Лекция 1. Организация функционирования распределённых вычислительных систем

Перышкова Евгения Николаевна

к.т.н. доцент Кафедры ВТ

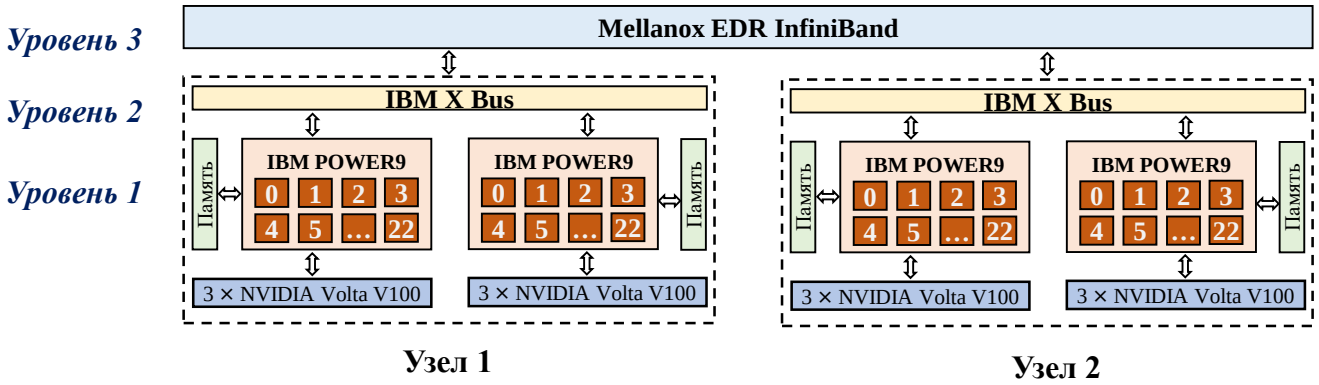
НГТУ

e-mail: e.peryshkova@gmail.com

АКТУАЛЬНОСТЬ

- **Вычислительная система (ВС) –**
  совокупность множества элементарных машин (ЭМ) и коммуникационной сети, связывающих их
- **Архитектурные свойства современных ВС** [1]**:**
  - *мультиархитектура* вычислительных узлов
  - *иерархическая организация* коммуникационной среды
  - большемасштабность

Две элементарные машины системы
IBM BlueGene/Q Sequoia



[1] Хорошевский В.Г. *Распределенные вычислительные системы с программируемой структурой* // Вестник СибГУТИ – 2010. – №2. – С. 3-41.

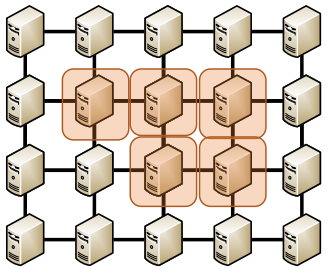
РЕЖИМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВС

Мультипрограммные режимы функционирования ВС

Организация одновременного решения множества задач на ресурсах ВС

Режим обслуживания потока задач

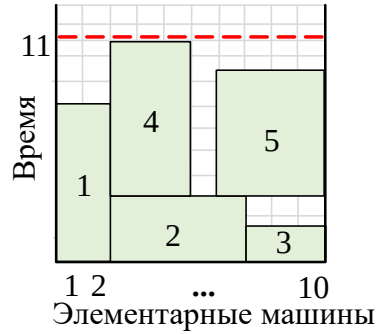
Формирование (суб)оптимальных подсистем элементарных машин для параллельных задач



- Техника теории игр, стохастическое программирование (Хорошевский, 1973), (Юдин, 1974), (Ермольев, 1976)
- Алгоритмы на графах (Корнеев, Монахов, 1985), (Livingston, 2002)

Режим обработки набора задач

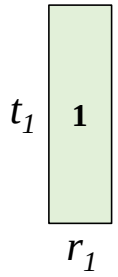
Построение расписаний решения параллельных задач (task scheduling)



- Точные методы: перебор, метод ветвей и границ
- Сведение к задаче упаковки объектов в контейнеры: 1DBPP, 2DSPP
- Алгоритмы локального поиска: генетические, имитация отжиг, поиск с запретами, роевые алгоритмы

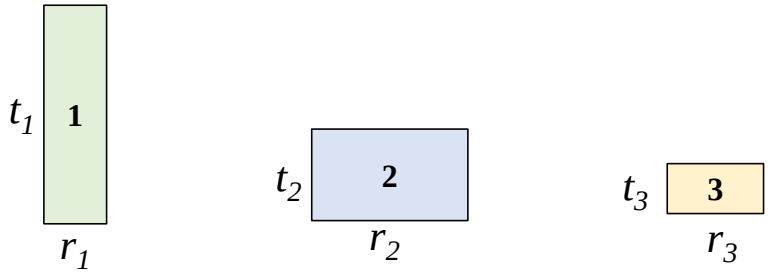
РЕЖИМ ОБРАБОТКИ ЗАДАЧ С НЕФИКСИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Задача с *фиксированными* параметрами (rigid)
(1 вариант подсистемы ЭМ):



$p_1 = (2, 10)$

Задача с *нефиксированными* параметрами (moldable)
(3 варианта подсистем ЭМ):



$p_1 = (2, 10)$ $p_2 = (5, 4)$ $p_3 = (3, 2)$

Преимущества поддержки в системах управления ресурсами параллельных задач с нефиксированными параметрами:

- Сокращение суммарного времени решения задач
- Выполнение технико-экономических ограничений
  - ❑ Восстановление вычислительного процесса на допустимой подсистеме меньшего ранга
  - ❑ Лицензионные ограничения программ на размеры подсистемы

Актуальным является создание алгоритмов обработки наборов задач с нефиксированными параметрами

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕШЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ С НЕФИКСИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

ОБРАБОТКА НАБОРА ЗАДАЧ С ФИКСИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

- **Задан** набор из m задач с *фиксированными* (rigid) рангами r_i и временем t_i решения
- **Требуется** построить расписание решения на ВС из n ЭМ задач набора – определить для каждой задачи подсистему ЭМ и момент запуска параллельных ветвей на ней

- Для обработки наборов задач с фиксированными параметрами разработаны эффективные методы и алгоритмы:
  - Сведение к задачи одномерной упаковки 1DBPP (В.Г. Хорошевский, 1967), (Поспелов, 1972)
  - Сведение к задаче двухмерной упаковки 2DSPP (Coffman, 1980)
  - Стохастические алгоритмы локального поиска (Мухачева, 2001)
  - Метод ветвей и границ (Сидельников, 2006)
  - Детерминированные алгоритмы с гарантированной оценкой точности (Ntene, 2009)
  - Алгоритмы решения задачи календарного планирования (Гимади, 2001), (Кочетов, 2000)

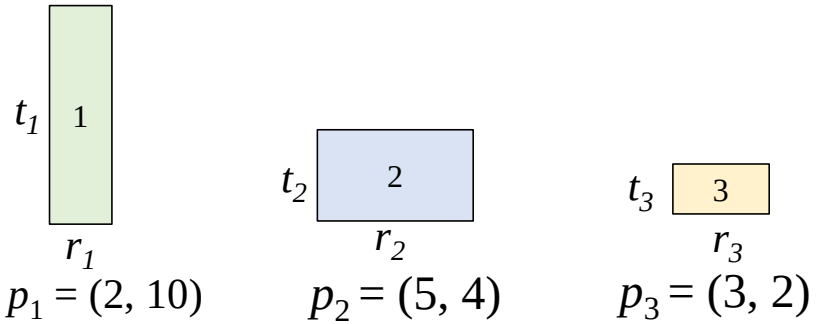
ОБРАБОТКА НАБОРА ЗАДАЧ С НЕФИКСИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

- **Задан** набор из m задач с *нефиксированными* (moldable) рангами r_i и временем t_i решения
- **Требуется** построить расписание решения на ВС из n ЭМ задач набора – определить для каждой задачи подсистему ЭМ и момент запуска параллельных ветвей на ней

- Задача с нефиксированными параметрами (moldable job) представлена вектором p_i из q_i различных вариантов параметров задачи:

$$p_i = (p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^{q_i})$$

Задача с нефиксированными параметрами (q = 3)



[1] Sabin, G. *Moldable parallel job scheduling using job efficiency: an iterative approach*, 2007.
[2] Khandekar, R. *Real-time scheduling to minimize machine busy times*, 2010.
[3] Huang, K-C. *Online Scheduling of Moldable Jobs with Deadline*, 2015.

ЗАДАЧА С НЕФИКСИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

- Современные технико-экономические ограничения:
  - Некоторые параллельные задачи допускают реализацию только на подсистемах ЭМ с определенным свойствами, например, с числом процессорных ядер равным степени числа два
  - Лицензии значительной части коммерческих пакетов параллельного моделирования допускают их запуск только на фиксированных конфигурациях подсистем ЭМ
  - Отказы ресурсов в большемасштабных ВС и перспективных системах эксафлопсной производительности требуют поддержки возможности восстановления вычислительного процесса на допустимой подсистеме меньшего ранга
- Известные методы построения расписания решения задач не применимы для задач с нефиксированными параметрами, поэтому актуальным является создание новых алгоритмов формирования расписания решения задач с нефиксированными параметрами

ОБРАБОТКА НАБОРА ЗАДАЧ С НЕФИКСИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

- **Требуется** построить расписание S решения задач на ВС

$$S = \big((s_1, x_1, k_1), (s_2, x_2, k_2), \dots, (s_m, x_m, k_m)\big)$$

- s_i – время начала решения i-ой задачи на ВС
- $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ir_i^{k_i}})$ – подсистема ЭМ для выполнения ветвей программы, x_{ij} – номер ЭМ для выполнения ветви j задачи i

$$T(S) = \max_{i \in J}\{s_i + t_i^{k_i}\} \to \min_{S \in \Omega}$$

при ограничениях:

$$\sum_{i \in J(t)} r_i^{k_i} \le n, \quad \forall t \in \mathbb{R},$$

$$\prod_{i \in J(t)} \prod_{i' \in J(t) \setminus \{i\}} \big(x_{ij} - x_{i'j'}\big), \quad \forall t \in \mathbb{R}, \qquad j = 1, 2, \dots, r_i^{k_i}, j' = 1,2, \dots, r_{i'}^{k_{i'}},$$

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \frac{w_i^{k_i}}{\max\limits_{k=\overline{1,q_i}} w_i^k} \ge w.$$

$$x_{ij} \in C, \qquad i = 1,2, \dots, m, \qquad j = 1,2, \dots, r_i^{k_i},$$

$$s_i \in \mathbb{R}, \qquad k_i \in \{1,2, \dots, q_i\}, \qquad i = 1,2, \dots, m.$$

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

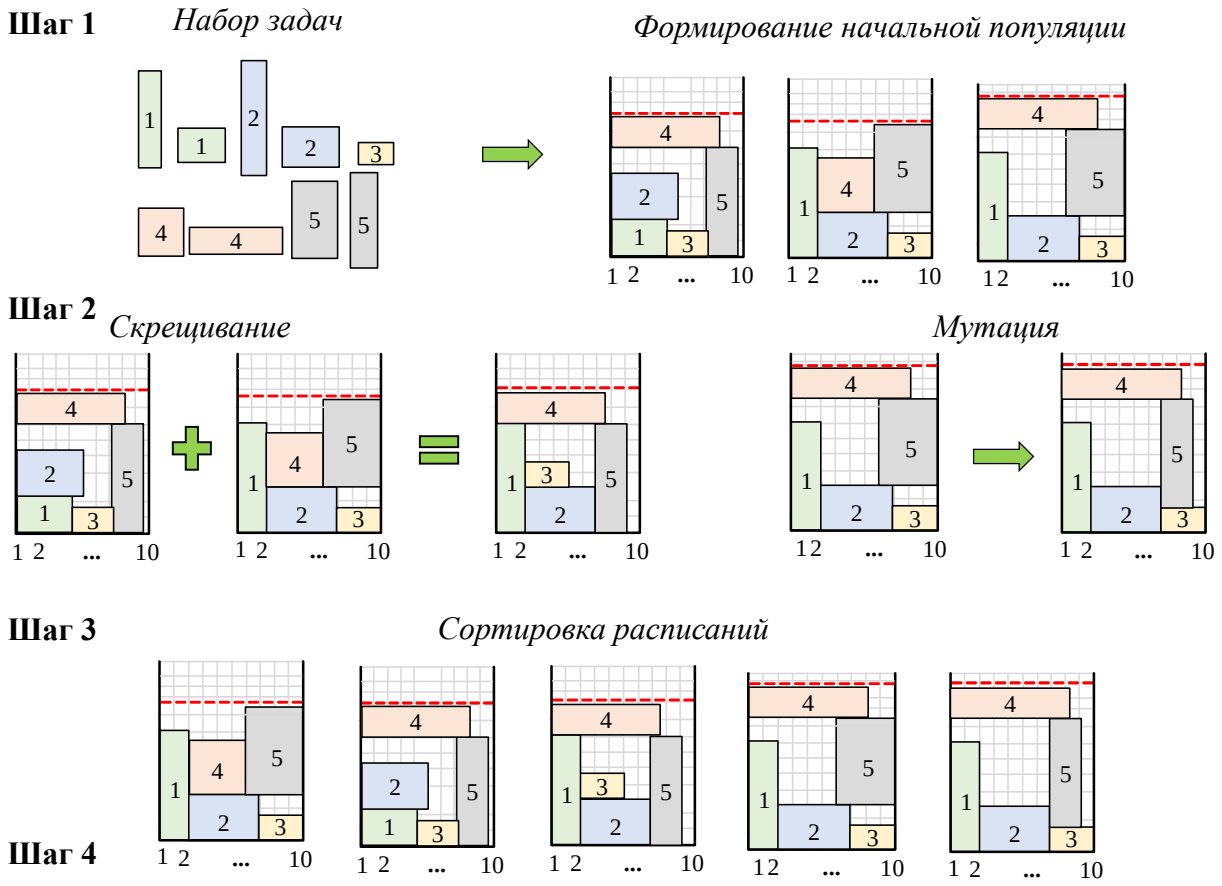
Генетический алгоритм формирования расписания решения задач с нефиксированными параметрами

- **Шаг 1.** Создание популяции из K допустимых расписаний. Расписание формируется с помощью эвристических алгоритмов FFDH или BFDH
- **Шаг 2.** Получение новых особей путем «скрещивания» пары расписаний – два расписания делятся на G частей и переставляются. Если особь не скрещивается, к ней применяется оператор мутации
- **Шаг 3.** Упорядочивание всей популяции по значению целевой функции $T(S)$. В популяции остаются лучшие K особей (расписаний)
- **Шаг 4.** Если количество эволюционных циклов не достигло предельного значения V, то возврат к шагу 2
- **Шаг 5.** За итоговое решение принимается особь с экстремальным значением целевой функции $T(S)$ в текущей популяции

Вычислительная сложность алгоритма равна:

$$T = O(K \cdot m + K \cdot T_{2DSPP} + V \cdot K \log K + V \cdot K),$$

где T_{2DSPP} – время работы алгоритмов упаковки,
K – размер популяции,
V – количество эволюционных циклов.



[*] *А.В. Ефимов, С.Н. Мамойленко, Е.Н.Перышкова Организация функционирования распределенных вычислительных систем при обработке наборов масштабируемых задач // Вестник ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 2(15). – С. 51-60.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМ А

- Алгоритм реализован на C++ в пакете MOJOS
- Проведено моделирование алгоритма на тестовых наборах задач для моделей ВС с числом ЭМ n = 1024, 4096, 16384, 65536 и количеством задач в наборе m = 1000, 2000 и 3000
- Показатели эффективности алгоритма:

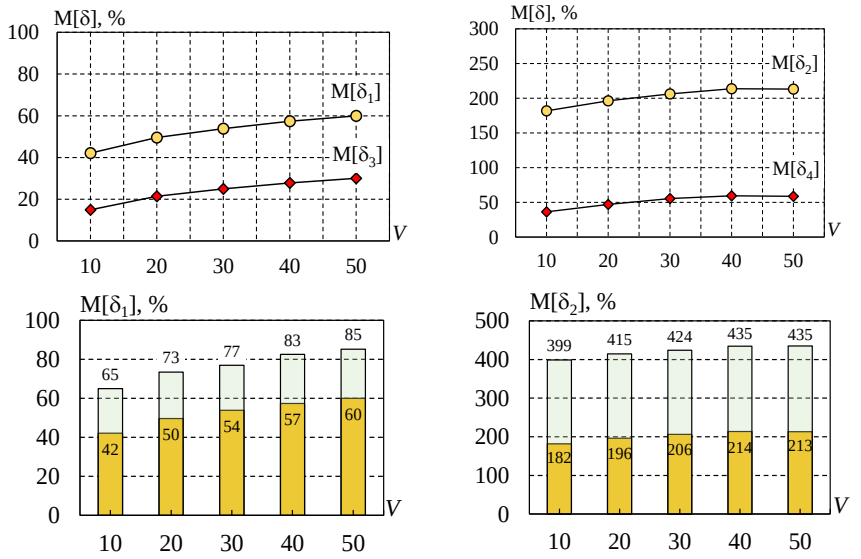
$$\delta_1 = (T_{BFDH} - T)/T, \quad \delta_2 = (T_{FFDH} - T)/T,$$

$$\delta_3 = (T_{BFDH\_INIT} - T)/T, \quad \delta_4 = (T_{FFDH\_INIT} - T)/T$$

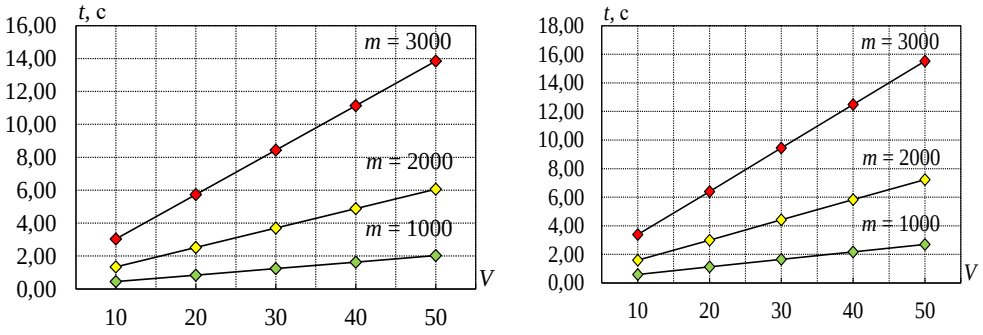
- T_{BFDH_INIT} – значение целевой функции от начального решения, полученного алгоритмом BFDH
- T_{FFDH_INIT} – значение целевой функции от начального решения, полученного алгоритмом FFDH
- T – значение целевой функции от решения, полученного генетическим алгоритмом
- T_{BFDH} и T_{FFDH} – значение целевой функции от решений, полученных алгоритмами BFDH и FFDH

Генетический алгоритм построения расписаний решения задач с нефиксированными параметрами обеспечивает ***сокращение суммарного времени выполнения задач в среднем на 45%*** относительно начальных решений, получаемых известными алгоритмами FFDH и BFDH

Зависимость математического ожидания и среднеквадратического отклонения от количества эволюционных циклов *V*
(n = 1024, m = 1000; K = 16, w = 75 %, P = 90 %, G = 2)



Зависимость времени работы алгоритма от количества эволюционных циклов *V* и числа *m* задач в наборе (1024 ЭМ)

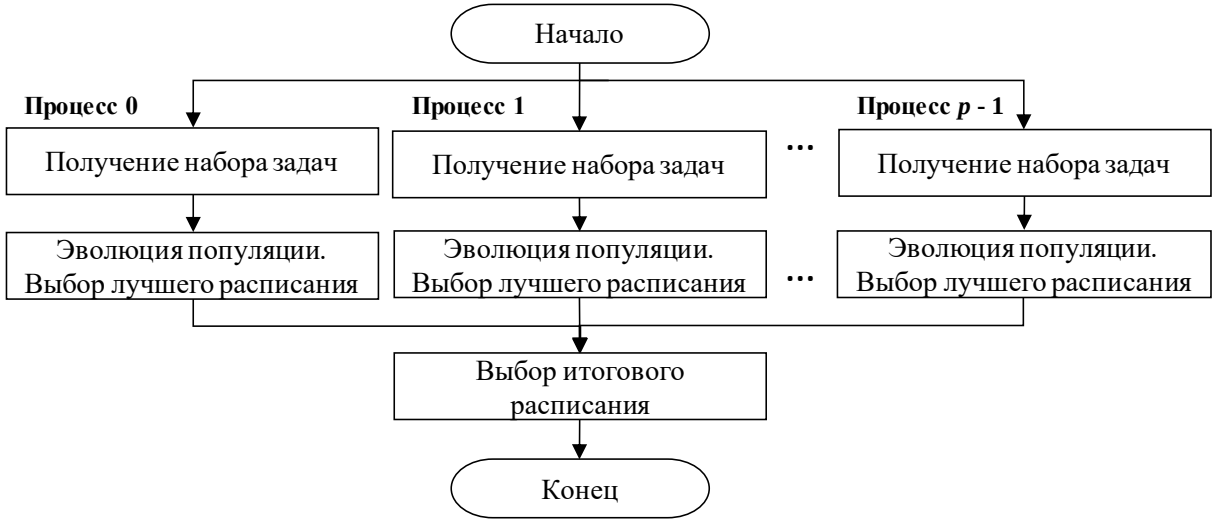


Алгоритм BFDH *Алгоритм FFDH*

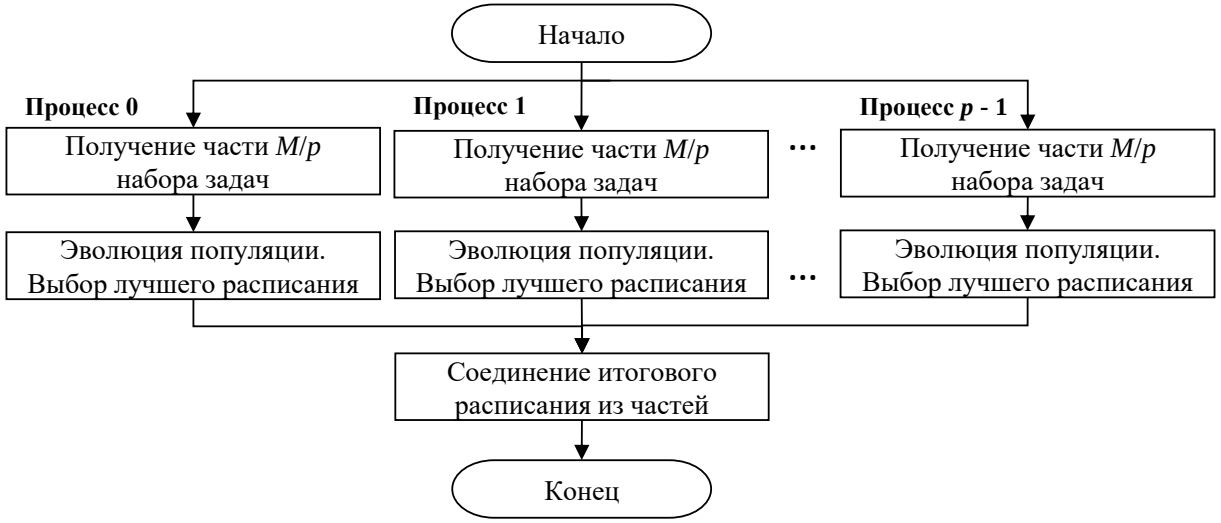
ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ

Параллельные генетические алгоритмы формирования расписания решения задач с нефиксированными параметрами

Алгоритм на основе метода мультистарта



Алгоритм на основе декомпозиции набора задач



M – количество задач в наборе, *p* – количество процессов программы

- Алгоритмы реализованы на языке C в модели передачи сообщений MPI
- Характеризуются линейной зависимостью ускорения от числа процессов

[*] *В.Г. Хорошевский, М.Г. Курносов, С.Н. Мамойленко, К.В. Павский, А.В. Ефимов, А.А. Пазников, Е.Н. Перышкова. Масштабируемый инструментарий параллельного мультипрограммирования пространственно-распределенных вычислительных систем // Вестник СибГУТИ. – 2011. – № 4. – С. 3-18.*

ИНТЕРГАЦИЯ В СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ TORQUE И ПЛАНИРОВЩИК MAUI

- Выполнена интеграция пакета MOJOS с системой TORQUE и планировщик Maui
- Язык запросов расширен новой структурой для описания вектора допустимых подсистем ЭМ

```
-L nodes = value @ ppn = value @
weight = value @ walltime = value,
```

- Эксперименты на вычислительном кластере: 18 узлов, сеть Gigabit Ethernet; наборы задач: m = 100, 200, 400 и 800
- Показатели эффективности:

$$\delta_1 = (T_T - T)/T, \quad \delta_2 = (T_M - T)/T,$$
$$\delta_3 = (T_{TQ} - T_Q)/T_Q, \quad \delta_4 = (T_{MQ} - T_Q)/T_Q$$

- T_T и T_{TQ} – время решения задач и время ожидания задач в очереди, обеспечиваемое системой TORQUE
- T_M и T_{MQ} – время решения задач и время ожидания задач в очереди, обеспечиваемое планировщиком Maui
- T и T_Q – время решения задач и время ожидания задач в очереди, обеспечиваемое разработанными автором средствами

Количество задач в наборе	T_T, с	T_M, с	T, с	M[δ_1], %	M[δ_2], %
100	13403	12317	11188	19,80	10,09
200	50426	45171	43195	16,74	4,57
400	207528	202364	175033	18,57	15,61
800	836394	796453	713580	17,21	11,61

Количество задач в наборе	T_{TQ}, с	T_{MQ}, с	T, с	M[δ_3], %	M[δ_4], %
100	323	310	246	31,30	26,02
200	372	356	326	14,11	9,20
400	684	697	605	13,06	15,21
800	1324	1294	1200	10,33	7,83

В среднем применение разработанных средств для системы TORQUE на рассмотренных наборах ***позволяет сократить суммарное время решения задач на 24 % и на 21 %*** для планировщика Maui

[*] *Е.Н. Перышкова, А.В. Ефимов, С.Н. Мамойленко. Инструментарий решения масштабируемых задач на распределённых вычислительных системах // Вестник СибГУТИ. – 2015. – №4. – С. 82-89.*

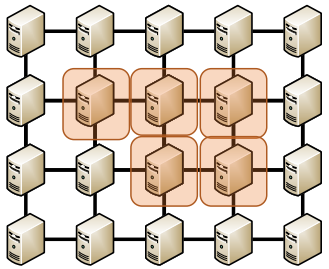
АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ МАШИНА

АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ МАШИН

Заданы распределенная ВС и количество M ветвей в параллельной программе.

Требуется сформировать подсистему, обеспечивающую эффективную реализацию коллективных схем межмашинных обменов.

Распределенная ВС
$N = 20,\ M = 5$



Обозначения:

- l_{pq} – кратчайшее расстояние между ЭМ p и q в структуре ВС.
- b_{pq} – пропускная способность канала связи между ЭМ p и q.

ВС с однородной структурой сети

$$L(X) = \left(\prod_{p=1}^{n-1} \prod_{q=p+1}^{n} (x_p x_q (l_{pq} - 1) + 1) \right) \to \min_{(x_p)}$$

при ограничениях:

$$\sum_{p=1}^{n} x_p = M,$$

$$x_p \in \{0, 1\}, \quad p = 1, 2, \ldots, n.$$

ВС с иерархической организацией

$$B(X) = \left(\prod_{p=1}^{n-1} \prod_{q=p+1}^{n} (x_p x_q (b_{pq} - 1) + 1) \right) \to \max_{(x_p)}$$

при ограничениях:

$$\sum_{p=1}^{n} x_p = M,$$

$$x_p \in \{0, 1\}, \quad p = 1, 2, \ldots, n.$$

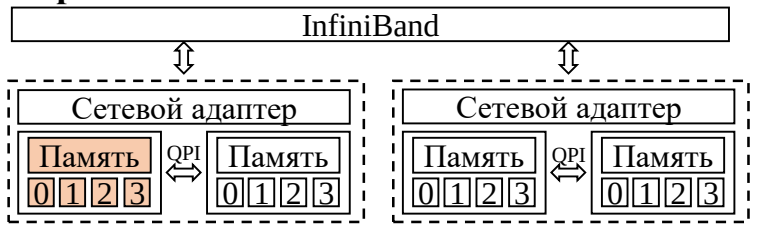
АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ МАШИН

- **Задан** ранг *R* подсистемы ЭМ (количество необходимых процессорных ядер), конфигурация ВС на базе многопроцессорных узлов с общей памятью
- **Требуется** из *K* допустимых вариантов подсистем ранга *R* выбрать подсистему ЭМ, обеспечивающую минимум времени выполнения информационных обменов

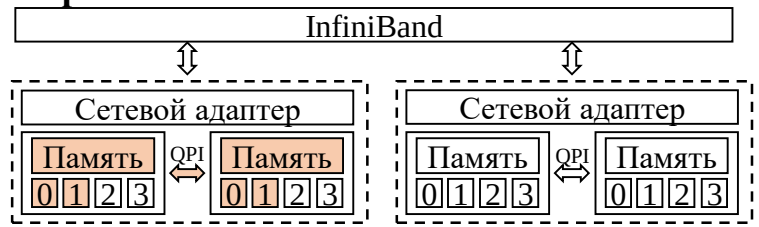
Алгоритм формирования подсистем ЭМ, минимизирующий время реализации коллективных обменов типа «all-to-all» и учитывающий загруженность каналов связи, возникающую в следствии их конкурентного использования процессами параллельных программ

Формирование подсистемы ЭМ ранга 4

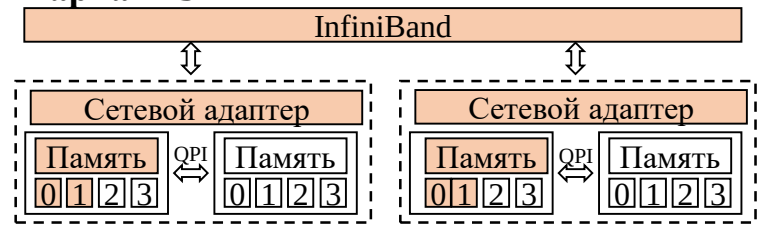
Вариант 1



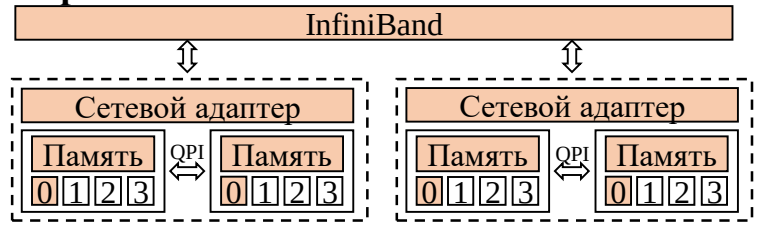
Вариант 2



Вариант 3

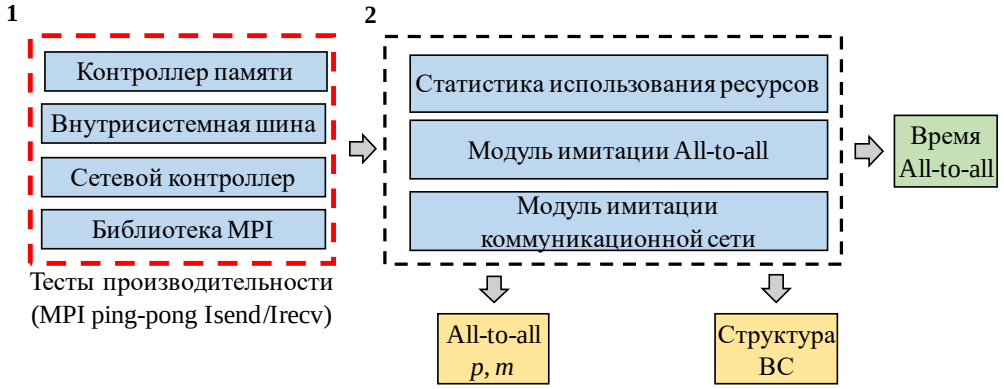


Вариант 4

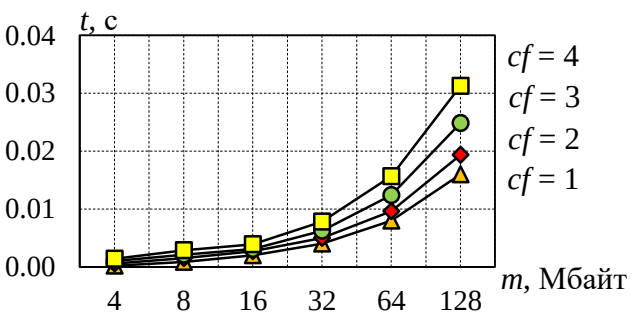


АНАЛИЗ КОНКУРЕНТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ

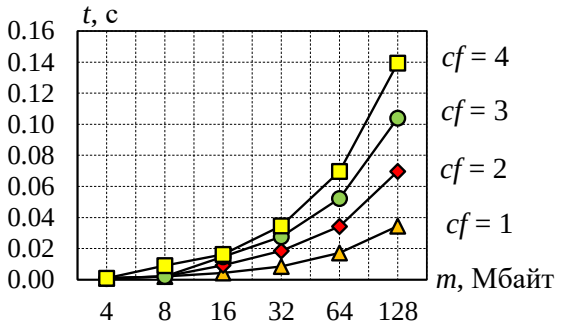
Метод формирования подсистем ЭМ: 1 этап



Время *t* передачи сообщения размером *m* байт при одновременном разделении канала связи *cf* процессами

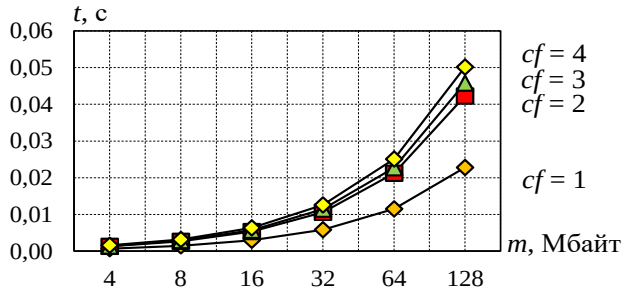


Контроллер памяти NUMA-узла

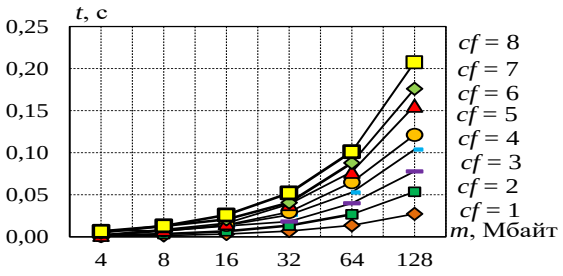


Контроллер памяти SMP-узла

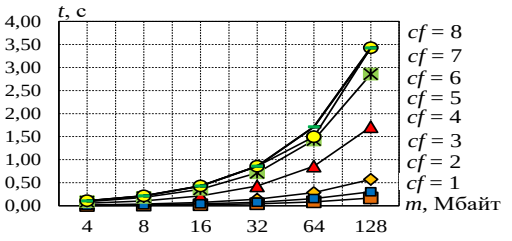
m, Мбайт	Коэффициент падения производительности *t*(*m*, *cf*) / *t*(*m*, 1)			
	cf = 1	*cf* = 2	*cf* = 3	*cf* = 4
128	1	2,03	3,03	4,06
64	1	2,00	3,04	4,06
32	1	2,17	3,23	4,03
16	1	2,17	3,43	3,80
8	1	1,01	1,01	4,27
4	1	0,86	0,82	0,96



Внутрисистемная шина Intel QPI



Сетевой контролер InfiniBand

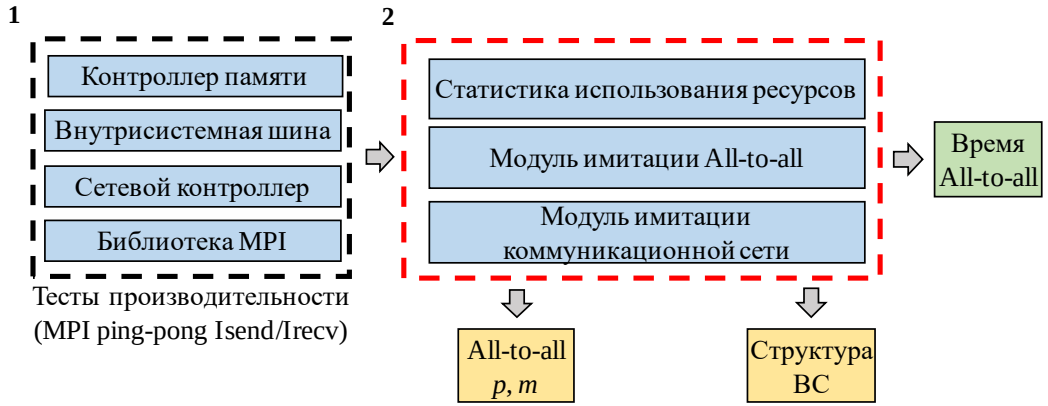


Сетевой контролер Gigabit Ethernet

[*] *E. Peryshkova, M. Kurnosov Experimental Study of Network Contention Effects on All-to-All Operation // Proc. of the 14th International Scientific-Technical Conference «Actual Problems of Electronic Instrument Engineering» (APEIE-2018), 2018. – Vol. 1, Part 4. – P. 506-510. (Scopus)*

АНАЛИЗ КОНКУРЕНТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Метод формирования подсистем ЭМ: 2 этап



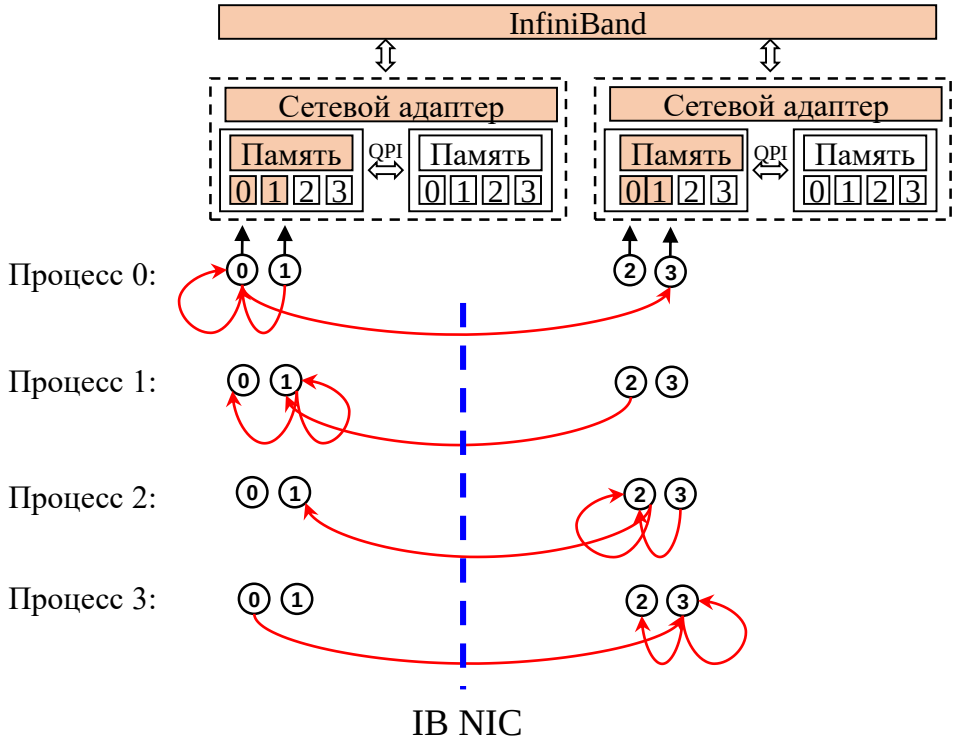
Шаг 1, размер блока 2:

- **Процесс 0**: отправляет и принимает сообщение процессу 0, принимает от процесса 1 и отправляет 3
- **Процесс 1**: отправляет и принимает сообщение процессу 1, принимает от процесса 2 и отправляет 0
- **Процесс 2**: отправляет и принимает сообщение процессу 2, принимает от процесса 3 и отправляет 1
- **Процесс 3**: отправляет и принимает сообщение процессу 3, принимает сообщение от 0 и отправляет 2

Сетевой адаптер первого узла разделяют 4 процесса

$t(m, 4)$

Шаг блочного алгоритма операции MPI_Alltoall



ЭВРИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ ЭМ

Входные данные: *S* – множество симметричных подсистем
Выходные данные: *S* – упорядоченное по возрастанию оценочного времени выполнения операции «all-to-all» множество симметричных подсистем

```
function AllocateSusbsys (S)
   for each subsystem[i] in S do
      time[i] = EstimateOnSubsystem(i)
   end for
   Sort(S, CompareTime)
   return S
end function
```

Входные данные: *subsystem* – симметричная подсистема ЭМ, *m* – размер передаваемого сообщения
Выходные данные: *totaltime* – прогнозируемое время выполнения операции All-to-All

```
function EstimateOnSubsystem (subsystem, m)
   totaltime = 0
   for all steps of All-to-All do
      time = 0
      l = EstimateLayer(step)
      cf = EstimateContentionFactor(step, l)
      time = t(l, m, cf)
      totaltime = totaltime + time
   end for
   return argmax {totaltime}
end function
```

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ ЭМ

- Алгоритм реализован на языке C++
- Конфигурация ВС: 6 NUMA-узлов (2 x Intel Quad Xeon E5620, RAM 24 GiB), InfiniBand QDR
- Программное обеспечение: GNU/Linux x86-64, MVAPICH 2.3

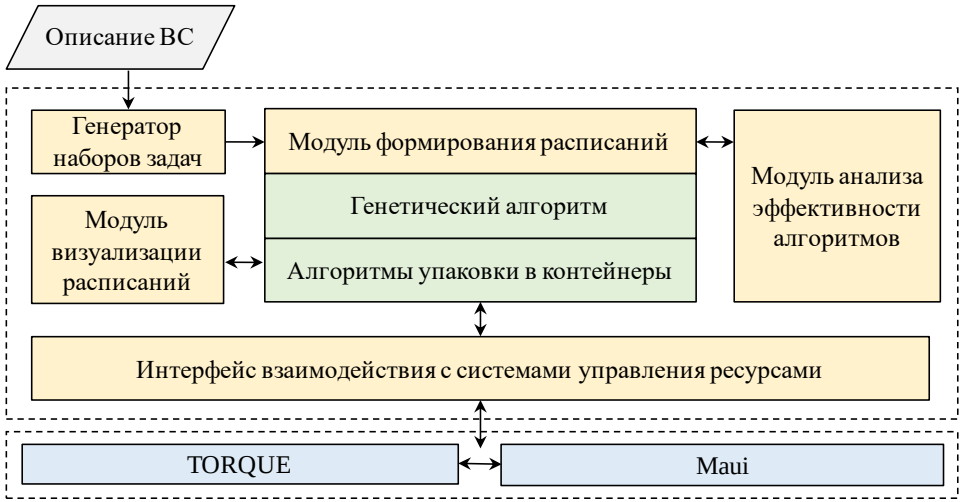
Требуемое количество процессов	Время выполнения операции All-to-all, с		
2	1 ВУ, 2 процессора	2 ВУ, 1 процессор	
Система моделирования	0,00016	0,00033	
Реальный запуск	0,00044	0,00061	
Установленный порядок	1	2	
4	1 ВУ, 4 процессора	2 ВУ, 2 процессора	4 ВУ, 1 процессор
Система моделирования	0,0019	0,0021	0,0018
Реальный запуск	0,0031	0,0036	0,0029
Установленный порядок	2	3	1
8	1 ВУ, 8 процессоров	2 ВУ, 4 процессора	4 ВУ, 2 процессора
Система моделирования	0,00384	0,19	0,0058
Реальный запуск	0,00754	0,09	0,0076
Установленный порядок	1	3	2

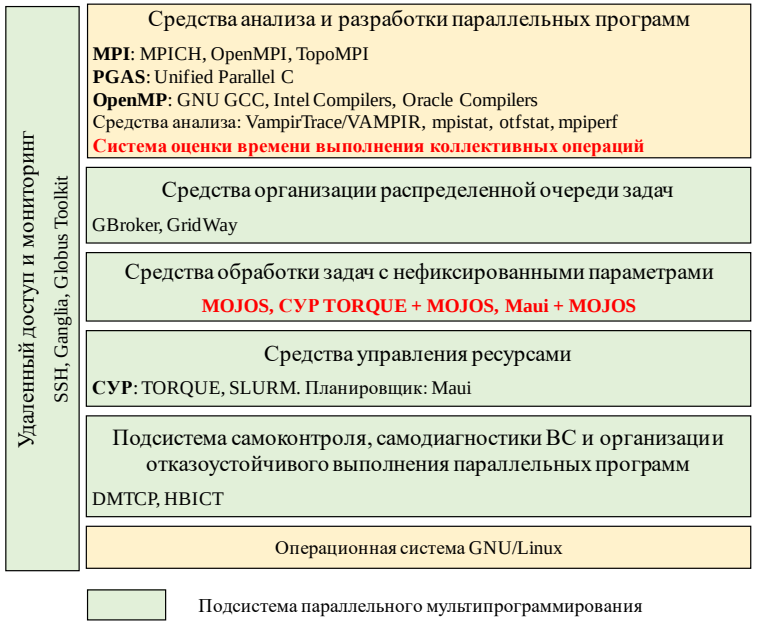
На вычислительных кластерах с многопроцессорными NUMA-узлами и сетью связи стандарта InfiniBand алгоритм ***обеспечивает сокращение времени информационных обменов от 16% до 31%*** по сравнению с известным алгоритмом формирования подсистем FF (first fit)

МУЛЬТИКЛАСТЕРНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МУЛЬТИПРОГРАММИРОВАНИЯ

- На основе созданных алгоритмов разработаны программные пакеты MOJOS обслуживания потоков параллельных задач с нефиксированными параметрами, программное расширение системы управления ресурсами TORQUE, программный пакет поддержки режима обслуживания потока задач с нефиксированными параметрами для планировщика Maui (в соавторстве), программные средства оценки времени реализации коммуникационных операции типа «all-to-all» (в соавторстве)
- Предложенные пакеты вошли в состав инструментария параллельного мультипрограммирования пространственно-распределенной мультикластерной ВС, созданной членами ведущей научной школы РФ (НШ-9505.2006.9, НШ-2121.2008.9, НШ-5176.2010.9, НШ-2175.2012.9, основатель – чл.-корр. РАН В.Г. Хорошевский)





[*] *А.В. Ефимов, С.Н. Мамойленко, Е.Н. Перышкова Модернизация системы управления ресурсами PBS/TORQUE и планировщика Maui для обслуживания масштабируемых задач // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 2. – С. 34-39.*

Спасибо за внимание!

Перышкова Евгения Николаевна

к.т.н. доцент Кафедры ВТ

НГТУ

e-mail: e.peryshkova@gmail.com