Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
09.03.01 Информатика и вычислительная техника. Программная инженерия и компьютерные науки

Разработка экспериментальной библиотеки работы с распределенным массивом для поддержки автоматического конструирования параллельных программ

Выполнил:
студент гр. 18201 ФИТ НГУ Баранов Илья Николаевич, каф. ПВ

Научный руководитель:
Маркова В.П. к.т.н., доцент каф. ПВ ФИТ НГУ

Соруководитель:
Киреев С.Е. ст. преп. каф. ПВ ФИТ НГУ

Рецензент:
Ракитский А. А., к.т.н., доцент, с.н.с. ФИЦ ИВТ

Новосибирск 2022

Актуальность

В настоящее время написание параллельных программ является сложной задачей. В основном возникают сложности с коммуникациями между процессами: дедлоки, синхронизация, состояние гонки данных и другие. Одним из способов решить эти проблемы является синтез параллельных программ.

В задаче синтеза есть проблема подбора параметров, которые влияют не на результат работы программы, а на её нефункциональные характеристики, такие как время работы, потребление памяти и другие. Такие параметры будем называть **параметрами реализации**. Подобрать приемлемые значения параметров не всегда простая задача в связи с большим количеством различных комбинаций этих параметров. Эта задача может быть упрощена в случае, когда есть знания о влиянии параметров на эффективность работы программы.

В системе автоматического конструирования параллельных программ LuNA, разрабатываемой в ИВМиМГ СО РАН, нет средств для автоматизированного подбора параметров, поэтому разработка такого средства актуальна для этой системы.

Параметры в задаче синтеза программ

Есть разные способы синтеза параллельных программ, например, с помощью различных библиотек и фреймворков. Способ синтеза является параметром, который необходимо выбрать.

- Использование готовой библиотечной реализации
- Использование специализированного фреймворка
- Генерации программы C + MPI
- …

Внутри каждого способа синтеза могут быть свои параметры реализации, которые также требуется подбирать.

- Количество процессов и потоков
- Способ декомпозиции
- Способ распределение ресурсов
- …

Существующие решения по подбору параметров с учетом знаний

- Intel MPI tuning — параметры реализации MPI процедур
- ATLAS — параметры реализации подпрограмм из BLAS и LAPACK
- FFTW — параметры реализации преобразования Фурье
- …

Все эти решения направлены на подбор параметров в конкретных предметных областях, где про параметры многое известно, и они применяют алгоритм подбора, использующий знания о параметрах и платформе.

Чтобы проработать проблему подбора параметров, ограничимся простым классом задач, в которых влияние параметров относительно известно — задачи пространственной динамики на регулярных сетках. Для их параллельной реализации используется распределенный массив.

Обзор библиотек и систем параллельного программирования

- Язык параллельного программирования HPF (High Performance Fortran)
- Coarray Fortran
- Язык программирования Норма
- Regent
- DVM (Distribute virtual memory)

Все эти библиотеки способны решать задачи пространственной динамики на регулярных сетках. Однако, в качестве аргументов для создания собственного решения можно назвать следующие:

1. Важна предсказуемость влияния параметров реализации на нефункциональные характеристики программы. Однако знаний о внутреннем устройстве готовых библиотек у нас нет, и там могут быть подводные камни, ведущие к непредсказуемым результатам. В собственном решении мы сами гарантируем эту предсказуемость.
2. Собственное средство можно развивать, добавлять различные способы реализации и оптимизации.
3. Для такого простого класса задач не сложнее разработать свою библиотеку, чем изучать готовое решение.

Цель и задачи

Целью работы является разработка параллельной библиотеки работы с распределенным массивом, а также средства для автоматизации процесса подбора ее параметров на основе знаний эксперта.

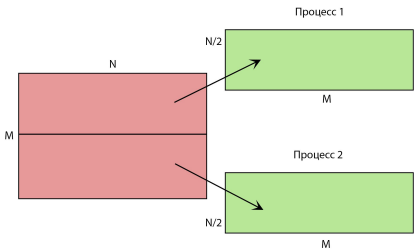
Задачи:

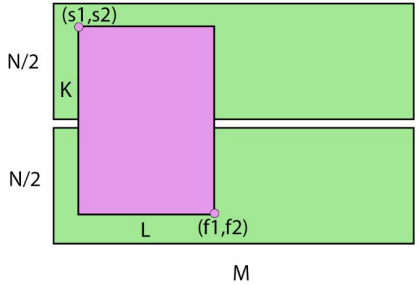
- Разработать библиотеку, упрощающую написание параллельной программы для работы с распределенными массивами
- Разработать и реализовать средство автоматизированной настройки параметров на основе знаний программиста и протестировать его на программе, написанной с помощью библиотеки

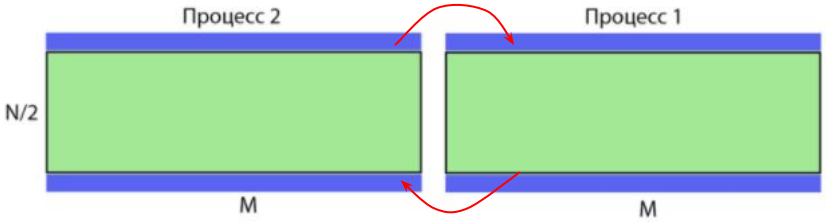
Библиотека параллельного программирования

Учитывая анализ других решений, была спроектирована и реализована библиотека параллельного программирования со следующими возможностями:

- Поддержка распределенного массива с разными вариантами его декомпозиции
- Возможность работы с элементами распределенного массива в глобальных координатах
- Поддержка операций редукции
- Синхронный и асинхронный обмен границами







Знания о параметрах

В задачах пространственной динамики на регулярных сетках существуют следующие параметры реализации параллельных программ:

- Количество процессов
- Количество потоков
- Тип декомпозиции
- Размер границы
- Глубина границы
- …

Есть и параметры задачи:

- Размер сетки по оси X
- Размер сетки по оси Y
- …

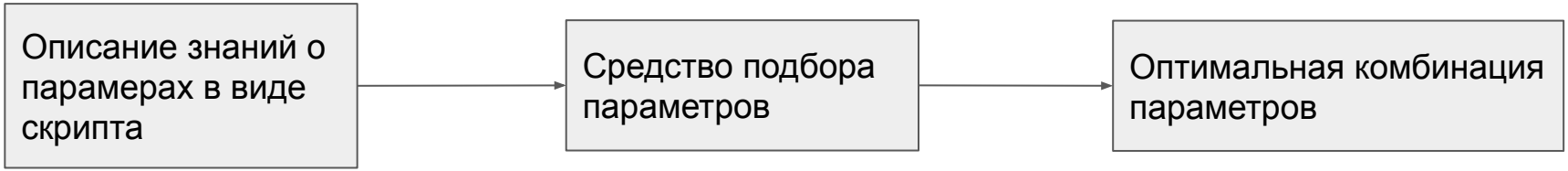
Причем между этими параметрами есть зависимость. Например, произведение количества процессов и потоков должно не превышать количество логических ядер процессора.

Подход к использованию знаний эксперта

В данной работе был выбран подход с использованием собственного скриптового языка для представления знаний эксперта. Написанный скрипт поступает на вход средству подбора параметров, а на выходе получаем оптимальную комбинацию значений параметров.

Преимущества и недостатки подхода:

+ Такой подход позволяет писать скрипты, которые можно использовать в различных системах и библиотеках.
+ Нет привязки к конкретному решению или алгоритму
+ Код работает на большинстве современных платформ, так как средство подбора параметров написано на кроссплатформенном языке программирования.
- Необходимо написать скрипт



Средство подбора параметров

Было разработано средство подбора параметров со следующими возможностями:

- Описание параметров (диапазоны, перечисления, их комбинации)
- Выбор метода перебора (перебор по сетке, случайный, с помощью другого скрипта)
- Фильтраций параметров (логические выражения, удаление комбинаций по строке, оставление N комбинаций)
- Вычисляемые параметры
- Поддержка запуска расчетов на кластере НГУ
- Визуализация результатов

Алгоритм подбора значений параметров

```
ADD PARAM : -a ENUM(1,2,3,4,5)
ADD PARAM : -b ENUM(2,3,4,5,6)
ADD PARAM : -c ENUM(3,4,5,6,7)
ADD PARAM : -d ENUM(4,5,6,7,8)
```

1. Описание имен и допустимых значений параметров

```
METHOD : GRID -> (-a,1) (-b,2) (-c,3) (-d,4)
```

2. Создание начальной выборки

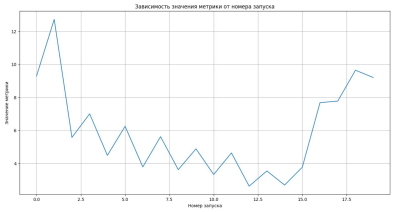
```
launchNumber;Combination
0;-a 1 -b 2 -c 3 -d 4
1;-a 1 -b 2 -c 3 -d 8
2;-a 1 -b 2 -c 6 -d 4
...
53;-a 5 -b 4 -c 3 -d 8
54;-a 5 -b 4 -c 6 -d 4
55;-a 5 -b 4 -c 6 -d 8
56;-a 5 -b 6 -c 3 -d 4
57;-a 5 -b 6 -c 3 -d 8
58;-a 5 -b 6 -c 6 -d 4
59;-a 5 -b 6 -c 6 -d 8
```

```
CALC -a FROM -a,-b,-c,-d :
    COND((-a + -b + -c + -d) % 2 = 0
    AND (-b + -c + -d) < 10)
```

```
launchNumber;Combination
0;-a 1 -b 2 -c 3 -d 4
1;-a 3 -b 2 -c 3 -d 4
2;-a 5 -b 2 -c 3 -d 4
```

3. Применение фильтров

```
RUN MAX MIN AVG GRAPH
```



4. Запуск программы с полученными комбинациями параметров и анализ их выходных данных

Пример работы средства подбора параметров

У нас есть программа, принимающая на вход один параметр -t, и от него зависит время выполнения программы.

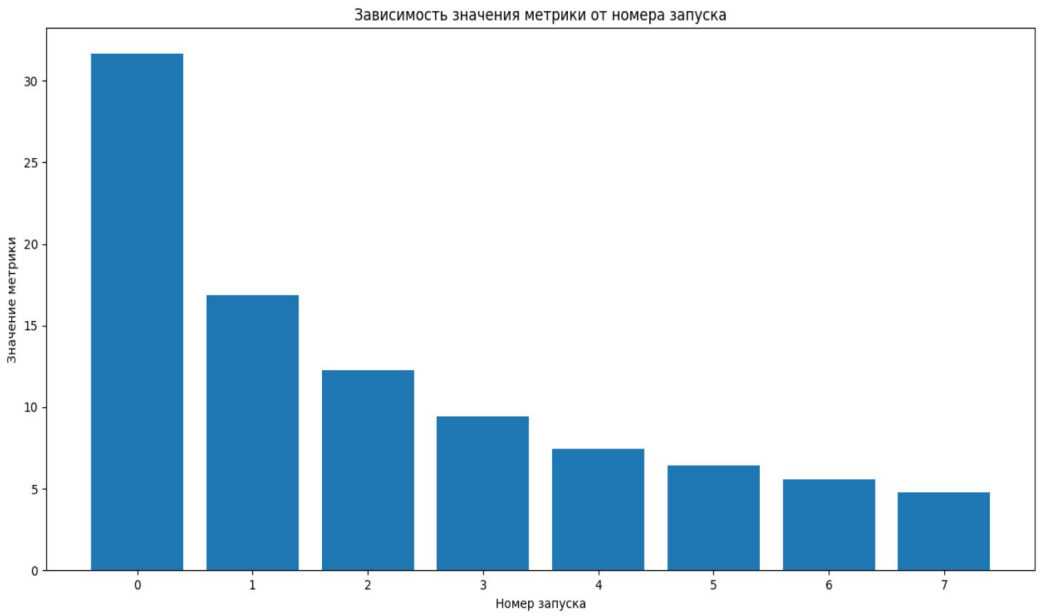
```
ADD PARAM : PROGNAME ENUM(a.out)
ADD PARAM : METRIC ENUM(Time)

ADD PARAM : -t RANGE(1->8|1)

METHOD : GRID -> 1

RUN MIN GRAPH
```

Launch number	Combination	Metric
0	-t 1	31.6515
1	-t 2	16.8651
2	-t 3	12.2428
3	-t 4	9.43245
4	-t 5	7.46307
5	-t 6	6.42847
6	-t 7	5.59166
7	-t 8	4.80397



Тестирование подбора параметров на программе, написанной с помощью библиотеки: описание задачи

В качестве решаемой задачи было выбрано решение двумерного уравнения Гельмгольца методом Якоби

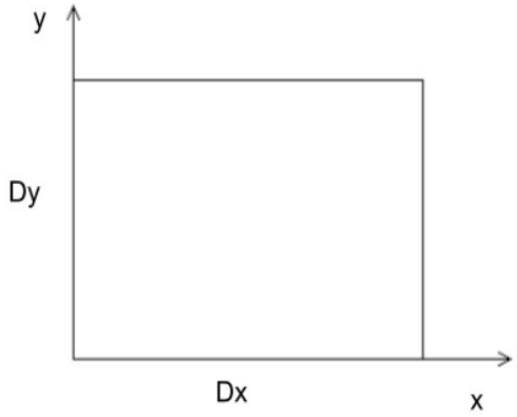
$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial^2 y^2} - a\varphi = \rho,\ a \geq 0 \quad (1)$$

$$\varphi = \varphi(x,y),\ \rho = \rho(x,y)$$

в области Ω с краевыми условиями 1-го рода (т.е. на границе G известны значения искомой функции φ):

$$\varphi|_G = F(x,y)$$

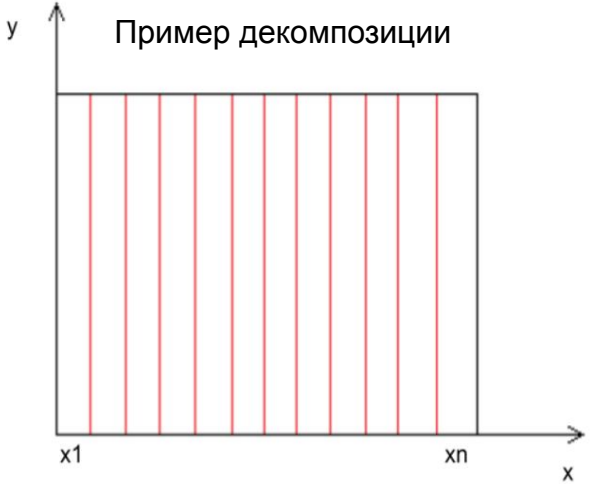
Область Ω имеет вид прямоугольника с размерами Dx × Dy.



Разностная схема

$$\varphi_{i,j}^{m+1} = \frac{1}{\frac{2}{h_x^2}+\frac{2}{h_y^2}}\left(\frac{\varphi_{i+1,j}^{m}+\varphi_{i-1,j}^{m}}{h_x^2} + \frac{\varphi_{i,j+1}^{m}+\varphi_{i,j-1}^{m}}{h_y^2} - \rho_{i,j}\right)$$

Пример декомпозиции



Тестирование подбора параметров на программе, написанной с помощью библиотеки: скрипт подбора параметров

```
// Объявление имени исполняемой программы
ADD PARAM : PROGNAME ENUM(run)
// Объявление метрики, которую нужно оценивать
ADD PARAM : METRIC ENUM(Time)
// Объявление имен и допустимых значений параметров
ADD PARAM : -n RANGE(1->8|1)
ADD PARAM : -threadnum RANGE(1->16|1)
ADD PARAM : -dec RANGE(0->2|1)
ADD PARAM : -forOrderX ENUM(0,1)
ADD PARAM : -forOrderY ENUM(0,1)
ADD PARAM : -dimX ENUM(0)
ADD PARAM : -dimY ENUM(0)
ADD PARAM : -nx ENUM(240)
ADD PARAM : -ny ENUM(2400)
// Объявление константы, в которой хранится количество логических ядер процессора
ADD PARAM : numOfProccess ENUM(16)
// Создание начальной выборки – все возможные комбинации параметров
METHOD : GRID -> 1
// Накладывание условий на параметры
IF -dec = 2 THEN -n = 2,4,6,8
IF -dec = 0 THEN -forOrderX = 0
IF -dec = 1 THEN -forOrderX = 1
IF -forOrderX = 1 THEN -forOrderY = 0
IF -forOrderY = 0 THEN -forOrderX = 1
CALC -threadnum FROM -n, numOfProccess : Convert(numOfProccess / -n,'System.Int32')
// Удаление константы из итоговых комбинаций
REMOVE ALL : numOfProccess
// Сортировка комбинай по типу декомпозиции
ORDER_BY : -dec DESC
// Запуск программы с полученными комбинациями параметров с выводом графика
RUN GRAPH MIN
```

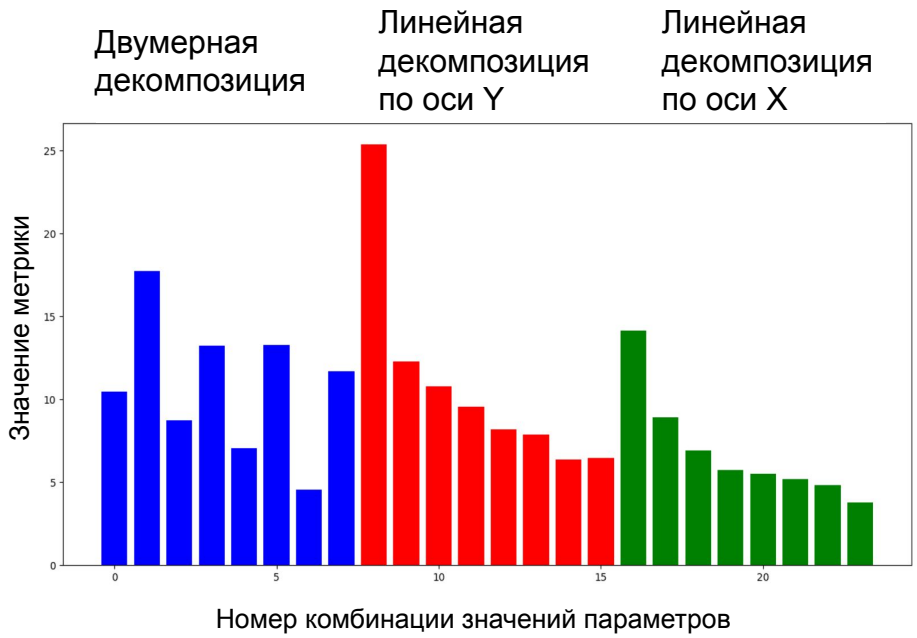
В случае программы, написанной с помощью библиотеки, скрипт подбора параметров более сложный.
В нём учитываются следующие зависимости:

- Зависимость количества потоков от количества процессов и количества логических ядер процессора
- Количество процессов фиксируется для двумерной декомпозиции, чтобы уменьшить число итоговых комбинаций
- Зависимость типа декомпозиции от порядка циклов при обходе индексного пространства

Отсортируем полученные комбинации по типу декомпозиции.

Тестирование подбора параметров на программе, написанной с помощью библиотеки: размер сетки 240×2400

Благодаря наложенным ограничениям из 1536 возможных комбинаций будем перебирать всего 24. Для задачи с размером сетки 240×2400 наилучший результат показали комбинации с 7, 8 процессами по 2 потока в каждом с декомпозицией по оси X, а также двумерной декомпозицией. Зная, что используется 8-ми ядерный процессор с гипертредингом, показатель вполне предсказуемый.



Launch number	Combination	Metric
23	-n 8 -threadnum 2 -dec 0 -forOrderX 0 -forOrderY 1 -dimX 0 -dimY 0 -nx 240 -ny 2400	3.765464
6	-n 8 -threadnum 2 -dec 2 -forOrderX 0 -forOrderY 1 -dimX 0 -dimY 0 -nx 240 -ny 2400	4.580295
22	-n 7 -threadnum 2 -dec 0 -forOrderX 0 -forOrderY 1 -dimX 0 -dimY 0 -nx 240 -ny 2400	4.843114
21	-n 6 -threadnum 3 -dec 0 -forOrderX 0 -forOrderY 1 -dimX 0 -dimY 0 -nx 240 -ny 2400	5.192511
20	-n 5 -threadnum 3 -dec 0 -forOrderX 0 -forOrderY 1 -dimX 0 -dimY 0 -nx 240 -ny 2400	5.521638
19	-n 4 -threadnum 4 -dec 0 -forOrderX 0 -forOrderY 1 -dimX 0 -dimY 0 -nx 240 -ny 2400	5.750832
14	-n 7 -threadnum 2 -dec 1 -forOrderX 1 -forOrderY 0 -dimX 0 -dimY 0 -nx 240 -ny 2400	6.372892
15	-n 8 -threadnum 2 -dec 1 -forOrderX 1 -forOrderY 0 -dimX 0 -dimY 0 -nx 240 -ny 2400	6.460194
18	-n 3 -threadnum 5 -dec 0 -forOrderX 0 -forOrderY 1 -dimX 0 -dimY 0 -nx 240 -ny 2400	6.939652

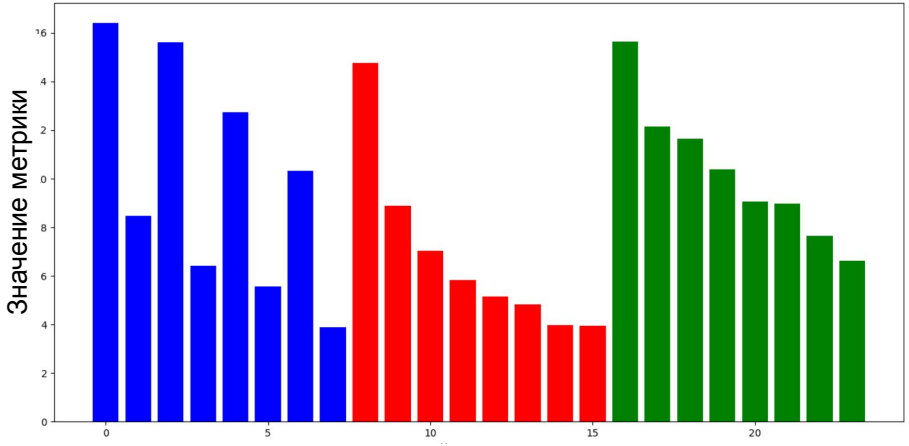
Тестирование подбора параметров на программе, написанной с помощью библиотеки: размер сетки 2400×240

Для задачи с размером сетки 2400×240 наоборот наилучший результат показали комбинации с 7,8 процессами по 2 потока в каждом с декомпозицией по оси Y, а также двумерная декомпозиция.

Двумерная декомпозиция

Линейная декомпозиция по оси Y

Линейная декомпозиция по оси X



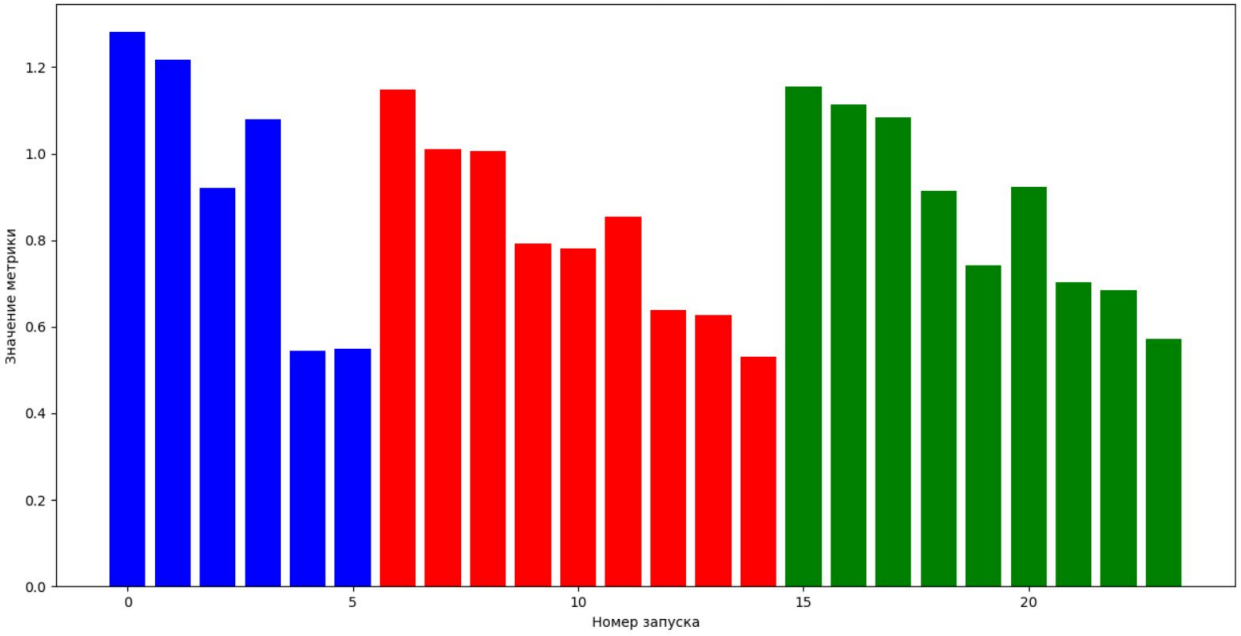
Launch number	Combination	Metric
7	-n 8 -threadnum 2 -dec 2 -forOrderX 1 -forOrderY 0 -dimX 0 -dimY 0 -nx 2400 -ny 240	3.885485
15	-n 8 -threadnum 2 -dec 1 -forOrderX 1 -forOrderY 0 -dimX 0 -dimY 0 -nx 2400 -ny 240	3.942279
14	-n 7 -threadnum 2 -dec 1 -forOrderX 1 -forOrderY 0 -dimX 0 -dimY 0 -nx 2400 -ny 240	3.963047
13	-n 6 -threadnum 3 -dec 1 -forOrderX 1 -forOrderY 0 -dimX 0 -dimY 0 -nx 2400 -ny 240	4.829727
12	-n 5 -threadnum 3 -dec 1 -forOrderX 1 -forOrderY 0 -dimX 0 -dimY 0 -nx 2400 -ny 240	5.15769
5	-n 6 -threadnum 3 -dec 2 -forOrderX 1 -forOrderY 0 -dimX 0 -dimY 0 -nx 2400 -ny 240	5.577526
11	-n 4 -threadnum 4 -dec 1 -forOrderX 1 -forOrderY 0 -dimX 0 -dimY 0 -nx 2400 -ny 240	5.839442
3	-n 4 -threadnum 4 -dec 2 -forOrderX 1 -forOrderY 0 -dimX 0 -dimY 0 -nx 2400 -ny 240	6.429258
23	-n 8 -threadnum 2 -dec 0 -forOrderX 0 -forOrderY 1 -dimX 0 -dimY 0 -nx 2400 -ny 240	6.618447

Тестирование подбора параметров на программе, написанной с помощью библиотеки: размер сетки 840×840

Двумерная декомпозиция

Линейная декомпозиция по оси Y

Линейная декомпозиция по оси X



Если размеры сетки по оси X и Y взять одинаковые 840×840, то график зависимости значения метрики от номера запуска становится очень похожим при разных типах декомпозиции. Это говорит о том, что при таких размерах тип декомпозиции не сильно влияет производительность.

Результаты

- Разработана и протестирована библиотека параллельного программирования для работы с распределенными массивами, которую можно внедрять в системы автоматического конструирования параллельных программ.
- Разработано средство, позволяющее автоматизировать процесс подбора параметров для любых программ, и протестировано на программе, написанной с помощью библиотеки.

Заключение

Научная новизна состоит в том, что предложен подход к подбору параметров реализации с использованием знаний эксперта при синтезе параллельных программ.

Практическая ценность работы обусловлена тем, что полученные результаты могут быть использованы специалистами в области автоматической генерации программ в системе LuNA.

Перспективность:
В перспективе можно расширить функциональность библиотеки новыми способами реализации и оптимизации, а также расширять средство подбора параметров путем добавления поддержки других видов экспертных знаний.

Публикации и апробация

1. МНСК-2022 // Секция “Параллельные вычисления”
2. Всероссийская летняя XXXVII молодежная Школа-конференция по параллельному программированию
3. Всероссийская зимняя XXXVIII молодежная Школа-конференция по параллельному программированию