содержание

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Введение | 2 |
| 2 | Математическая постановка задачи | 2 |
| 3 | Метод фиктивных областей | 2 |
| 4 | Разностная схема решения задачи | 2 |
| 4.1 | Определение коэффициентов разностной схемы | 3 |
| 4.2 | Определение коэффициентов разностной схемы аналитически | 3 |
| 5 | Метод решения системы линейных алгебраических уравнений | 3 |
| 6 | Программная реализация | 4 |
| 6.1 | Ключевые компоненты программы | 4 |
| 6.2 | Используемые функции MPI | 4 |
| 6.3 | Используемые директивы OpenMP | 5 |
| 6.4 | Запуск программы | 5 |
| 7 | Результаты расчетов | 5 |
| 7.1 | Параллельная программа с MPI | 5 |
| 7.2 | Результаты расчетов на ПВС IBM Polus | 6 |
| 7.3 | Графики | 6 |
| 7.4 | График приближенного решения | 6 |
| 7.5 | Графики ускорения | 7 |
| 7.6 | Графики сходимости | 8 |
| 8 | Заключение | 8 |

1 Введение

В данной работе рассматривается приближенное решение двумерной задачи Дирихле для уравнения Пуассона в криволинейной области. В качестве расчетной области выбран **остроугольный треугольник с вершинами в точках C(3,0), A(3,0), B(0,4)** (вариант 2). Целью работы является распараллеливание последовательного решения данной задачи с использованием средств MPI.

2 Математическая постановка задачи

В области $D \subset \mathbb{R}^2$, ограниченной кусочно-гладким контуром Γ , рассматривается дифференциальное уравнение Пуассона:

$$-\Delta u = f(x, y), \quad (x, y) \in D \quad (1)$$

где оператор Лапласа:

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2)$$

функция $f(x, y) = 1$ задана. Для выделения единственного решения уравнение дополняется граничным условием Дирихле:

$$u(x, y) = 0, \quad (x, y) \in \Gamma \quad (3)$$

3 Метод фиктивных областей

Для приближенного решения задачи (1)-(3) используется метод фиктивных областей. Область D принадлежит прямоугольнику $\Pi = \{(x, y) : A_1 < x < B_1, A_2 < y < B_2\}$. В прямоугольнике Π рассматривается задача Дирихле с кусочно-постоянным коэффициентом:

$$k(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in D \\ \frac{1}{\varepsilon}, & (x, y) \in \hat{D} \end{cases} \quad (4)$$

и правой частью:

$$F(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & (x, y) \in D \\ 0, & (x, y) \in \hat{D} \end{cases} \quad (5)$$

где $\hat{D} = \Pi \setminus D$ - фиктивная область, $\varepsilon > 0$ - малый параметр.

4 Разностная схема решения задачи

Краевая задача решается численно методом конечных разностей. В замыкании прямоугольника Π определяется равномерная прямоугольная сетка $\bar{\omega}_h = \bar{\omega}_1 \times \bar{\omega}_2$, где:

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_1 &= \{x_i = A_1 + ih_1, i = 0, 1, \dots, M\}, \\ \bar{\omega}_2 &= \{y_j = A_2 + jh_2, j = 0, 1, \dots, N\} \end{aligned}$$

с шагами $h_1 = (B_1 - A_1)/M$, $h_2 = (B_2 - A_2)/N$.

Дифференциальное уравнение аппроксимируется разностным уравнением:

$$-\frac{1}{h_1}(a_{i+1,j}w_{x,ij} - a_{i,j}w_{\bar{x},ij}) - \frac{1}{h_2}(b_{i,j+1}w_{y,ij} - b_{i,j}w_{\bar{y},ij}) = F_{ij} \quad (6)$$

где коэффициенты a_{ij} , b_{ij} вычисляются через интегралы от функции $k(x, y)$.

4.1 Определение коэффициентов разностной схемы

Коэффициенты a_{ij} вычисляются по формуле:

$$a_{ij} = \frac{1}{h_2} \int_{y_{j-1/2}}^{y_{j+1/2}} k(x_{i-1/2}, t) dt \quad (7)$$

где $x_{i\pm 1/2} = x_i \pm 0.5h_1$, $y_{j\pm 1/2} = y_j \pm 0.5h_2$.

Коэффициенты b_{ij} вычисляются по формуле:

$$b_{ij} = \frac{1}{h_1} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} k(t, y_{j-1/2}) dt \quad (8)$$

Правая часть F_{ij} вычисляется как:

$$F_{ij} = \frac{1}{h_1 h_2} \iint_{\Pi_{ij}} F(x, y) dx dy \quad (9)$$

где $\Pi_{ij} = \{(x, y) : x_{i-1/2} \leq x \leq x_{i+1/2}, y_{j-1/2} \leq y \leq y_{j+1/2}\}$.

4.2 Определение коэффициентов разностной схемы аналитически

Для коэффициента a_{ij} :

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если отрезок } [P_{ij}, P_{ij+1}] \subset D \\ \frac{1}{\varepsilon}, & \text{если отрезок } [P_{ij}, P_{ij+1}] \subset \hat{D} \\ \frac{l_{ij}}{h_2} + \frac{1}{\varepsilon}(1 - \frac{l_{ij}}{h_2}), & \text{иначе} \end{cases} \quad (10)$$

где l_{ij} - длина части отрезка $[P_{ij}, P_{ij+1}]$, принадлежащей области D , $P_{ij} = (x_{i-1/2}, y_{j-1/2})$.

Аналогично для коэффициента b_{ij} :

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если отрезок } [P_{ij}, P_{i+1j}] \subset D \\ \frac{1}{\varepsilon}, & \text{если отрезок } [P_{ij}, P_{i+1j}] \subset \hat{D} \\ \frac{l_{ij}}{h_1} + \frac{1}{\varepsilon}(1 - \frac{l_{ij}}{h_1}), & \text{иначе} \end{cases} \quad (11)$$

где l_{ij} - длина части отрезка $[P_{ij}, P_{i+1j}]$, принадлежащей области D .

Для правой части F_{ij} :

$$F_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } \Pi_{ij} \subset \hat{D} \\ 1, & \text{если } \Pi_{ij} \subset D \\ \frac{S_{ij}}{h_1 h_2}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (12)$$

где S_{ij} - площадь пересечения $\Pi_{ij} \cap D$.

$\varepsilon = h^2$ - малый параметр, $h = \max(h_1, h_2)$.

5 Метод решения системы линейных алгебраических уравнений

Приближенное решение разностной схемы находится итерационным методом сопряженных градиентов с диагональным предобуславливанием. Алгоритм метода:

1. Выбирается начальное приближение $w^{(0)}$

2. Вычисляется невязка $r^{(0)} = B - Aw^{(0)}$
3. Решается система $Dz^{(0)} = r^{(0)}$
4. Задается направление $p^{(1)} = z^{(0)}$
5. Для $k = 0, 1, 2, \dots$ до сходимости:

$$\begin{aligned}
\alpha_{k+1} &= \frac{(z^{(k)}, r^{(k)})}{(Ap^{(k+1)}, p^{(k+1)})} \\
w^{(k+1)} &= w^{(k)} + \alpha_{k+1}p^{(k+1)} \\
r^{(k+1)} &= r^{(k)} - \alpha_{k+1}Ap^{(k+1)} \\
Dz^{(k+1)} &= r^{(k+1)} \\
\beta_{k+1} &= \frac{(z^{(k+1)}, r^{(k+1)})}{(z^{(k)}, r^{(k)})} \\
p^{(k+2)} &= z^{(k+1)} + \beta_{k+1}p^{(k+1)}
\end{aligned}$$

Условие остановки итерационного процесса:

$$\|w^{(k+1)} - w^{(k)}\|_E < \varepsilon \quad (13)$$

6 Программная реализация

Программа реализована на C++ с использованием гибридной технологии MPI+OpenMP. Применяется метод фиктивных областей для решения уравнения Пуассона в треугольной области.

6.1 Ключевые компоненты программы

- `Domain` – структура для хранения информации о локальной подобласти процесса
- `initializeCoefficients`, `initializeF` – инициализация коэффициентов и правой части
- `conjugateGradient` – метод сопряженных градиентов с диагональным предобуславливанием
- `applyOperator` – применение разностного оператора с обменом граничными значениями
- `solveDiagonal` – решение диагональной системы

6.2 Используемые функции MPI

- `MPI_Init`, `MPI_Finalize` – инициализация/завершение
- `MPI_Dims_create`, `MPI_Cart_create` – создание декартовой топологии
- `MPI_Cart_shift` – определение соседних процессов
- `MPI_Isend`, `MPI_Irecv`, `MPI_Waitall` – неблокирующий обмен данными
- `MPI_Allreduce` – глобальные редукции (скалярные произведения)

6.3 Используемые директивы OpenMP

- `#pragma omp parallel for collapse(2)` – параллелизация вложенных циклов вычислений коэффициентов, правой части и оператора
- `reduction(+:variable)` – редукции в скалярных произведениях
- `omp_set_num_threads()` – установка числа потоков OpenMP

OpenMP используется для распараллеливания вычислительно затратных участков:

- Инициализация коэффициентов a_{ij} , b_{ij} и правой части F_{ij}
- Применение разностного оператора
- Решение диагональной системы предобуславливания
- Вычисление скалярных произведений и норм

6.4 Запуск программы

Для параллельной версии MPI+OpenMP используется расширенный Makefile. Команды для работы с параллельной версией:

```
make run_1_4      # 1 процесс с 4 потоками
make run_2_4      # 2 процесса по 4 потока
make run_polus_2_all # пакетный запуск на кластере Polus (2 процесса)
make run_polus_4_all # пакетный запуск на кластере Polus (4 процесса)
```

7 Результаты расчетов

7.1 Параллельная программа с MPI

Проведены расчеты на сетке $(M, N) = (40 \times 40)$ с различным количестве процессов. Последовательная программа обрабатывает на данной сетке за 0.0296 секунд.

| Количество процессов | Количество нитей | Число итераций | Время решения, с |
|----------------------|------------------|----------------|------------------|
| 1 | 4 | 103 | 0.055 |
| 2 | 4 | 103 | 0.043 |

Таблица 1: Результаты расчетов MPI+OpenMP-программы на сетке 40×40

7.2 Результаты расчетов на ПВС IBM Polus

| Количество процессов MPI | Количество OpenMP-нитей в процессе | Число точек сетки ($M \times N$) | Число итераций | Время решения, с | Ускорение |
|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-----------|
| 0 | 0 | 400×600 | 1077 | 112.59 | 1.0 |
| 2 | 1 | 400×600 | 1077 | 6.49 | 17.36 |
| 2 | 2 | 400×600 | 1077 | 3.38 | 33.31 |
| 2 | 4 | 400×600 | 1077 | 1.79 | 62.90 |
| 2 | 8 | 400×600 | 1077 | 0.99 | 113.73 |
| 0 | 0 | 800×1200 | 2047 | 857.14 | 1.0 |
| 4 | 1 | 800×1200 | 2047 | 24.93 | 34.38 |
| 4 | 2 | 800×1200 | 2047 | 13.16 | 65.13 |
| 4 | 4 | 800×1200 | 2047 | 7.21 | 118.88 |
| 4 | 8 | 800×1200 | 2047 | 4.87 | 176.00 |

Таблица 2: Таблица с результатами расчетов на ПВС IBM Polus (MPI + OpenMP)

7.3 Графики

7.4 График приближенного решения

На рисунке 1 представлено приближенное решение задачи Дирихле для уравнения Пуассона в треугольной области, полученное на сетке 800×1200 .

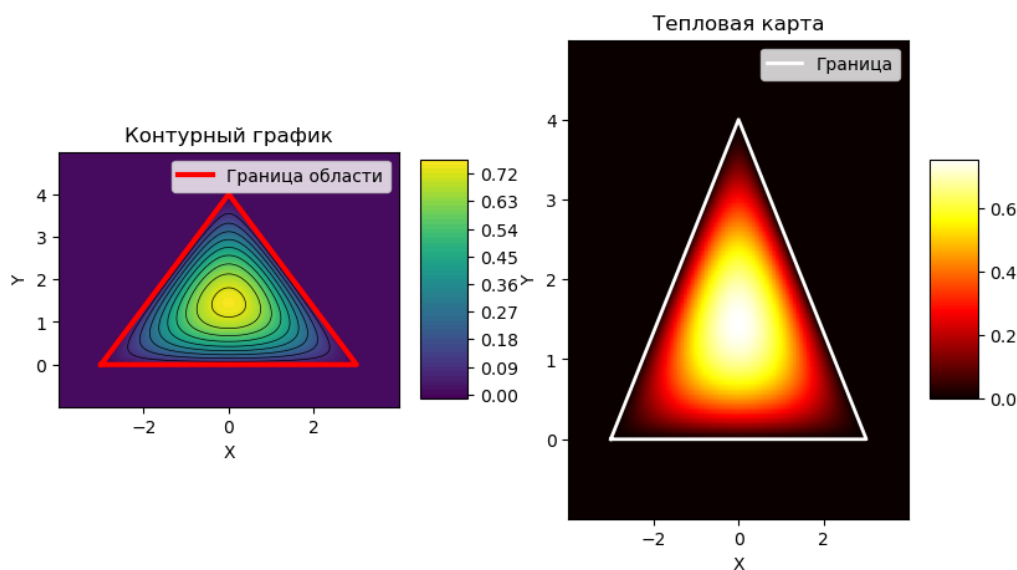


Рис. 1: Приближенное решение уравнения Пуассона в треугольной области на сетке 800×1200

Решение демонстрирует ожидаемое поведение - максимальные значения в центре треугольной области с плавным уменьшением к границам, где задано нулевое граничное условие. Форма решения соответствует геометрии расчетной области.

7.5 Графики ускорения

На рисунках 2 и 4 приведены графики ускорения гибридной программы (MPI + OpenMP) при различном общем числе потоков для сеток 400×600 и 800×1200 соответственно.

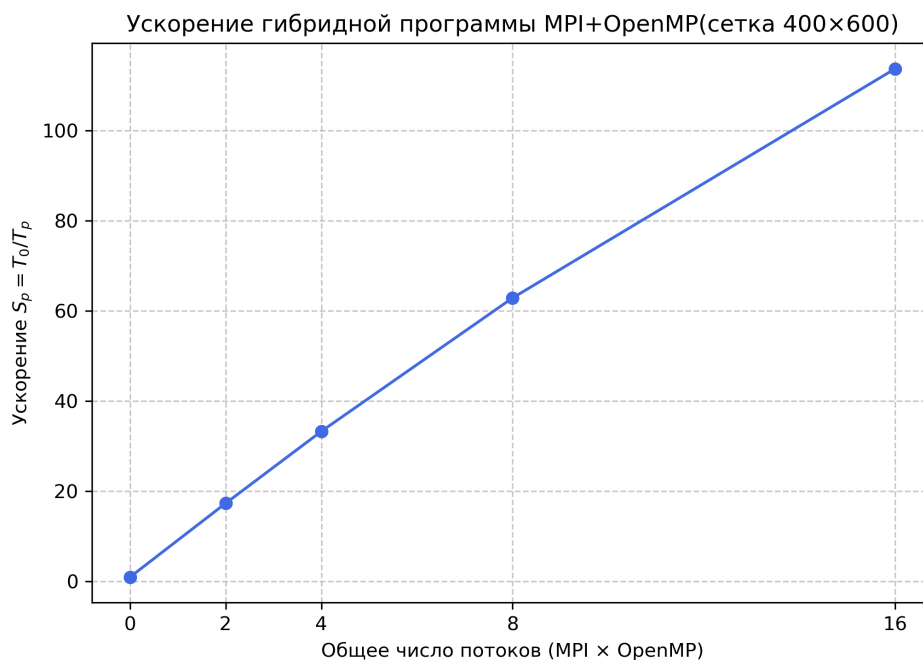


Рис. 2: Ускорение гибридной программы (MPI+OpenMP) для сетки 400×600

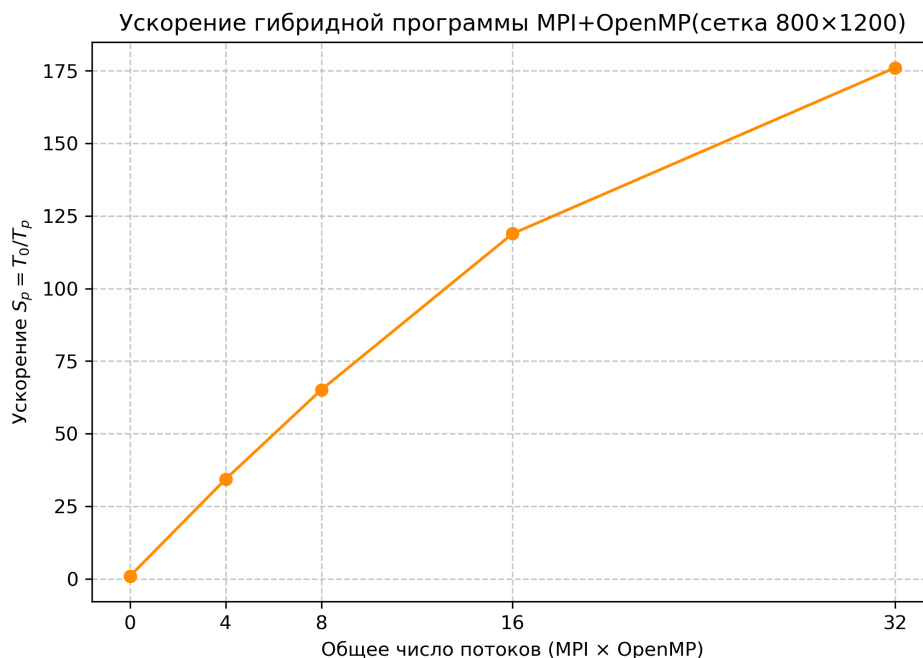


Рис. 3: Ускорение гибридной программы (MPI+OpenMP) для сетки 800×1200

Из графиков видно, что ускорение растет с увеличением общего числа потоков (произведения числа MPI-процессов на число OpenMP-нитей в каждом процессе). На сетке 400×600 максимальное ускорение составило 113.73 при использовании 16 потоков (2 MPI-

процесса $\times 8$ OpenMP-нитей), а на сетке 800×1200 — 176.00 при 32 потоках (4 MPI-процесса $\times 8$ OpenMP-нитей).

7.6 Графики сходимости

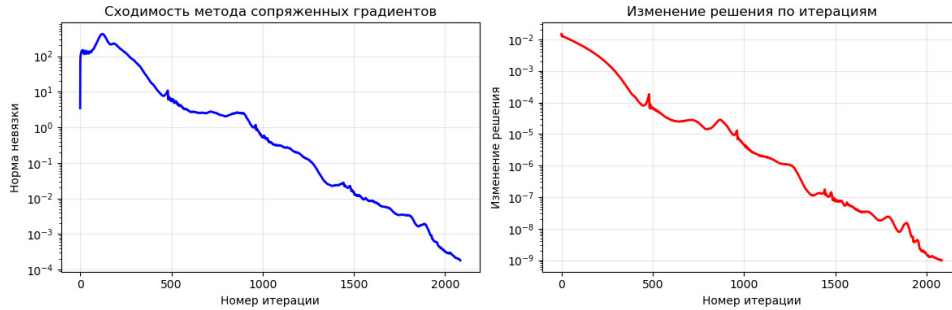


Рис. 4: Сходимость решения для сетки 800×1200

8 Заключение

В ходе работы была разработана и реализована гибридная параллельная версия программы для решения двумерной задачи Дирихле для уравнения Пуассона в криволинейной области (остроугольном треугольнике) методом фиктивных областей. Программа сочетает использование MPI для распределения вычислений между узлами кластера и OpenMP для параллелизации внутри каждого вычислительного узла.

Основные результаты работы:

1. Разработана гибридная параллельная программа (MPI + OpenMP) для решения уравнения Пуассона в треугольной области с применением метода фиктивных областей и метода сопряженных градиентов с диагональным предобуславливанием.
2. Проведено тестирование программы на различных размерах сеток
3. Достигнуто значительное ускорение вычислений: на сетке 400×600 максимальное ускорение составило 113.73 раза при использовании 16 потоков (2 MPI-процесса $\times 8$ OpenMP-нитей), а на сетке 800×1200 — 176.00 раза при использовании 32 потоков (4 MPI-процесса $\times 8$ OpenMP-нитей).
4. Продемонстрирована эффективность гибридного подхода (MPI + OpenMP), который позволяет оптимально использовать ресурсы вычислительного кластера.

Полученные результаты подтверждают целесообразность использования гибридной параллелизации (MPI + OpenMP) для ускорения итерационных методов решения сеточных уравнений на высокопроизводительных вычислительных системах.