МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет информационных технологий

Кафедра параллельных вычислений

ОТЧЕТ

О ВЫПОЛНЕНИИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

«Умножение матриц средствами MPI на декартовой решётке процессов»

студента 2 курса, группы 20205

Муратова Максима Александровича

Направление 09.03.01 – «Информатика и вычислительная техника»

Преподаватель:
доцент
Власенко А. Ю.

Новосибирск, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ЦЕЛИ

1. Найти зависимость времени выполнения параллельной программы от размеров декартовой решётки процессов при одинаковом числе процессов;
2. Проанализировать, как эффективно используется время для выполнения программы.

ЗАДАНИЕ

1. Вычислительное задание – умножение двух матриц A и B размерами NxK и KxM соответственно;
2. N=3000, M=3600, N=4200;
3. Число процессов – 24. Решётки – 2x12, 3x8, 4x6, 6x4, 8x3, 12x2;
4. Профилировщиком Intel Trace Analyzer and Collector (ITAC) пропрофилировать программу на решётках 2x4 и 4x2.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

Исходный код программы содержится в единственном файле `parallel.cpp` (приложение 1). Программа сама позаботится о том, чтобы число процессов было равно размеру решётки. При разных соотношениях длин сторон решётки итоговая матрица C=AxB собирается по-разному: сборка начинается с более «длинной» стороны. Сборку программы можно осуществить при помощи помощи утилиты make, конфигурация Makefile доступна в приложении 2.

В приложении 3 описаны скрипты для постановки задачи в очередь выполнения кластером, причём как для вычисления на разных решётках, так и для профилирования.

Скрипт run.sh умножает матрицы на заданных решётках в 3 круга, их время выполнения записывается в файл `report.txt`. Умножение на разных решётках специально объединено в один скрипт, чтобы умножения производились на одних и тех же узлах кластера. На эту задачу выделяется 18 минут. Скрипт не нуждается в модификации при смене размерности решётки по указанной выше причине. Лучшие результаты вычислений доступны в приложении 4.

Для определения основных факторов, замедляющих программу, было проведено профилирование на решётках процессов 2x4 и 4x2. За профилирование отвечает скрипт `trace.sh` из приложения 4, при необходимости изменения решётки процессов требует модификации скрипта. Результаты профилирования доступны в приложении 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При использовании декартовой решётки процессов для перемножения матриц следует использовать решётку с минимальной разницей длин сторон решётки (в идеале – квадратную решётку), чтобы добиться максимальной производительности;
2. Основная причина потери времени – ожидание данных при сборке итоговой матрицы C.

Приложение 1. *parallel.cpp*
Исходный код программы

```
#include <mpi.h>
#include <iostream>
#include <climits>

double random_double() {
        return rand() / (double) INT_MAX * 200 - 100;
}

std::ostream &print_matrix(const double *matrix, int rows, int columns, std::ostream &out)
{
        for(int x = 0; x < rows; x++) {
                out << matrix[x * columns];
                for(int y = 1; y < columns; y++)
                        out << '\t' << matrix[x * columns + y];
                out << '\n';
        }
        return out;
}

int main(int argc, char **argv) {
        if(argc != 6) {
                std::cerr << "Got " << argc << " argument(s) instead of 5\n";
                return 1;
        }

        MPI_Init(&argc, &argv);
        double start_time = MPI_Wtime();
        int n = atoi(argv[1]);
        int k = atoi(argv[2]);
        int m = atoi(argv[3]);
        const int DIM = 2;
        int dims[DIM], periods[DIM], reorder = 0;
        int process_count; MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &process_count);
        int non_grid_rank; MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &non_grid_rank);

        for(int index = 0; index < DIM; index++) {
                dims[index] = atoi(argv[index + 4]);
                periods[index] = 1;
        }
        if(process_count != dims[0] * dims[1]) {
                if(!non_grid_rank)
                        std::cerr << "Expected " << (dims[0] * dims[1]) «
                            " processes, got " << process_count << '\n';
                MPI_Finalize();
                return 1;
        }
        if(n % dims[0] != 0) {
                if(!non_grid_rank)
                        std::cerr << n << " N==" << n << " must be divisible by " <<
                            dims[0] << '\n';
                MPI_Finalize();
                return 1;
        }
        if(m % dims[1] != 0) {
                if(!non_grid_rank)
                        std::cerr << "M==" << m << " must be divisible by " << dims[1]
                    << '\n';
```

```
        MPI_Finalize();
        return 1;
}
MPI_Comm grid_comm, column_comm, row_comm;
MPI_Cart_create(MPI_COMM_WORLD, DIM, dims, periods, reorder, &grid_comm);
int coords[DIM], sub_dims[DIM];
MPI_Cart_coords(grid_comm, non_grid_rank, DIM, coords);
sub_dims[0] = 0; sub_dims[1] = 1;
MPI_Cart_sub(grid_comm, sub_dims, &row_comm);
sub_dims[0] = 1; sub_dims[1] = 0;
MPI_Cart_sub(grid_comm, sub_dims, &column_comm);

double *A = NULL, *B = NULL, *C = NULL;
double *sub_A = NULL, *sub_B = NULL, *sub_C = NULL;
int sub_n = n / dims[0];
int sub_m = m / dims[1];
sub_A = new double[sub_n * k];
sub_B = new double[k * sub_m];
sub_C = new double[sub_n * sub_m];

if(!coords[0] && !coords[1]) {
        A = new double[n * k];
        B = new double[k * m];
        C = new double[n * m];
        srand(time(0));

        for(int index = 0; index < n * k; index++)
                A[index] = random_double();
        for(int index = 0; index < k * m; index++)
                B[index] = random_double();
}

MPI_Datatype SUB_A;
MPI_Type_contiguous(sub_n * k, MPI_DOUBLE, &SUB_A);
MPI_Type_commit(&SUB_A);
if(!coords[1])
        MPI_Scatter(A, 1, SUB_A, sub_A, 1, SUB_A, 0, column_comm);
MPI_Bcast(sub_A, 1, SUB_A, 0, row_comm);
MPI_Type_free(&SUB_A);

MPI_Datatype SUB_B;
const int MSG_ID = 12;
MPI_Type_vector(k, sub_m, m, MPI_DOUBLE, &SUB_B);
MPI_Type_commit(&SUB_B);
MPI_Datatype SUB_B_CONTIGUOUS;
MPI_Type_contiguous(k * sub_m, MPI_DOUBLE, &SUB_B_CONTIGUOUS);
MPI_Type_commit(&SUB_B_CONTIGUOUS);
if(!coords[0] && !coords[1]) {
        for(int row = 0; row < k; row++) {
                for(int column = 0; column < sub_m; column++)
                        sub_B[row * sub_m + column] = B[row * m + column];
        }
        for(int index = 1; index < dims[1]; index++)
                MPI_Send(B + sub_m * index, 1, SUB_B, index, MSG_ID, row_comm);
}
if(!coords[0] && coords[1]) {
        MPI_Status status;
        MPI_Recv(sub_B, 1, SUB_B_CONTIGUOUS, 0, MSG_ID, row_comm, &status);
}
MPI_Bcast(sub_B, 1, SUB_B_CONTIGUOUS, 0, column_comm);
MPI_Type_free(&SUB_B);
```

```
MPI_Type_free(&SUB_B_CONTIGUOUS);


for(int row = 0; row < sub_n; row++) {
        for(int column = 0; column < sub_m; column++) {
                int current_row = row * sub_m;
                sub_C[current_row + column] = 0;
                for(int index = 0; index < k; index++) {
                        sub_C[current_row + column] += sub_A[row * k + index] *
                             sub_B[index * sub_m + column];
                }
        }
}
delete[] sub_A;
delete[] sub_B;

MPI_Datatype SUB_C_MINOR;
MPI_Type_contiguous(sub_n * sub_m, MPI_DOUBLE, &SUB_C_MINOR);
MPI_Type_commit(&SUB_C_MINOR);

if(dims[0] > dims[1]) {
        MPI_Datatype SUB_C_ROWS, SUB_C;
        MPI_Type_contiguous(sub_n * m, MPI_DOUBLE, &SUB_C_ROWS);
        MPI_Type_commit(&SUB_C_ROWS);
        MPI_Type_vector(sub_n, sub_m, m, MPI_DOUBLE, &SUB_C);
        MPI_Type_commit(&SUB_C);
        double *sub_C_rows = NULL;
        if(!coords[1]) {
                sub_C_rows = new double[sub_n * m];
                for(int row = 0; row < sub_n; row++) {
                        for(int column = 0; column < sub_m; column++) {
                                sub_C_rows[row * m + column] =
                                     sub_C[row * sub_m + column];
                        }
                }
                MPI_Status status;
                for(int index = 1; index < dims[1]; index++)
                        MPI_Recv(sub_C_rows + sub_m * index, 1, SUB_C, index,
                             MSG_ID, row_comm, &status);
        }
        else MPI_Send(sub_C, 1, SUB_C_MINOR, 0, MSG_ID, row_comm);

        if(!coords[1])
                MPI_Gather(sub_C_rows, 1, SUB_C_ROWS, C, 1, SUB_C_ROWS, 0,
                    column_comm);

        MPI_Type_free(&SUB_C_ROWS);
        MPI_Type_free(&SUB_C);
        delete[] sub_C_rows;
}
else {
        MPI_Datatype SUB_C_COLUMNS, SUB_C_COLUMNS_CONTIGUOUS;
        MPI_Type_vector(n, sub_m, m, MPI_DOUBLE, &SUB_C_COLUMNS);
        MPI_Type_commit(&SUB_C_COLUMNS);
        MPI_Type_contiguous(n * sub_m, MPI_DOUBLE, &SUB_C_COLUMNS_CONTIGUOUS);
        MPI_Type_commit(&SUB_C_COLUMNS_CONTIGUOUS);
        double *sub_C_columns = NULL;
        if(!coords[0])
                sub_C_columns = new double[n * sub_m];

        MPI_Gather(sub_C, 1, SUB_C_MINOR, sub_C_columns, 1, SUB_C_MINOR, 0,
```

```
                        column_comm);

                if(!coords[0]) {
                        if(!coords[1]) {
                                for(int row = 0; row < n; row++) {
                                        for(int column = 0; column < sub_m; column++)
                                                C[row * m + column] =
                                                        sub_C_columns[row * sub_m + column];
                                }
                                MPI_Status status;
                                for(int index = 1; index < dims[1]; index++)
                                        MPI_Recv(C + sub_m * index, 1, SUB_C_COLUMNS,
                                                index, MSG_ID, row_comm, &status);
                        }
                        else MPI_Send(sub_C_columns, 1, SUB_C_COLUMNS_CONTIGUOUS, 0,
                                MSG_ID, row_comm);
                }

                delete[] sub_C_columns;
                MPI_Type_free(&SUB_C_COLUMNS);
                MPI_Type_free(&SUB_C_COLUMNS_CONTIGUOUS);
        }
        MPI_Type_free(&SUB_C_MINOR);


        if(!non_grid_rank) {
                print_matrix(C, n, m, std::cout);
                double end_time = MPI_Wtime();
                std::cerr << "It took " << end_time - start_time << " seconds\n";
        }
        delete[] A;
        delete[] B;
        delete[] C;
        delete[] sub_C;

        MPI_Finalize();
        return 0;
}
```

Приложение 2. *Makefile*

Файл сборки проекта

```
CXX=g++
CXXP=mpicxx
CFLAGS=-O3 -Wall -c

SERIES_SOURCE=series
PARALLEL_SOURCE=parallel

all: parallel

parallel: $(PARALLEL_SOURCE).o
	$(CXXP) $(PARALLEL_SOURCE).o -o $(PARALLEL_SOURCE)

$(PARALLEL_SOURCE).o: $(PARALLEL_SOURCE).cpp
	$(CXXP) $(CFLAGS) $(PARALLEL_SOURCE).cpp -o $(PARALLEL_SOURCE).o

clean:
	rm -rf *.o
```

- run.sh

```
#!/bin/bash

#PBS -l walltime=00:18:00
#PBS -l select=2:ncpus=12:mpiprocs=12:mem=2000m,place=scatter
#PBS -m n


cd $PBS_O_WORKDIR

MPI_NP=$(wc -l $PBS_NODEFILE | awk '{ print $1 }')
echo "Number of MPI processes: $MPI_NP"

N=3000
K=3600
M=4200

echo 'File $PBS_NODEFILE:'
cat  $PBS_NODEFILE

for (( i = 0; i < 3; i++ )); do
        ROWS=2
        COLUMNS=12
        echo -n -e "$ROWS\t$COLUMNS\t" >> report.txt
        mpirun -machinefile $PBS_NODEFILE -np $MPI_NP ./parallel \
                        $N $K $M $ROWS $COLUMNS >/dev/null 2>>report.txt
        ROWS=3
        COLUMNS=8
        echo -n -e "$ROWS\t$COLUMNS\t" >> report.txt
        mpirun -machinefile $PBS_NODEFILE -np $MPI_NP ./parallel \
                        $N $K $M $ROWS $COLUMNS >/dev/null 2>>report.txt
        ROWS=4
        COLUMNS=6
        echo -n -e "$ROWS\t$COLUMNS\t" >> report.txt
        mpirun -machinefile $PBS_NODEFILE -np $MPI_NP ./parallel \
                        $N $K $M $ROWS $COLUMNS >/dev/null 2>>report.txt
        ROWS=6
        COLUMNS=4
        echo -n -e "$ROWS\t$COLUMNS\t" >> report.txt
        mpirun -machinefile $PBS_NODEFILE -np $MPI_NP ./parallel \
                        $N $K $M $ROWS $COLUMNS >/dev/null 2>>report.txt
        ROWS=8
        COLUMNS=3
        echo -n -e "$ROWS\t$COLUMNS\t" >> report.txt
        mpirun -machinefile $PBS_NODEFILE -np $MPI_NP ./parallel \
                        $N $K $M $ROWS $COLUMNS >/dev/null 2>>report.txt
        ROWS=12
        COLUMNS=2
        echo -n -e "$ROWS\t$COLUMNS\t" >> report.txt
        mpirun -machinefile $PBS_NODEFILE -np $MPI_NP ./parallel \
                        $N $K $M $ROWS $COLUMNS >/dev/null 2>>report.txt
done
```

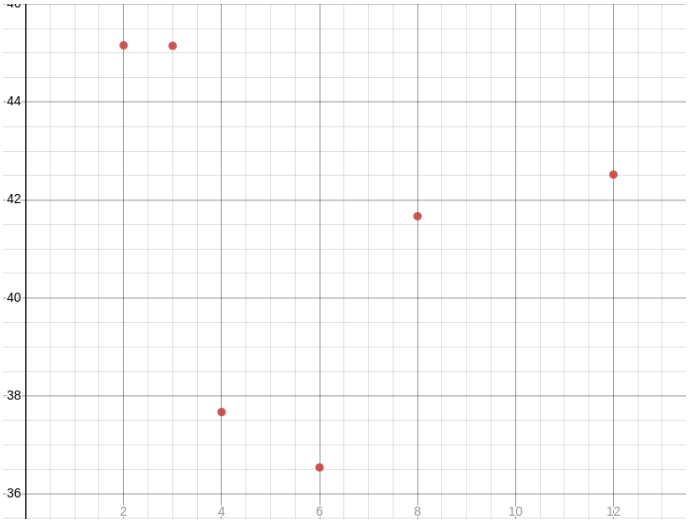
- trace.sh

```
#!/bin/bash

#PBS -l walltime=00:02:00
#PBS -l select=1:ncpus=8:mpiprocs=8:mem=2000m,place=scatter
#PBS -m n


cd $PBS_O_WORKDIR

MPI_NP=$(wc -l $PBS_NODEFILE | awk '{ print $1 }')
echo "Number of MPI processes: $MPI_NP"

N=3000
K=3600
M=4200

echo 'File $PBS_NODEFILE:'
cat  $PBS_NODEFILE
ROWS=4
COLUMNS=2
echo "Count of rows: $ROWS"
echo "Count of columns: $COLUMNS"

mpirun -trace -machinefile $PBS_NODEFILE -np $MPI_NP ./parallel \
               $N $K $M $ROWS $COLUMNS >/dev/null
```

Приложение 4. *Замеры времени выполнения на разных решётках процессов*

Решётка	**Время, с**
2x12	45,16
3x8	45,15
4x6	37,67
6x4	36,54
8x3	41,67
12x2	42,52

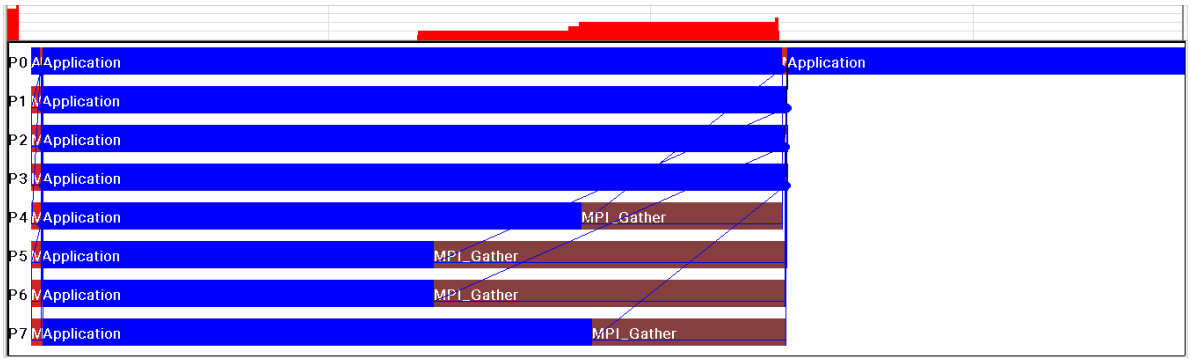
График зависимости времени выполнения программы от числа строк в решётке процессов:



Легенда:

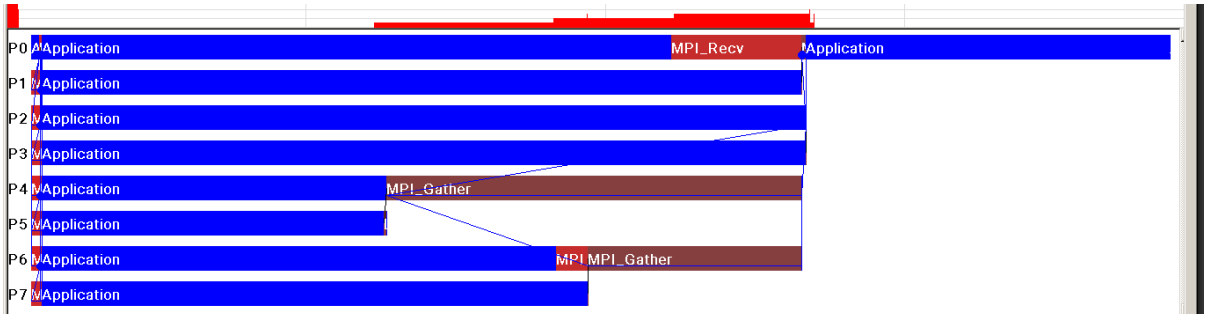
- Ox – число строк в решётке процессов r;
- Oy – выполнения умножения матриц t;
- Красные точки – реальное время выполнения умножения матриц при заданных r.

2x4



Name	TSelf	TSelf	TTotal	#Calls	TSelf /Call
Group All_Processes					
Group Application	333.452 s		408.872 s	8	41.6816 s
MPI_Cart_sub	326e-6 s		326e-6 s	16	20.375e-6 s
MPI_Comm_size	3e-6 s		3e-6 s	8	375e-9 s
MPI_Comm_rank	2e-6 s		2e-6 s	8	250e-9 s
MPI_Type_contiguous	500e-6 s		500e-6 s	32	15.625e-6 s
MPI_Finalize	2.749e-3 s		2.749e-3 s	8	343.625e-6 s
MPI_Scatter	654.719e-3 s		654.719e-3 s	2	327.359e-3 s
MPI_Bcast	4.41469 s		4.41469 s	16	275.918e-3 s
MPI_Recv	477.338e-3 s		477.338e-3 s	6	79.5563e-3 s
MPI_Cart_create	535e-6 s		535e-6 s	8	66.875e-6 s
MPI_Type_free	129e-6 s		129e-6 s	48	2.6875e-6 s
MPI_Type_commit	152e-6 s		152e-6 s	48	3.16667e-6 s
MPI_Cart_coords	60e-6 s		60e-6 s	8	7.5e-6 s
MPI_Wtime	27e-6 s		27e-6 s	9	3e-6 s
MPI_Send	346.138e-3 s		346.138e-3 s	6	57.6897e-3 s
MPI_Type_vector	75e-6 s		75e-6 s	16	4.6875e-6 s
MPI_Gather	69.5225 s		69.5225 s	8	8.69031 s

4x2



Name	TSelf	TSelf	TTotal	#Calls	TSelf /Call
Group All_Processes					
Group Application	350.685 s		411.726 s	8	43.8357 s
MPI_Cart_sub	312e-6 s		312e-6 s	16	19.5e-6 s
MPI_Comm_size	2e-6 s		2e-6 s	8	250e-9 s
MPI_Comm_rank	3e-6 s		3e-6 s	8	375e-9 s
MPI_Type_contiguous	233e-6 s		233e-6 s	32	7.28125e-6 s
MPI_Finalize	2.917e-3 s		2.917e-3 s	8	364.625e-6 s
MPI_Scatter	1.89048 s		1.89048 s	4	472.619e-3 s
MPI_Bcast	3.45597 s		3.45597 s	16	215.998e-3 s
MPI_Recv	11.3149 s		11.3149 s	5	2.26298 s
MPI_Cart_create	542e-6 s		542e-6 s	8	67.75e-6 s
MPI_Type_free	130e-6 s		130e-6 s	48	2.70833e-6 s
MPI_Type_commit	143e-6 s		143e-6 s	48	2.97917e-6 s
MPI_Cart_coords	51e-6 s		51e-6 s	8	6.375e-6 s
MPI_Wtime	26e-6 s		26e-6 s	9	2.88889e-6 s
MPI_Send	267.019e-3 s		267.019e-3 s	5	53.4038e-3 s
MPI_Type_vector	374e-6 s		374e-6 s	16	23.375e-6 s
MPI_Gather	44.107 s		44.107 s	4	11.0267 s