МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Институт №8 «Информационные технологии и прикладная математика»
Кафедра 806 «Вычислительная математика и программирование»

Лабораторная работа №2
по курсу «Параллельная обработка данных»

Технология MPI и технология OpenMP

Выполнил: В.А. Петросян
Группа: 8О-408Б-17
Преподаватели: К.Г. Крашенинников,
А.Ю. Морозов

Москва, 2020

Условие

Цель работы : Совместное использование технологии MPI и технологии OpenMP. Реализация метода Якоби. Решение задачи Дирихле для уравнения Лапласа в трехмерной области с граничными условиями первого рода.
Вариант 2: Распараллеливание в общем виде с разделением работы между нитями вручную (“в стиле MPI”). Обмен граничными слоями через bsend, контроль сходимости allgather;

Программное и аппаратное обеспечение

Сведения о системе:

1. Процессор: Intel Core i7-Q720 1.60GHz
2. Количество ядер 4.
3. Количество потоков 8.
4. Оперативная память: 8 ГБ
5. HDD: 465 ГБ

Программное обеспечение:

1. OS: Windows 7
2. IDE: Visual Studio 2019
3. Компилятор: mpic++

Метод решения

Математическая постановка:

$$\frac{d^2u(x,y,z)}{dx^2} + \frac{d^2u(x,y,z)}{dy^2} + \frac{d^2u(x,y,z)}{dz^2} = 0,$$

$$u(x \le 0, y, z) = u_{left},$$
$$u(x \ge l_x, y, z) = u_{right},$$
$$u(x,\ y \le 0, z) = u_{front},$$
$$u(x,\ y \ge l_y, z) = u_{back},$$
$$u(x,\ y,\ z \le 0) = u_{down},$$
$$u(x,\ y,\ z \ge l_z) = u_{up}.$$

Над пространством строится регулярная сетка. С каждой ячейкой сопоставляется значение функции u в точке соответствующей центру ячейки. Граничные условия реализуются через виртуальные ячейки, которые окружают рассматриваемую область.

Поиск решения сводится к итерационному процессу:

$$u_{i,j,k}^{(k+1)} = \frac{\left(u_{i+1,j,k}^{(k)} + u_{i-1,j,k}^{(k)}\right)h_x^{-2} + \left(u_{i,j+1,k}^{(k)} + u_{i,j-1,k}^{(k)}\right)h_y^{-2} + \left(u_{i,j,k+1}^{(k)} + u_{i,j,k-1}^{(k)}\right)h_z^{-2}}{2\left(h_x^{-2} + h_y^{-2} + h_z^{-2}\right)},$$

Опишу немного логику работы с данными. Допустим размер блока, который обсчитывает один процесс это x * y * z. Мы выделим на каждое измерение два дополнительных элемента для хранения граничных условий. Теперь блок имеет размер (x + 2) * (y + 2) * (z + 2) . Храним данные блока в виде одномерного массива, но обращаемся к нему как к трёхмерному. Чтобы было проще взаимодействовать с массивом, напишем пару макросов для правильного доступа по индексу к данным.

```
// Индексация внутри блока
#define _i(i, j, k) (((k) + 1)*(blockY + 2)*(blockX + 2) + ((j) + 1)
*(blockX + 2) + (i) + 1)
#define _ix(id) (((id) % (blockX + 2)) - 1)
#define _iy(id) ((((id) % ((blockY + 2) * (blockX + 2))) / (blockX + 2)) - 1)
#define _iz(id) ( ( (id) / ((blockY + 2) * (blockX + 2)) ) - 1)
```

Пока не достигнем нужной точности $\mathcal{E}$ будем делиться нашими данными с соседними по сетке процессами.

Описание программы

```
MPI_Status status;
MPI_Init(&argc, &argv);
MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &numproc); - общее количество процессов.
MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &id); - номер нашего процесса 0 <= id < numproc.
```

```
MPI_Bcast(&blockX, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD); - “Широковещательное
сообщение” передает всем процессам значение переменной blockX.
```

```
ib = _ibx(id); - индексация процесса в сетке блоков по x
jb = _iby(id); - индексация процесса в сетке блоков по y
kb = _ibz(id); - индексация процесса в сетке блоков по z
```

```
int buffer_size = 12 * sizeOfBuff * sizeof(double) + 12 * MPI_BSEND_OVERHEAD;
double *buffer = (double *)malloc(buffer_size);
MPI_Buffer_attach(buffer, buffer_size); - через этот буфер процесс будет
общаться со всеми остальными. Я выделим место с двойным запасом.
```

```
for(i = -1; i <= blockX; i++){
   for(j = -1; j <= blockY; j++){
       for(k = -1; k <= blockZ; k++){
           data[_i(i, j, k)] = startU; - инициализация начальным условием
       }
   }
}
```

MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD); - синхронизирует процессы внутри коммутатора. В коммутаторе MPI_COMM_WORLD содержатся все процессы.

```
if (ib + 1 < gridX){
   for(j = 0; j < blockY; j++){
       for(k = 0; k < blockZ; k++){
           buff[j * blockZ + k] = data[_i(blockX - 1, j, k)];
       }
   }
   Посылка данных процессу соседу. Так как пространство трехмерное, то мы
посылаем двумерный массив. Посылка производится через Bsend.
   int tmpSize = blockY * blockZ;
   MPI_Bsend(buff, tmpSize, MPI_DOUBLE, _ib(ib + 1, jb, kb), id, MPI_COMM_WORLD);
}
```

```
if (ib > 0) {
    int tmpSize = blockY * blockZ;
    MPI_Recv(buff, tmpSize, MPI_DOUBLE, _ib(ib - 1, jb, kb),
                   _ib(ib - 1, jb, kb), MPI_COMM_WORLD, &status);
    for(j = 0; j < blockY; j++){
        for(k = 0; k < blockZ; k++){
            data[_i(-1, j, k)] = buff[j * blockZ + k];
        }
    }
}
else {
    for(j = 0; j < blockY; j++){
        for(k = 0; k < blockZ; k++){
            data[_i(-1, j, k)] = leftU;
        }
    }
}
```

Опишу работу с openMP на конкретном примере распараллеливания цикла

```
#pragma omp parallel reduction(max:localMax)
 {
  int numThreads = omp_get_num_threads();
  int threadNum = omp_get_thread_num();
  for(int index = threadNum; index < blockX * blockY * blockZ; index += numThreads) {
          int i = index % blockX;
          int j = (index % (blockX * blockY)) / blockX;
          int k = index / (blockX * blockY);
          next[_i(i, j, k)] = 0.5 *
( (data[_i(i + 1, j, k)] + data[_i(i 1, j, k)]) / (hx * hx) +
(data[_i(i, j + 1, k)] + data[_i(i, j - 1, k)]) / (hy * hy) +
(data[_i(i, j, k + 1)] + data[_i(i, j, k - 1)]) / (hz * hz)) /
                                (1.0 / (hx * hx) + 1.0 / (hy * hy) + 1.0 / (hz * hz));
          if( abs(next[_i(i, j, k)] - data[_i(i, j, k)]) > localMax ){
              localMax = abs(next[_i(i, j, k)] - data[_i(i, j, k)]);
          }
   }
}
```

Сначала объявляем начало параллельной области с помощью

```
      #pragma omp parallel
```

У меня был тройной цикл по переменным i, j, k. Переписал его в один большой цикл, чтобы было проще распараллелить. Логика работы с данными точно такая же как в 1 ЛР по Cuda. Перебираю элементы массива со смещение для более эффективного результата.

Строчка

```
reduction(max:localMax)
```

означает, что переменную localMax нужно использовать для редукции через функцию max. После выхода из параллельной секции в переменной localMax действительно будет лежать правильное значение. Можно было обойтись без reduction, дописав критическую секцию в параллельный регион.

Результаты

Общий размер задачи 30 x 30 x 30

Time	gridX	gridY	gridZ
15.263869	1	1	1
27.128401	1	1	2
58.387280	1	2	2
88.006780	3	2	1
127.903893	2	2	2

Общий размер задачи 40 x 40 x 40

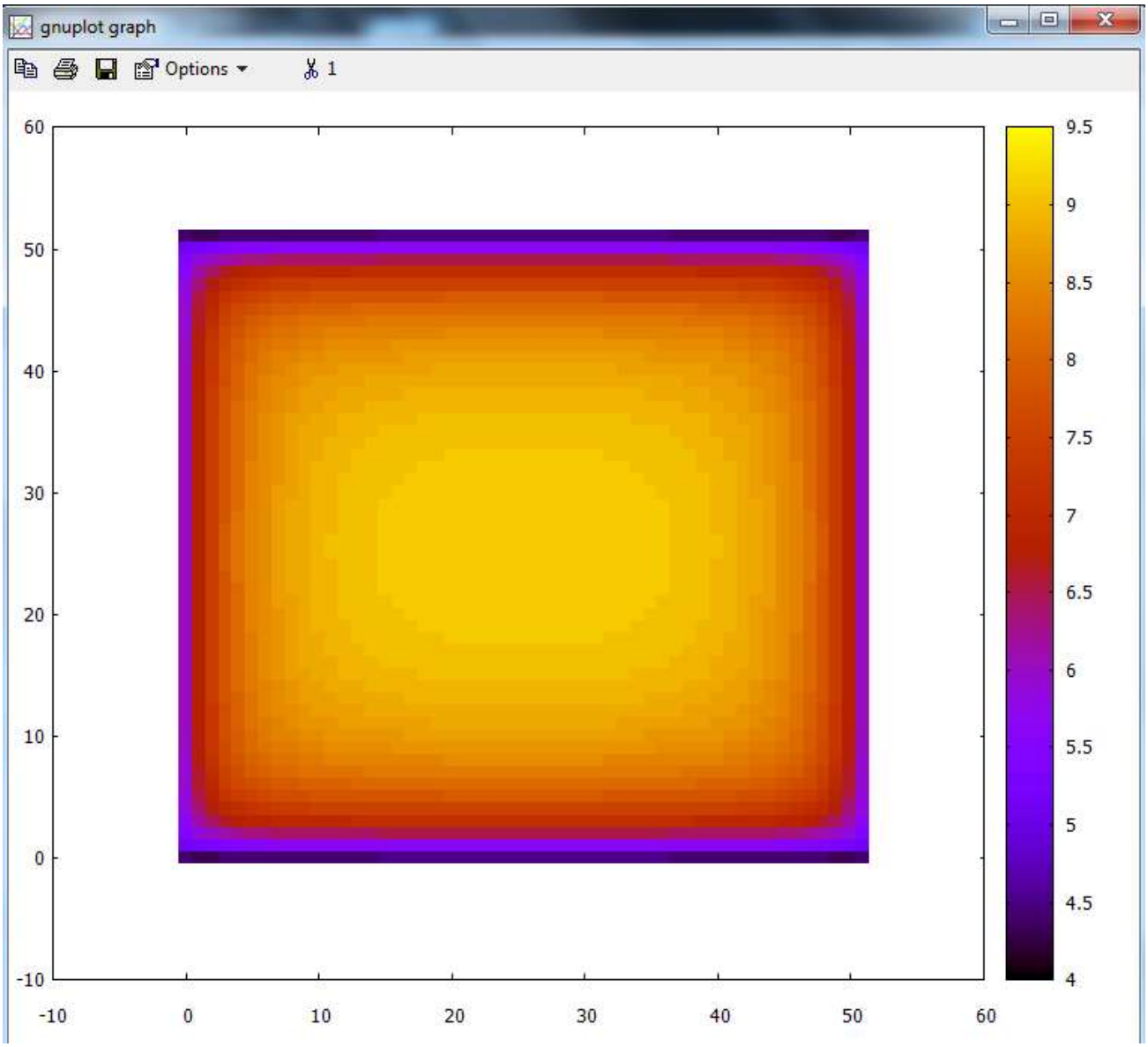
Time	gridX	gridY	gridZ
32.332243	1	1	1
52.342230	1	1	2
108.270650	1	2	2

Общий размер задачи 52 x 52 x 52

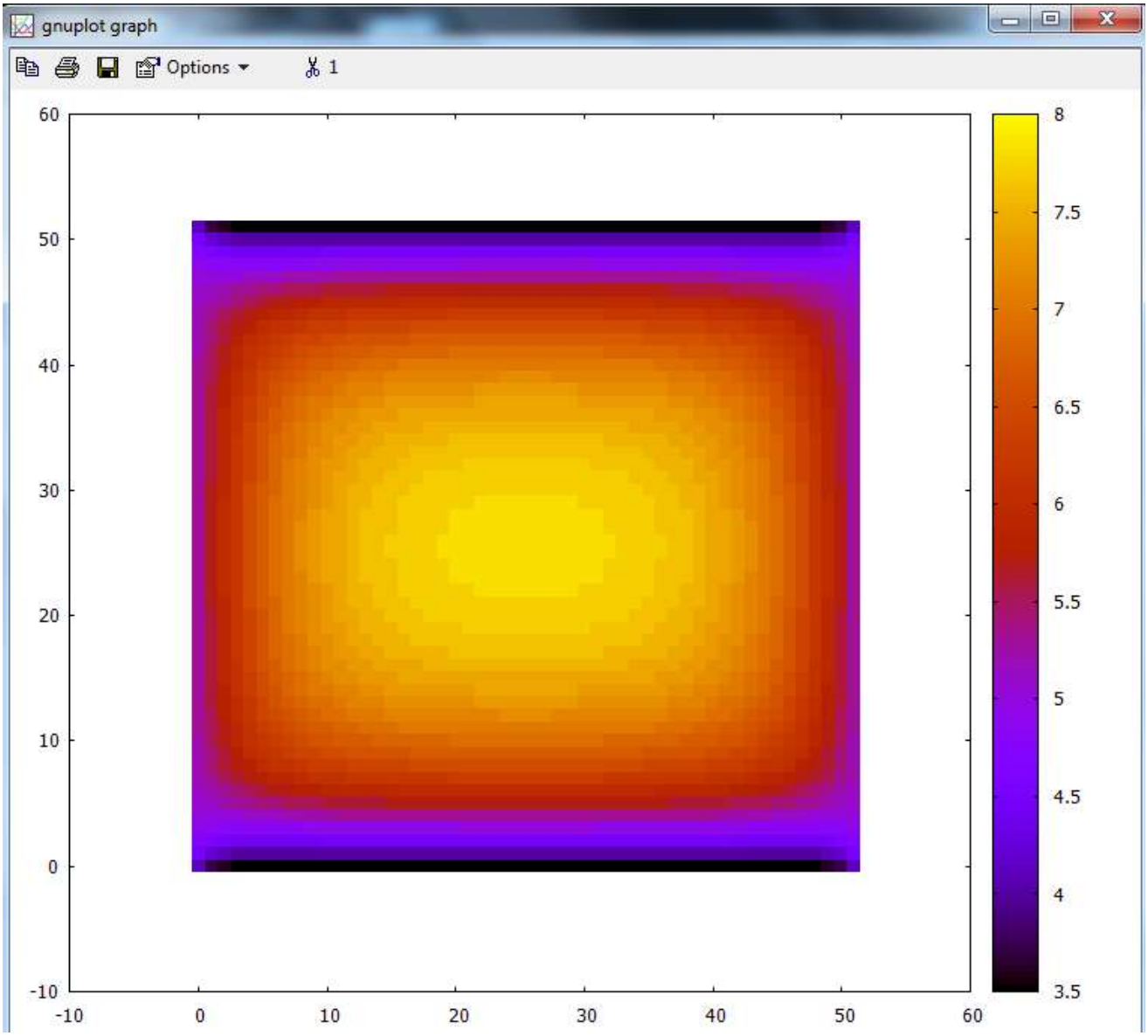
Time	gridX	gridY	gridZ
86.367333	1	1	2
166.529544	1	2	2

Температурный срез для задачи 52 x 52 x 52

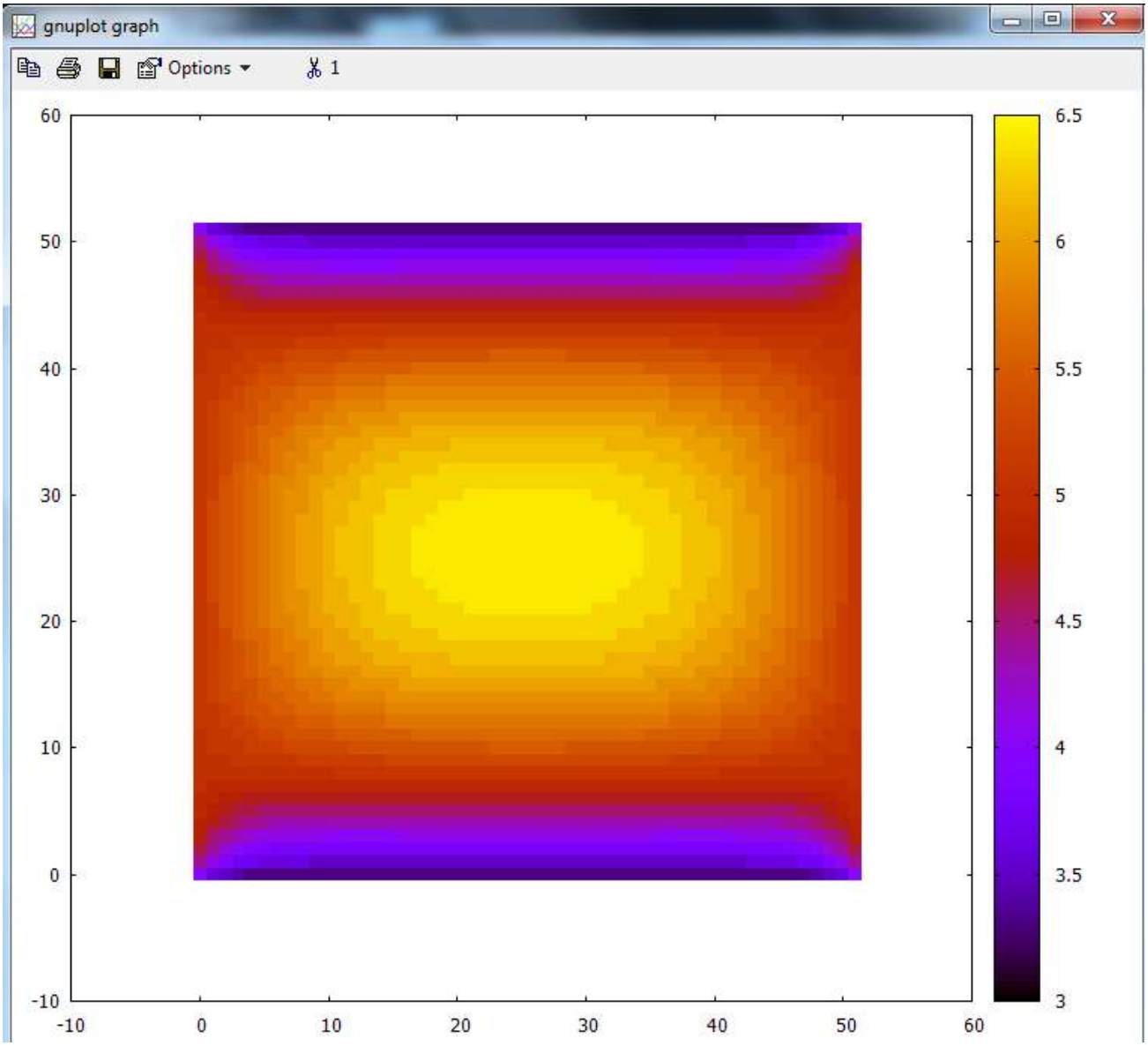
- Для z = 2



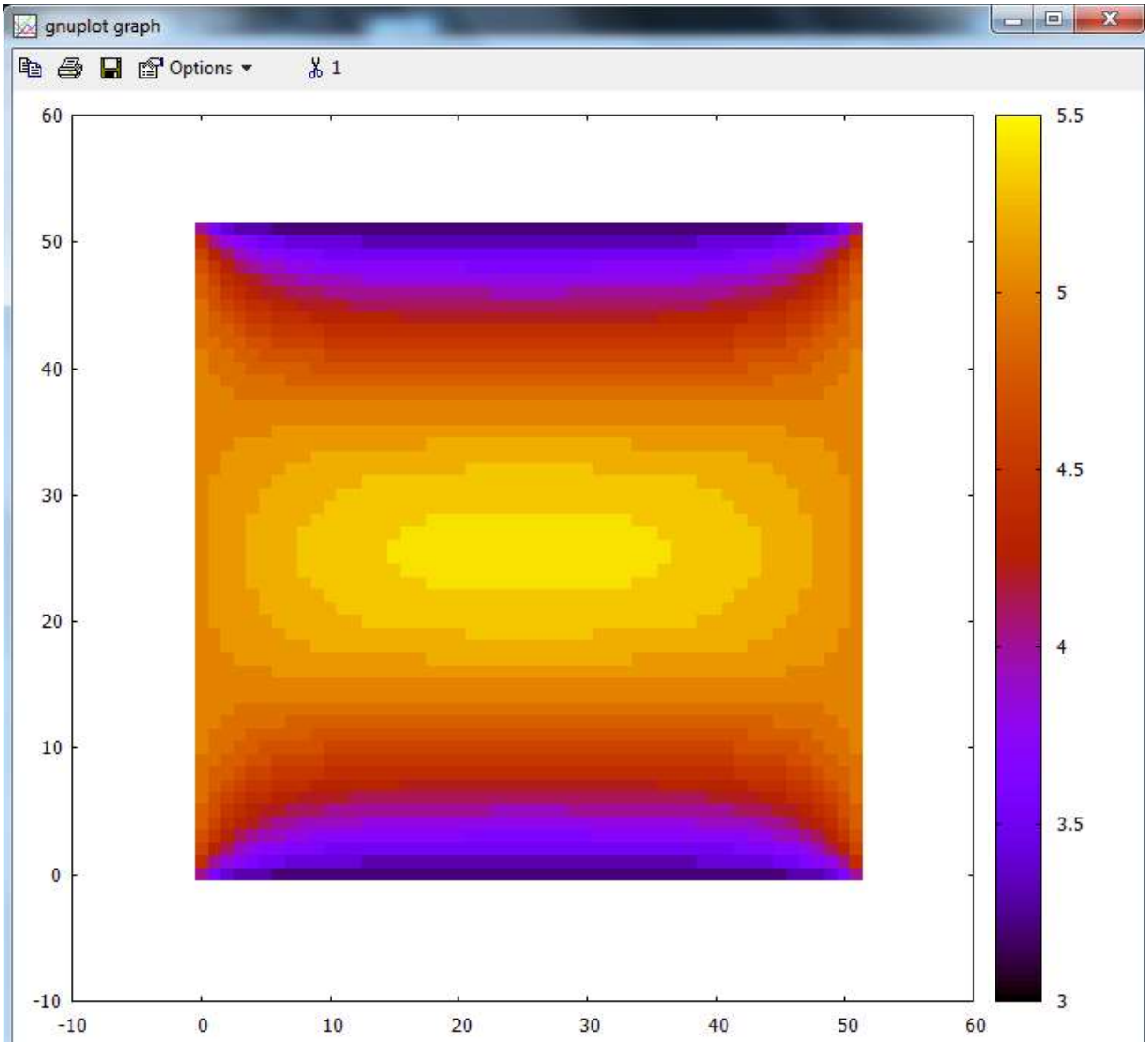
- Для z = 7


gnuplot graph
Options
1
60
50
40
30
20
10
0
-10
-10
0
10
20
30
40
50
60
8
7.5
7
6.5
6
5.5
5
4.5
4
3.5

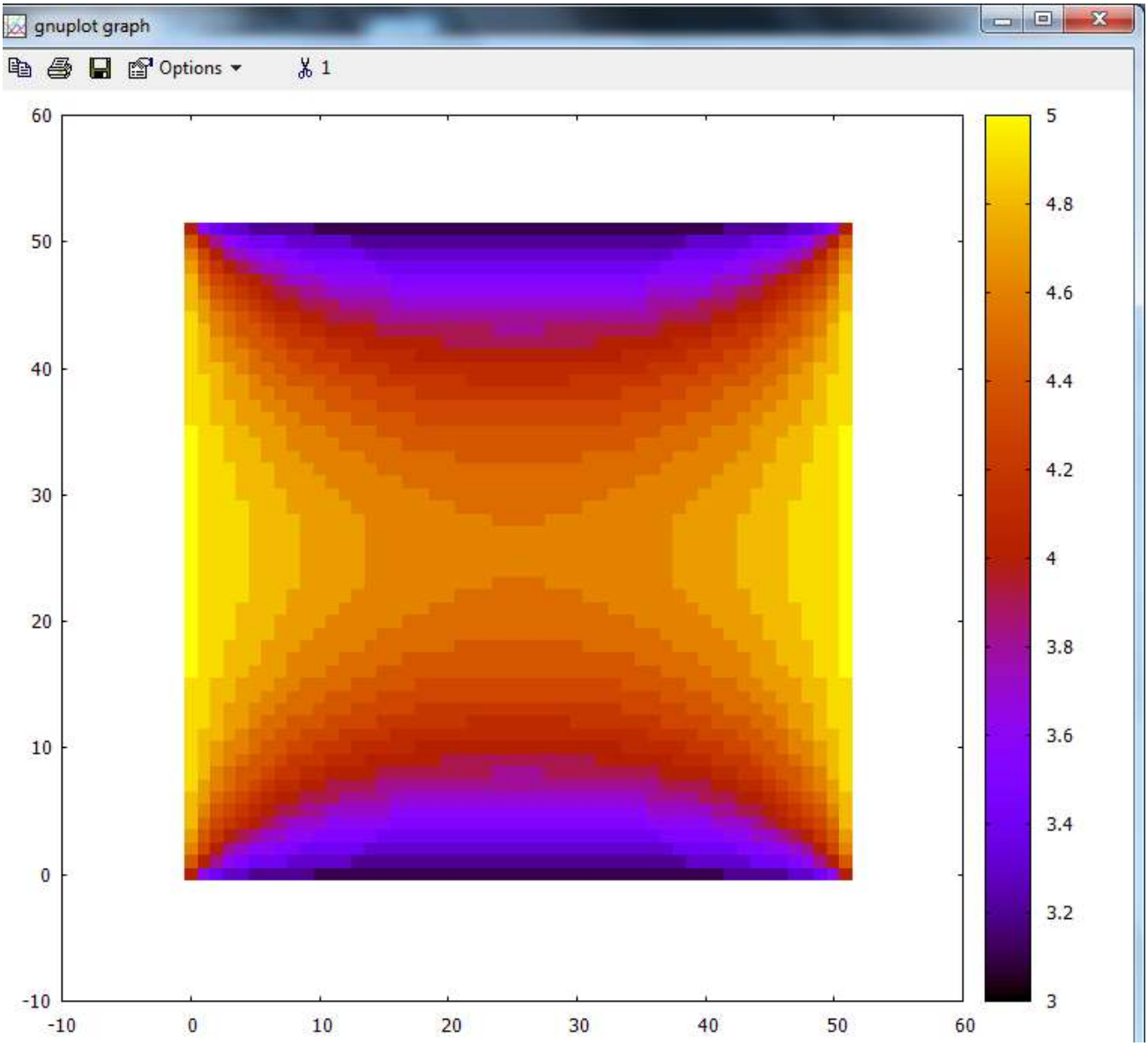
- Для z = 13


gnuplot graph
Options
1
60
50
40
30
20
10
0
-10
-10
0
10
20
30
40
50
60
6.5
6
5.5
5
4.5
4
3.5
3

- Для z = 19


gnuplot graph
Options
1
60
50
40
30
20
10
0
-10
-10
0
10
20
30
40
50
60
5.5
5
4.5
4
3.5
3

- Для z = 25


gnuplot graph
Options
1
60
50
40
30
20
10
0
-10
-10
0
10
20
30
40
50
60
5
4.8
4.6
4.4
4.2
4
3.8
3.6
3.4
3.2
3

Выводы

Сложность в программировании данной лр не испытал. Весь код был написан за 1 час. Если посмотреть на результаты замеров, то может показаться, что я написал плохую программу, которая работает слишком долго, неэффективно и при увеличении количества процессов становится только хуже. Дело в том, что я запускал на одном компьютере, а не на кластере. Каждый процесс запрашивал максимальное количество потоков через openMP, что замедляло программу. Можно заметить, что если поделить время работы программы с X процессами на время работы программы с 1 процессом, то получим число близкое к X, что доказывает мои доводы.

Технология openMP не требует глубоких знаний и легка в применении. Про MPI я бы такое не сказал. Считаю, что технологию openMP нужно знать всем программистам на C++ для быстрых оптимизаций прикладных решений в экстренных ситуациях.