

Задание 7

Отчёт

по реализации и анализу алгоритмов работы с графом в формате CSR

Ши Хуэй shihuicollapsor@gmail.com

1. Постановка задачи

Реализовать параллельное решение двумерного уравнения Лапласа (при $g = 0$) методом Якоби, запуская его на кластере Polus. Для этого необходимо построить квадратную сетку с размером N , являющимся степенью двойки, и разделить её на горизонтальные полосы, где каждый процесс будет обрабатывать свою часть, равную по ширине всей сетке. Начальные значения функции f на сетке задаются случайными числами.

Выполнить заданное количество итераций n_iter метода Якоби и на последней итерации рассчитать норму разности решений между двумя соседними шагами времени на каждом процессе.

Требования к реализации: массив, представляющий всю сетку, не должен храниться на одном процессе (за исключением случаев запуска на одном процессе). Для коммуникации следует использовать только блокирующие point-to-point методы MPI. Программу необходимо запустить с помощью `mpisubmit.pl` на кластере Polus для числа процессов $P = \{1, 2, 4, 8, 12, 16, 24, 32, 36\}$, а также собрать статистику по вызовам MPI с помощью инструмента `mpiP`.

После выполнения программы для фиксированного большого размера сетки требуется построить графики зависимости времени выполнения $T(P)$, ускорения $S(P)$ и параллельной эффективности $E(P)$ от числа процессов. На основе данных `mpiP` необходимо кратко прокомментировать полученные результаты и отметить интересные наблюдения.

2. Формат командной строки

```
mpicc -g -Wl,-rpath=/home_edu/edu-cmc-sqi22/edu-cmc-sqi22-29/sem07/mpiP-3.5 -L /  
home_edu/edu-cmc-sqi22/edu-cmc-sqi22-29/sem07/mpiP-3.5/ -lmpiP work7.c -o work7  
mpisubmit.pl -p 4 -w 00:05 ./work7
```

3. Спецификация системы

- Operating system : polus

4. Записи экспериментов и результаты

| P | T | Norm | E | P |
|----|-----------|-----------|------------------|-------------------|
| 1 | 22.175639 | 29.194801 | 1 | 1 |
| 2 | 11.166079 | 20.605502 | 1.98598263544437 | 0.992991317722185 |
| 4 | 5.641874 | 14.425558 | 3.93054488632678 | 0.982636221581695 |
| 8 | 3.015954 | 10.522345 | 7.35277759541425 | 0.919097199426781 |
| 12 | 2.133722 | 8.615898 | 10.3929373179824 | 0.866078109831867 |
| 16 | 1.710124 | 7.226677 | 12.9672696248927 | 0.810454351555794 |
| 24 | 1.563322 | 5.915069 | 14.1849465433225 | 0.591039439305104 |
| 32 | 1.322560 | 5.301516 | 16.7672082930075 | 0.523975259156484 |
| 36 | 1.260773 | 5.003528 | 17.5889228275034 | 0.488581189652872 |

P=1

Iteration 0, Norm: 331.264034

Iteration 100, Norm: 36.268891

Iteration 200, Norm: 32.455353

Iteration 300, Norm: 31.106265

Iteration 400, Norm: 30.419350

Iteration 500, Norm: 30.005285

Iteration 600, Norm: 29.730193

Iteration 700, Norm: 29.535451

Iteration 800, Norm: 29.391247

Iteration 900, Norm: 29.280809

Total execution time (T): 22.175639 seconds

Max norm after 1000 iterations: 29.194801

P=2

Iteration 0, Norm: 234.137034

Iteration 100, Norm: 25.379712

Iteration 200, Norm: 22.804827

Iteration 300, Norm: 21.905295

Iteration 400, Norm: 21.446129

Iteration 500, Norm: 21.166637

Iteration 600, Norm: 20.978767

Iteration 700, Norm: 20.844305

Iteration 800, Norm: 20.743812

Iteration 900, Norm: 20.666268

Total execution time (T): 11.166079 seconds

Max norm after 1000 iterations: 20.605502

P=4

```
[edu-cmc-sqi22-29@polus-ib sem07]$ mpicc -g -Wl,-rpath=/home_edu/edu-cmc-sqi22/edu-cmc-sqi22-29/sem07/mpiP-3.5 -L /home_edu/edu-cmc-sqi22/edu-cmc-sqi22-29/sem07/mpiP-3.5 -lmpiP work7.c -o work7
```

```
[edu-cmc-sqi22-29@polus-ib sem07]$ export MPIP="-t 10.0 -k 4"
```

```
[edu-cmc-sqi22-29@polus-ib sem07]$ mpisubmit.pl -p 4 -w 00:05 ./work7
```

Job <1212125> is submitted to default queue <short>.

```
[edu-cmc-sqi22-29@polus-ib sem07]$ cat work7.1212125.out
```

Sender: LSF System <lsfadmin@polus-c3-ib.bmc.hpc.cs.msu.ru>

Subject: Job 1212125: <# this file was automaticly created by mpisubmit.pl script for edu-cmc-sqi22-29 #;source /polusfs/setenv/setup.SMPI;#BSUB -n 4;#BSUB -W 00:05;#BSUB -o work7.%J.out;#BSUB -e work7.%J.err;OMP_NUM_THREADS=1 mpiexec ./work7> in cluster <MSUCluster> Done

Job <# this file was automaticly created by mpisubmit.pl script for edu-cmc-sqi22-29 #;source /polusfs/setenv/setup.SMPI;#BSUB -n 4;#BSUB -W 00:05;#BSUB -o work7.%J.out;#BSUB -e work7.%J.err;OMP_NUM_THREADS=1 mpiexec ./work7> was submitted from host <polus-ib.bmc.hpc.cs.msu.ru> by user <edu-cmc-sqi22-29> in cluster <MSUCluster> at Tue Nov 12 14:31:09 2024

Job was executed on host(s) <4*polus-c3-ib.bmc.hpc.cs.msu.ru>, in queue <short>, as user <edu-cmc-sqi22-29> in cluster <MSUCluster> at Tue Nov 12 14:31:10 2024

</home_edu/edu-cmc-sqi22/edu-cmc-sqi22-29> was used as the home directory.

</home_edu/edu-cmc-sqi22/edu-cmc-sqi22-29/sem07> was used as the working directory.

Started at Tue Nov 12 14:31:10 2024

Terminated at Tue Nov 12 14:31:17 2024

Results reported at Tue Nov 12 14:31:17 2024

Your job looked like:

LSBATCH: User input

this file was automaticly created by mpisubmit.pl script for edu-cmc-sqi22-29

source /polusfs/setenv/setup.SMPI

#BSUB -n 4

```
#BSUB -W 00:05
#BSUB -o work7.%J.out
#BSUB -e work7.%J.err
OMP_NUM_THREADS=1 mpiexec ./work7
```

Successfully completed.

Resource usage summary:

| | |
|---------------------------------|-------------------|
| <i>CPU time :</i> | <i>23.04 sec.</i> |
| <i>Max Memory :</i> | <i>252 MB</i> |
| <i>Average Memory :</i> | <i>168.33 MB</i> |
| <i>Total Requested Memory :</i> | <i>-</i> |
| <i>Delta Memory :</i> | <i>-</i> |
| <i>Max Swap :</i> | <i>-</i> |
| <i>Max Processes :</i> | <i>8</i> |
| <i>Max Threads :</i> | <i>21</i> |
| <i>Run time :</i> | <i>7 sec.</i> |
| <i>Turnaround time :</i> | <i>8 sec.</i> |

The output (if any) follows:

```
mpiP: Found MPIP environment variable [-t 10.0 -k 4]
mpiP: Set the report print threshold to [10.00%].
mpiP: Set the callsite stack traceback depth to [4].
mpiP:
mpiP: mpiP V3.5.0 (Build Nov 6 2024/21:55:54)
mpiP:
Iteration 0, Norm: 165.467168
Iteration 100, Norm: 17.744697
Iteration 200, Norm: 15.895827
Iteration 300, Norm: 15.274757
Iteration 400, Norm: 14.968647
Iteration 500, Norm: 14.786226
```

Iteration 600, Norm: 14.664949

Iteration 700, Norm: 14.578590

Iteration 800, Norm: 14.514174

Iteration 900, Norm: 14.464490

Total execution time (T): 5.641874 seconds

Max norm after 1000 iterations: 14.425558

mpiP:

mpiP: Storing mpiP output in [./work7.4.27294.1.mpiP].

mpiP:

PS:

Read file <work7.1212125.err> for stderr output of this job.

[edu-cmc-sqi22-29@polus-ib sem07]\$ cat ./work7.4.27294.1.mpiP

@ mpiP

@ Command : ./work7

@ Version : 3.5.0

@ MPIP Build date : Nov 6 2024, 21:55:54

@ Start time : 2024 11 12 14:31:10

@ Stop time : 2024 11 12 14:31:16

@ Timer Used : gettimeofday

@ MPIP env var : -t 10.0 -k 4

@ Collector Rank : 0

@ Collector PID : 27294

@ Final Output Dir : .

@ Report generation : Single collector task

@ MPI Task Assignment : 0 polus-c3-ib.bmc.hpc.cs.msu.ru

@ MPI Task Assignment : 1 polus-c3-ib.bmc.hpc.cs.msu.ru

@ MPI Task Assignment : 2 polus-c3-ib.bmc.hpc.cs.msu.ru

@ MPI Task Assignment : 3 polus-c3-ib.bmc.hpc.cs.msu.ru

@--- MPI Time (seconds) -----

| <i>Task</i> | <i>AppTime</i> | <i>MPITime</i> | <i>MPI%</i> |
|-------------|----------------|----------------|-------------|
| 0 | 5.65 | 0.0309 | 0.55 |
| 1 | 5.65 | 0.0812 | 1.44 |
| 2 | 5.65 | 0.0507 | 0.90 |
| 3 | 5.65 | 0.0811 | 1.44 |
| * | 22.6 | 0.244 | 1.08 |

@--- Callsites: 6 -----

| <i>ID</i> | <i>Lev</i> | <i>File/Address</i> | <i>Line</i> | <i>Parent_Funct</i> | <i>MPI_Call</i> |
|-----------|------------|---------------------|-------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 0 | 0x1000000ad94c | | [unknown] | Allreduce |
| 1 | 1 | 0x1000000bb884 | | [unknown] | |
| 1 | 2 | 0x10001528 | | [unknown] | |
| 1 | 3 | 0x1000007d4978 | | [unknown] | |
| 2 | 0 | 0x1000000b66dc | | [unknown] | Recv |
| 2 | 1 | 0x1000000bf3b8 | | [unknown] | |
| 2 | 2 | 0x100014c0 | | [unknown] | |
| 2 | 3 | 0x1000007d4978 | | [unknown] | |
| 3 | 0 | 0x1000000b6c2c | | [unknown] | Reduce |
| 3 | 1 | 0x1000000bf65c | | [unknown] | |
| 3 | 2 | 0x100015fc | | [unknown] | |
| 3 | 3 | 0x1000007d4978 | | [unknown] | |
| 4 | 0 | 0x1000000b821c | | [unknown] | Send |
| 4 | 1 | 0x1000000c0064 | | [unknown] | |
| 4 | 2 | 0x100014fc | | [unknown] | |
| 4 | 3 | 0x1000007d4978 | | [unknown] | |
| 5 | 0 | 0x1000000b821c | | [unknown] | Send |
| 5 | 1 | 0x1000000c0064 | | [unknown] | |
| 5 | 2 | 0x1000142c | | [unknown] | |
| 5 | 3 | 0x1000007d4978 | | [unknown] | |
| 6 | 0 | 0x1000000b66dc | | [unknown] | Recv |
| 6 | 1 | 0x1000000bf3b8 | | [unknown] | |
| 6 | 2 | 0x10001458 | | [unknown] | |
| 6 | 3 | 0x1000007d4978 | | [unknown] | |

@--- Aggregate Time (top twenty, descending, milliseconds) -----

| <i>Call</i> | <i>Site</i> | <i>Time</i> | <i>App%</i> | <i>MPI%</i> | <i>Count</i> | <i>COV</i> |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------|
| <i>Recv</i> | 6 | 181 | 0.80 | 74.23 | 3000 | 0.31 |
| <i>Allreduce</i> | 1 | 29.3 | 0.13 | 12.00 | 4000 | 0.76 |
| <i>Recv</i> | 2 | 19.6 | 0.09 | 8.04 | 3000 | 1.07 |
| <i>Send</i> | 5 | 8.3 | 0.04 | 3.40 | 3000 | 0.46 |
| <i>Send</i> | 4 | 5.38 | 0.02 | 2.20 | 3000 | 0.17 |
| <i>Reduce</i> | 3 | 0.299 | 0.00 | 0.12 | 4 | 0.03 |

@--- Aggregate Sent Message Size (top twenty, descending, bytes) -----

| <i>Call</i> | <i>Site</i> | <i>Count</i> | <i>Total</i> | <i>Avrg</i> | <i>Sent%</i> |
|------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| <i>Send</i> | 4 | 3000 | 2.46e+07 | 8.19e+03 | 49.97 |
| <i>Send</i> | 5 | 3000 | 2.46e+07 | 8.19e+03 | 49.97 |
| <i>Allreduce</i> | 1 | 4000 | 3.2e+04 | 8 | 0.07 |
| <i>Reduce</i> | 3 | 4 | 32 | 8 | 0.00 |

@--- Callsite Time statistics (all, milliseconds): 20 -----

| <i>Name</i> | <i>Site</i> | <i>Rank</i> | <i>Count</i> | <i>Max</i> | <i>Mean</i> | <i>Min</i> | <i>App%</i> | <i>MPI%</i> |
|------------------|-------------|-------------|--------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| <i>Allreduce</i> | 1 | 0 | 1000 | 0.411 | 0.0141 | 0.008 | 0.25 | 45.68 |
| <i>Allreduce</i> | 1 | 1 | 1000 | 0.409 | 0.00946 | 0.005 | 0.17 | 11.65 |
| <i>Allreduce</i> | 1 | * | 4000 | 0.411 | 0.00732 | 0.002 | 0.13 | 12.00 |
| <i>Recv</i> | 2 | 0 | 1000 | 5.04 | 0.0146 | 0.002 | 0.26 | 47.12 |
| <i>Recv</i> | 2 | * | 3000 | 5.04 | 0.00654 | 0 | 0.09 | 8.04 |
| <i>Recv</i> | 6 | 1 | 1000 | 2.04 | 0.064 | 0.002 | 1.13 | 78.83 |
| <i>Recv</i> | 6 | 2 | 1000 | 5.07 | 0.0402 | 0.003 | 0.71 | 79.35 |
| <i>Recv</i> | 6 | 3 | 1000 | 2.04 | 0.0768 | 0.003 | 1.36 | 94.71 |
| <i>Recv</i> | 6 | * | 3000 | 5.07 | 0.0603 | 0.002 | 0.80 | 74.23 |
| <i>Reduce</i> | 3 | * | 4 | 0.077 | 0.0747 | 0.073 | 0.00 | 0.12 |
| <i>Send</i> | 4 | * | 3000 | 0.019 | 0.00179 | 0.001 | 0.02 | 2.20 |

Send 5 * 3000 0.617 0.00277 0.001 0.04 3.40

@--- Callsite Message Sent statistics (all, sent bytes) -----

| Name | Site | Rank | Count | Max | Mean | Min | Sum |
|-----------|------|------|-------|-----|------|-----|---------|
| Allreduce | 1 | 0 | 1000 | 8 | 8 | 8 | 8000 |
| Allreduce | 1 | 1 | 1000 | 8 | 8 | 8 | 8000 |
| Allreduce | 1 | 2 | 1000 | 8 | 8 | 8 | 8000 |
| Allreduce | 1 | 3 | 1000 | 8 | 8 | 8 | 8000 |
| Allreduce | 1 | * | 4000 | 8 | 8 | 8 | 3.2e+04 |

| | | | | | | | |
|--------|---|---|---|---|---|---|----|
| Reduce | 3 | 0 | 1 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Reduce | 3 | 1 | 1 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Reduce | 3 | 2 | 1 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Reduce | 3 | 3 | 1 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Reduce | 3 | * | 4 | 8 | 8 | 8 | 32 |

| | | | | | | | |
|------|---|---|------|------|------|------|-----------|
| Send | 4 | 0 | 1000 | 8192 | 8192 | 8192 | 8.192e+06 |
| Send | 4 | 1 | 1000 | 8192 | 8192 | 8192 | 8.192e+06 |
| Send | 4 | 2 | 1000 | 8192 | 8192 | 8192 | 8.192e+06 |
| Send | 4 | * | 3000 | 8192 | 8192 | 8192 | 2.458e+07 |

| | | | | | | | |
|------|---|---|------|------|------|------|-----------|
| Send | 5 | 1 | 1000 | 8192 | 8192 | 8192 | 8.192e+06 |
| Send | 5 | 2 | 1000 | 8192 | 8192 | 8192 | 8.192e+06 |
| Send | 5 | 3 | 1000 | 8192 | 8192 | 8192 | 8.192e+06 |
| Send | 5 | * | 3000 | 8192 | 8192 | 8192 | 2.458e+07 |

@--- End of Report -----

[edu-cmc-sqi22-29@polus-ib sem07]\$

P=8

Iteration 0, Norm: 117.466912

Iteration 100, Norm: 12.846925

Iteration 200, Norm: 11.542179

Iteration 300, Norm: 11.095953

Iteration 400, Norm: 10.879834
Iteration 500, Norm: 10.754660
Iteration 600, Norm: 10.673772
Iteration 700, Norm: 10.617641
Iteration 800, Norm: 10.576751
Iteration 900, Norm: 10.545930
Total execution time (T): 3.015954 seconds
Max norm after 1000 iterations: 10.522345

P=12

Iteration 0, Norm: 96.273998
Iteration 100, Norm: 10.518011
Iteration 200, Norm: 9.434790
Iteration 300, Norm: 9.066519
Iteration 400, Norm: 8.892407
Iteration 500, Norm: 8.793427
Iteration 600, Norm: 8.730321
Iteration 700, Norm: 8.687108
Iteration 800, Norm: 8.656117
Iteration 900, Norm: 8.633160
Total execution time (T): 2.133722 seconds
Max norm after 1000 iterations: 8.615898

P=16

Iteration 0, Norm: 83.111309
Iteration 100, Norm: 8.753444
Iteration 200, Norm: 7.860612
Iteration 300, Norm: 7.551130
Iteration 400, Norm: 7.406410
Iteration 500, Norm: 7.329137
Iteration 600, Norm: 7.284914
Iteration 700, Norm: 7.258601
Iteration 800, Norm: 7.242589
Iteration 900, Norm: 7.232724
Total execution time (T): 1.710124 seconds
Max norm after 1000 iterations: 7.226677

P=24

Iteration 0, Norm: 68.301926

Iteration 100, Norm: 7.342386

Iteration 200, Norm: 6.627904

Iteration 300, Norm: 6.353904

Iteration 400, Norm: 6.205686

Iteration 500, Norm: 6.111614

Iteration 600, Norm: 6.046458

Iteration 700, Norm: 5.998997

Iteration 800, Norm: 5.963353

Iteration 900, Norm: 5.936056

Total execution time (T): 1.563322 seconds

Max norm after 1000 iterations: 5.915069

p=32

Iteration 0, Norm: 59.026604

Iteration 100, Norm: 6.147985

Iteration 200, Norm: 5.632218

Iteration 300, Norm: 5.478070

Iteration 400, Norm: 5.409192

Iteration 500, Norm: 5.370706

Iteration 600, Norm: 5.346143

Iteration 700, Norm: 5.329205

Iteration 800, Norm: 5.317016

Iteration 900, Norm: 5.308064

Total execution time (T): 1.322560 seconds

Max norm after 1000 iterations: 5.301516

P=36

Iteration 0, Norm: 56.193612

Iteration 100, Norm: 5.838168

Iteration 200, Norm: 5.390212

Iteration 300, Norm: 5.238957

Iteration 400, Norm: 5.160214

Iteration 500, Norm: 5.111098

Iteration 600, Norm: 5.077115

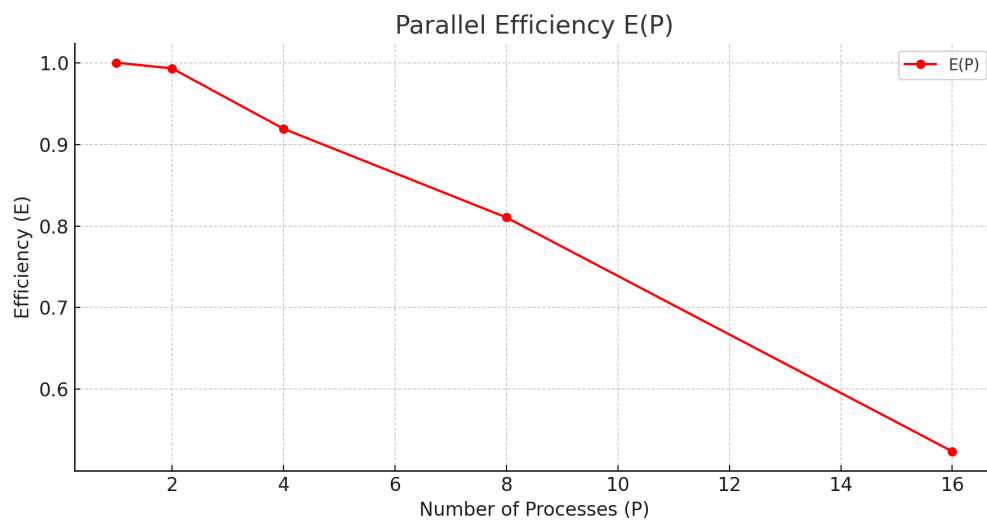
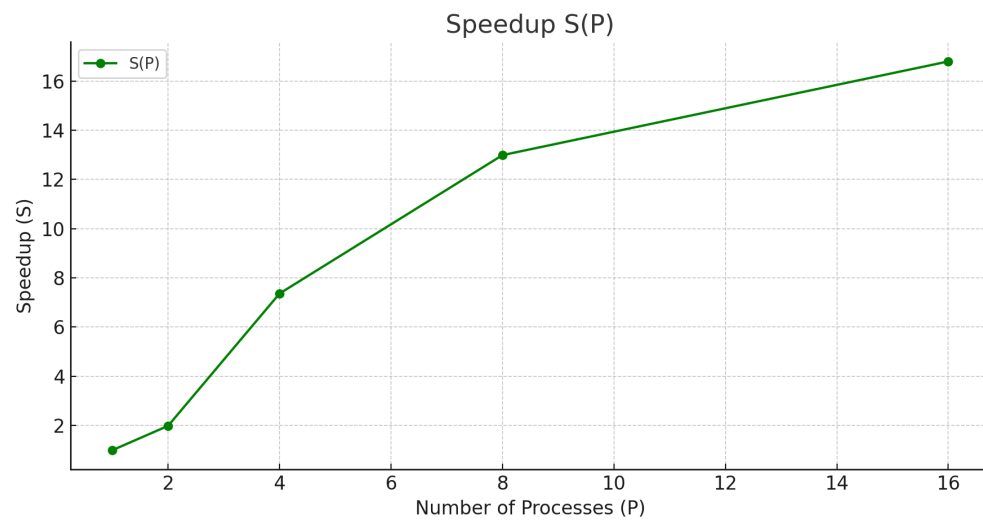
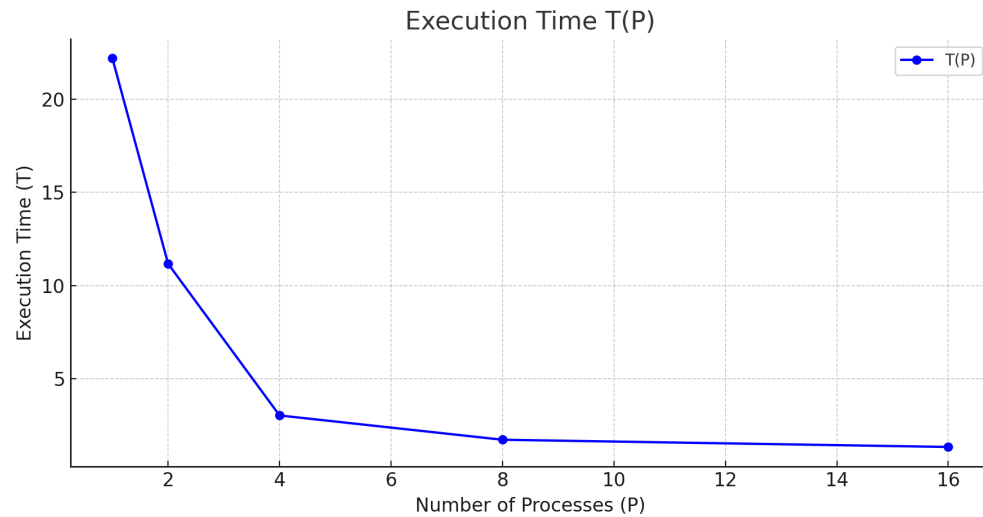
Iteration 700, Norm: 5.051919

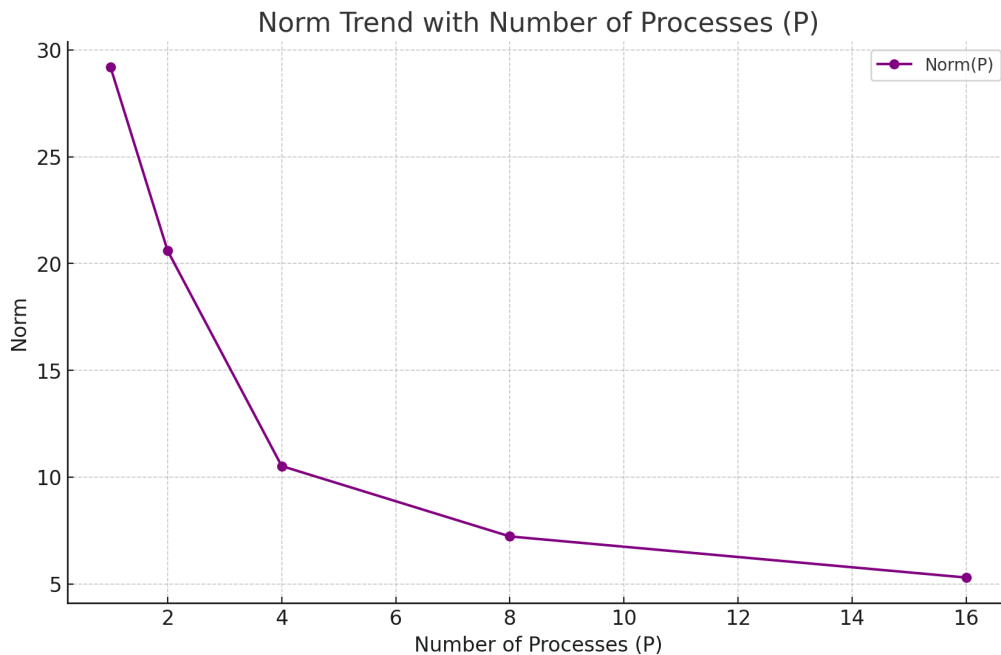
Iteration 800, Norm: 5.032307

Iteration 900, Norm: 5.016492

Total execution time (T): 1.260773 seconds

Max norm after 1000 iterations: 5.003528





6. Заключение

С увеличением числа процессов время выполнения уменьшается, ускорение растет, но параллельная эффективность демонстрирует тенденцию к снижению. Это соответствует типичному явлению в параллельных вычислениях — эффекту убывающей отдачи от параллелизма.

При увеличении числа процессов коммуникационные затраты и время ожидания синхронизации могут возрастать, что приводит к снижению прироста эффективности и увеличению времени выполнения. Особенно заметен аномальный скачок времени выполнения при 24 процессах, что, возможно, связано с дополнительными затратами на коммуникацию.

При использовании более 16 процессов параллельная эффективность начинает значительно снижаться, что указывает на ограниченность эффективности параллельного вычисления для данной задачи при увеличении числа процессов. Это означает, что при большом числе процессов параллелизация может перестать давать существенные преимущества.

По мере увеличения количества процессов нормальное значение постепенно уменьшается. Это показывает, что по мере увеличения точности вычислений и количества процессов остаточный результат итерации постепенно уменьшается, что свидетельствует о том, что параллельные вычисления эффективно приближаются к решению задачи. Однако из-за снижения вычислительной эффективности размер разделенной сетки может быть соответствующим образом скорректирован.