Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Факультет Вычислительной математики и кибернетики

СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ И ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ (лекция 4)

А.С.Антонов

Вед. н.с. НИВЦ МГУ, к.ф.-м.н.

asa@parallel.ru

ВМК МГУ, 2024

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Основные обозначения:

p — число процессов.

T_1 — *время выполнения последовательной реализации*. Таких реализаций может быть много, часто говорят о сравнении либо с наилучшей последовательной реализацией, либо же в качестве последовательной реализации берут саму параллельную программу, запущенную с использованием одного процесса.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

T_p — *общее время работы программы на p процессах*. Под временем работы параллельной программы обычно понимают максимальное из времён работы отдельных процессов.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Ускорение (*speedup*) $S = T_1/T_p$, где T_p — время исполнения распараллеленной программы на p процессах, T_1 — время исполнения последовательной программы.

Если в качестве времени T_1 берётся наилучшая последовательная реализация, то иногда ускорение называют *абсолютным*, если же в качестве времени T_1 берётся время выполнения самой параллельной программы, запущенной с использованием одного процесса, то ускорение называют *относительным*.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

В идеальном случае (отсутствие накладных расходов на организацию параллелизма) получаем S = p – *линейное ускорение*.

Суперлинейное ускорение S > p. Чаще всего объясняется более эффективным использованием иерархии памяти компьютера (в частности, кэш-памяти).

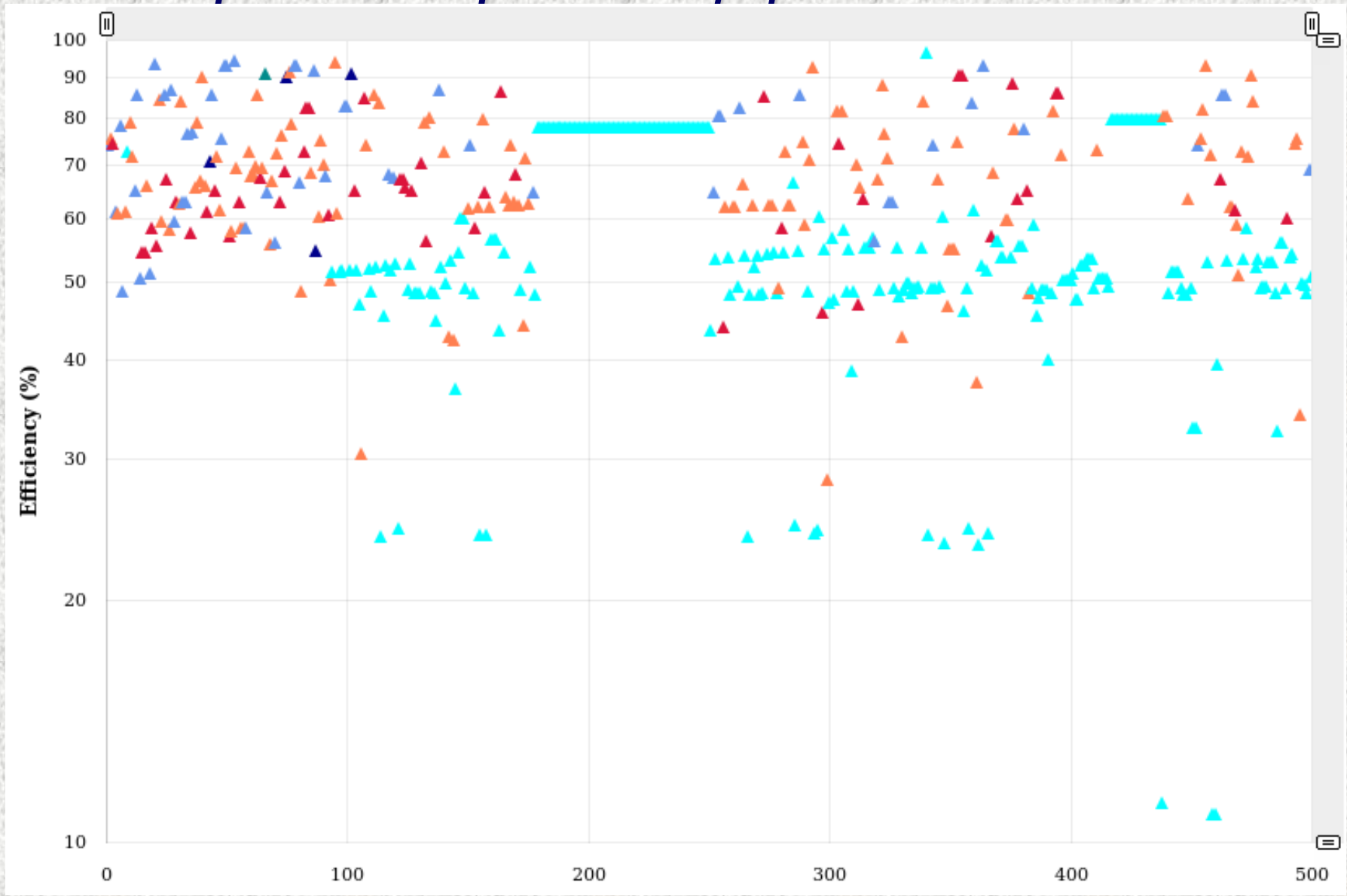
Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Эффективность реализации программы $E_r = R_{max}/R_{peak}$ определяется как отношение реальной производительности R_{max} к пиковой производительности R_{peak}.

Поскольку пиковая производительность недостижима на практике, эффективность реализации программы всегда меньше единицы.

Чем ближе этот показатель к единице, тем лучше для пользователя, поскольку говорит о том, что более эффективно задействованы ресурсы компьютера.

Top500, Linpack, Эффективность



Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Эффективность распараллеливания

$E_p = S/p$ определяет, какую долю максимального возможного (без учёта эффекта суперлинейности) ускорения удалось получить на данной параллельной реализации алгоритма.

Оценка качества распараллеливания предполагает получение наилучших (максимальных) значений ускорения и эффективности распараллеливания.

Получение большого ускорения за счёт большого числа процессов зачастую приводит к снижению эффективности распараллеливания.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Стоимость (cost) вычислений $C = pT_p$. Часто говорят про *стоимостно-оптимальные* (*cost-optimal*) параллельные алгоритмы, если стоимость их реализации является пропорциональной времени выполнения реализации наилучшего последовательного алгоритма.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

$T_0 = pT_p - T_1$ — суммарные *накладные расходы (total overhead)*. При увеличении p значение, как правило, возрастает.

$T_p = (T_1 + T_0)/p$

$S = T_1/T_p = pT_1/(T_1 + T_0)$

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

$E_p = S/p = T_1/(T_1+T_0)=1/(1+T_0/T_1)$

Если T_1 фиксировано, то при увеличении числа процессов p эффективность распараллеливания E_p, как правило, уменьшается за счёт роста накладных расходов T_0.

Если фиксировано число процессов p, то эффективность распараллеливания E_p можно увеличить, увеличивая сложность решаемой задачи T_1.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Масштабируемость (*scalability*) — способность системы увеличивать свою производительность при добавлении ресурсов (обычно аппаратных).

Система называется *масштабируемой*, если она способна увеличивать производительность пропорционально дополнительным ресурсам.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Масштабируемость можно оценить через отношение прироста производительности системы к приросту используемых ей ресурсов.

Чем ближе это отношение к единице, тем масштабируемость лучше.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Масштабируемость:

- Компьютера или его компонент (например, коммуникационной сети).
- Алгоритмов безотносительно к компьютеру.
- Параллельных программ относительно данного компьютера.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Масштабируемость компьютера:

Вертикальная масштабируемость (*масштабируемость вглубь, scale up*) – возможность замены платформы, в которой функционирует система, на новую, обладающую большей производительностью.

Горизонтальная масштабируемость (*масштабируемость вширь, scale out*) – возможность увеличения производительности системы за счет добавления дополнительных программных или аппаратных средств.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Вычислительная (последовательная) сложность задачи W – количество основных вычислительных шагов лучшего последовательного алгоритма, необходимых для решения задачи на одном процессе.

W является некоторой функцией от размера входных данных.

Если для простоты предположить, что каждый основной вычислительный шаг алгоритма выполняется за единицу времени, то получим $W = T_1$.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Примеры:

Для сложения N чисел:

$W = N-1$

Для скалярного произведения векторов:

$W = 2N-1$

Для перемножения матриц:

$W = N^2(2N-1)$

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Масштабируемость параллельной программы определяется относительно конкретного компьютера и показывает, как изменяются динамические характеристики данной программы при использовании бóльших вычислительных ресурсов.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Масштабируемость параллельных программ:

Сильная масштабируемость (strong scaling) — зависимость производительности R_{max} от количества процессов p при фиксированной вычислительной сложности задачи (W = const).

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Масштабируемость параллельных программ:

Масштабируемость вширь (wide scaling) – зависимость производительности R_{max} от вычислительной сложности задачи W при фиксированном числе процессов (p = const).

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Масштабируемость параллельных программ:

Слабая масштабируемость (*weak scaling*) — зависимость производительности R_{max} от количества процессов p при фиксированной вычислительной сложности задачи в пересчёте на один процесс (W/p = const).

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Нужна метрика масштабируемости.

Для многих задач при увеличении вычислительной сложности задачи W (а, следовательно, и времени T_1) эффективность распараллеливания E_p растёт.

Если при одновременном увеличении числа процессов p и вычислительной сложности задачи W эффективность распараллеливания E_p остаётся прежней, данную задачу на данном компьютере можно считать *масштабируемой*.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Определим, в какой степени должна увеличиваться вычислительная сложность задачи W в зависимости от числа процессов p, чтобы эффективность распараллеливания E_p оставалась постоянной. Эта характеристика будет показывать масштабируемость конкретной вычислительной системы.

Чем меньше необходимая степень роста W для поддержания нужного уровня эффективности распараллеливания E_p, тем более масштабируемой является система.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

$E_p = 1/(1+T_0/T_1) = 1/(1+T_0/W)$.

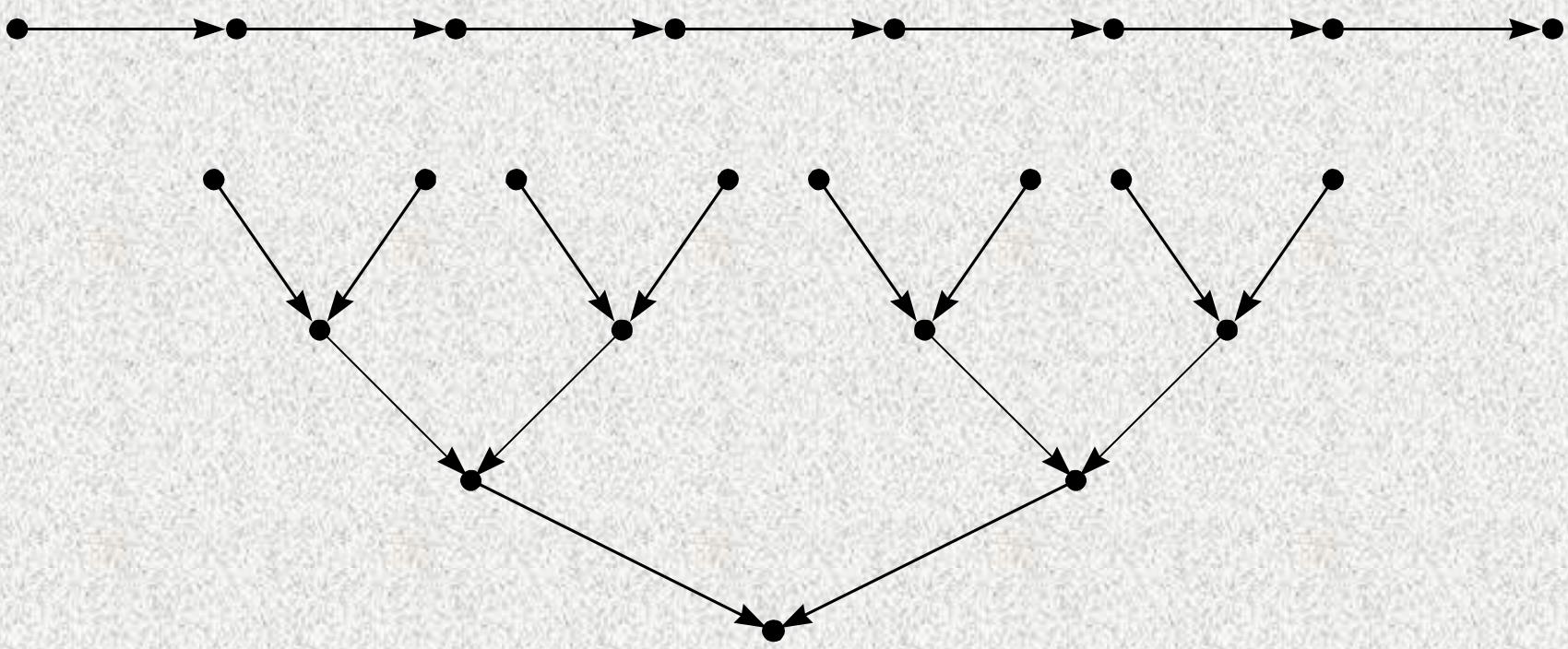
$W = E_p/(1-E_p)*T_0 = K*T_0$, где $K = E_p/(1-E_p)$

Получившаяся зависимость размера задачи, необходимой для достижения заданной эффективности распараллеливания, от числа процессов – *функция изоэффективности (isoefficiency function)*.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Пример:

Суммирование методом сдваивания (каскадная схема).



Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Пример:

Пусть для сложения n чисел используется p процессов

$W = T_1 \approx n$

$T_p \approx n/p + 2\log_2 p$

$S = T_1/T_p = n/(n/p+2\log_2 p) = p/(1+2p\log_2 p/n)$

$E_p = S/p = 1/(1+2p\log_2 p/n)$

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Пример:

$C = pT_p = p(n/p+2\log_2 p) = n+2p\log_2 p$

$T_0 = pT_p - T_1 = 2p\log_2 p$

$W = KT_0 = 2Kp\log_2 p = \Theta(p\log_2 p)$

При увеличении числа процессов от p до p' для поддержания постоянной эффективности распараллеливания E_p необходимо увеличить размер задачи в $(p'\log_2 p')/(p\log_2 p)$ раз.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Пример:

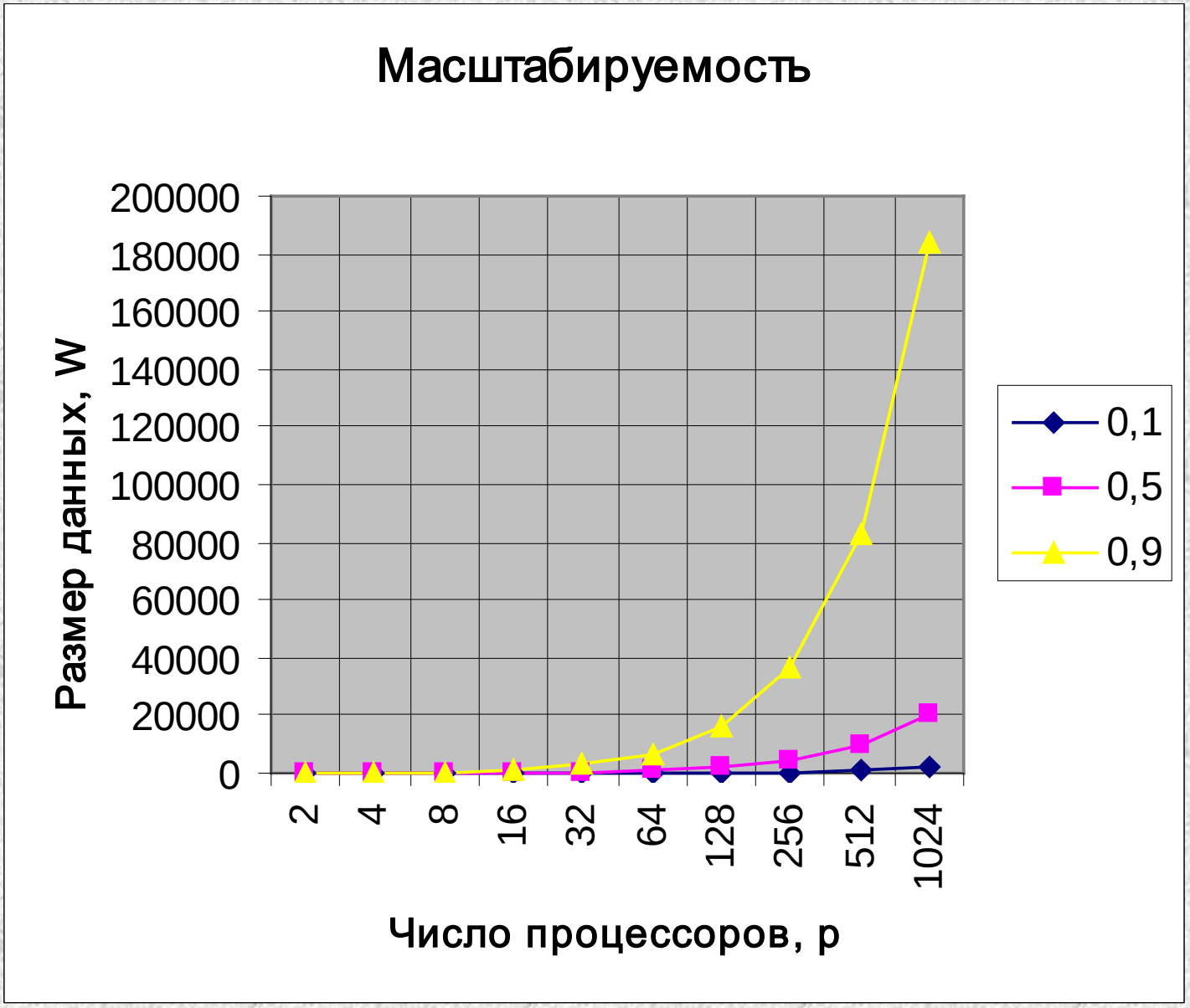
Пусть $E_p = 0.5$, тогда $K = E_p/(1-E_p) = 1$.

Пусть $p = 16$, тогда $W = 2Kp\log_2 p = 128$.

Пусть $p = 64$, тогда $W = 2Kp\log_2 p = 768$.

Пусть $p = 1024$, тогда $W = 2Kp\log_2 p = 20480$.

Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ



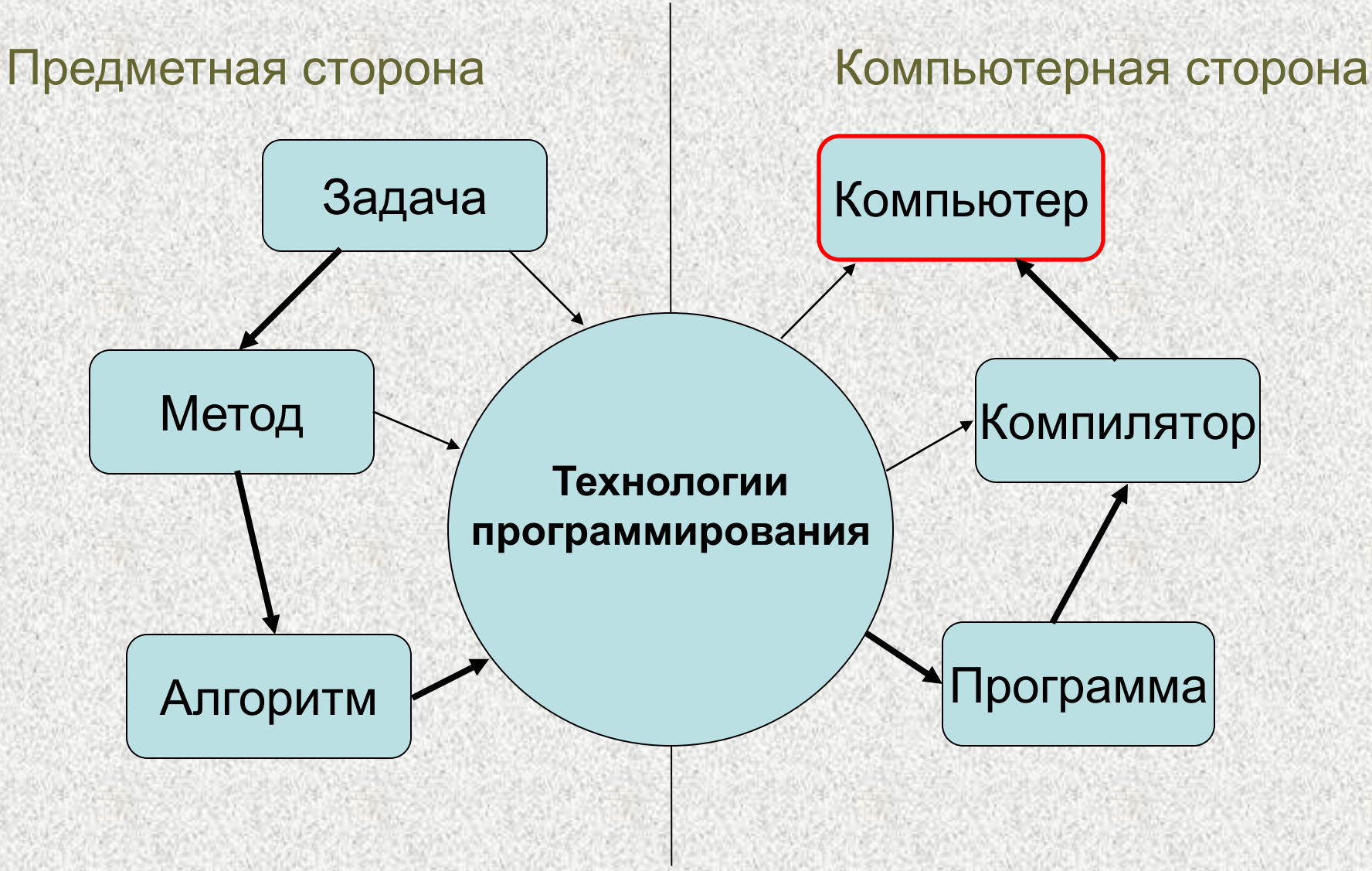
Основные показатели эффективности и масштабируемости параллельных программ

Основные помехи масштабируемости параллельных программ:

- Закон Амдала (последовательные части программы).
- Накладные расходы на коммуникации (латентность, пропускная способность).
- Неравномерность загрузки (load balancing) процессов.
- Предел декомпозиции данных.

Архитектура параллельных вычислительных систем

Решение задачи на компьютере



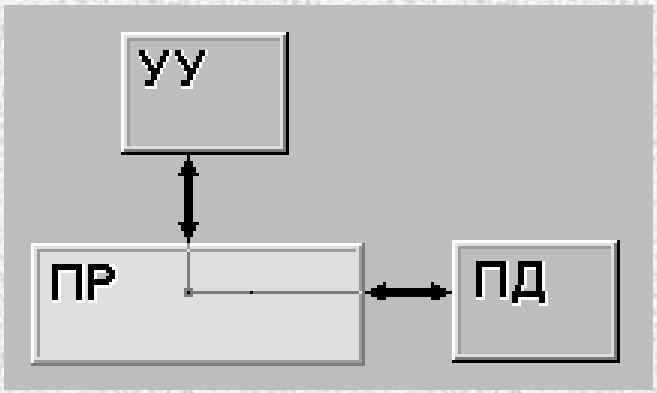
Классификация Флинна

По-видимому, самой ранней и наиболее известной является классификация архитектур вычислительных систем, предложенная в 1966 году М.Флинном.

Классификация базируется на понятии потока, под которым понимается последовательность элементов, команд или данных, обрабатываемая процессором. На основе числа потоков команд и потоков данных Флинн выделяет четыре класса архитектур: SISD,MISD,SIMD,MIMD.

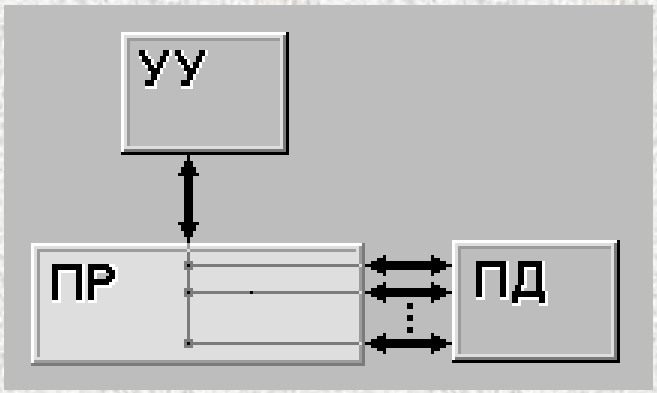
Классификация Флинна

SISD (single instruction stream / single data stream) - одиночный поток команд и одиночный поток данных. К этому классу относятся, прежде всего, классические последовательные машины, или иначе, машины фон-неймановского типа. В таких машинах есть только один поток команд, все команды обрабатываются последовательно друг за другом и каждая команда инициирует одну операцию с одним потоком данных. Для увеличения скорости обработки команд и скорости выполнения арифметических операций может применяться конвейерная обработка.



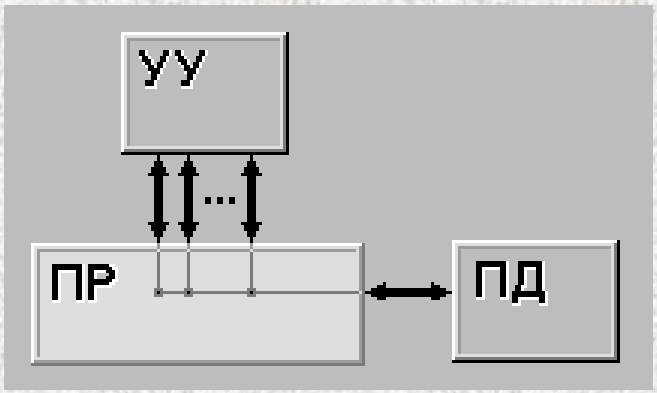
Классификация Флинна

SIMD (single instruction stream / multiple data stream) - одиночный поток команд и множественный поток данных. В архитектурах подобного рода сохраняется один поток команд, включающий, в отличие от предыдущего класса, векторные команды. Это позволяет выполнять одну арифметическую операцию сразу над многими данными - элементами вектора. Способ выполнения векторных операций не оговаривается, поэтому обработка элементов вектора может производится либо процессорной матрицей, либо с помощью конвейера.



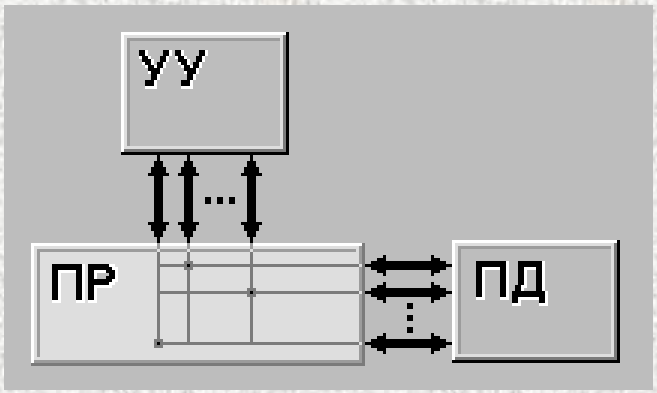
Классификация Флинна

MISD (multiple instruction stream / single data stream) - множественный поток команд и одиночный поток данных. Определение подразумевает наличие в архитектуре многих процессоров, обрабатывающих один и тот же поток данных. Данный класс пуст.

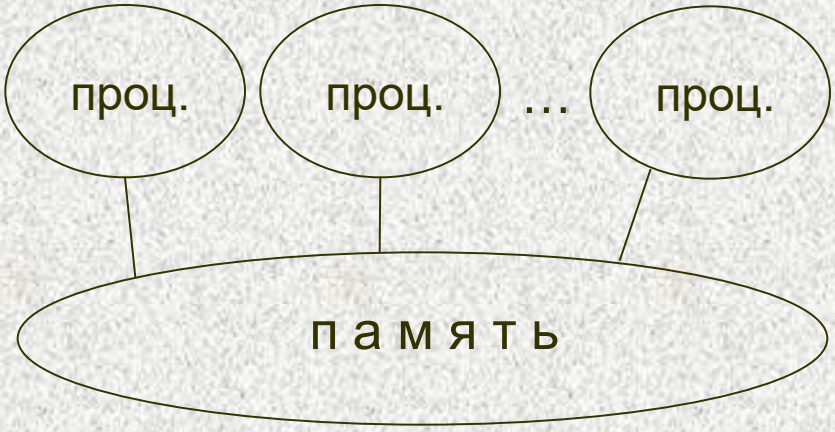


Классификация Флинна

MIMD (multiple instruction stream / multiple data stream) - множественный поток команд и множественный поток данных. Этот класс предполагает, что в вычислительной системе есть несколько устройств обработки команд, объединенных в единый комплекс и работающих каждое со своим потоком команд и данных.



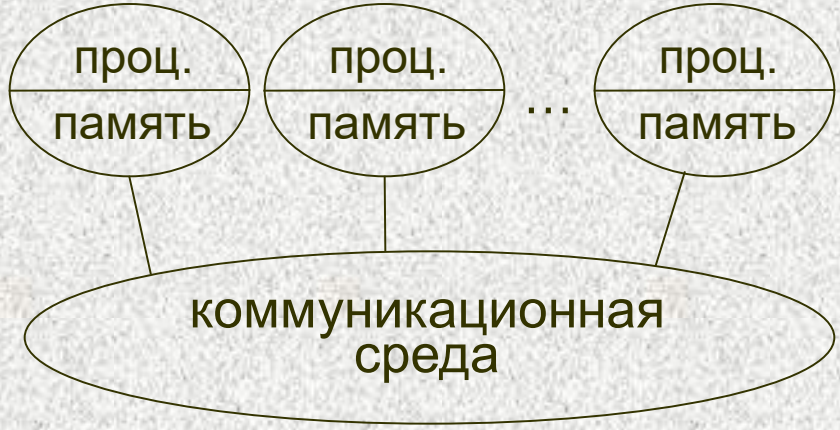
Компьютеры с общей памятью



SMP-компьютеры, два варианта расшифровки:
Shared Memory Processors
Symmetric MultiProcessor

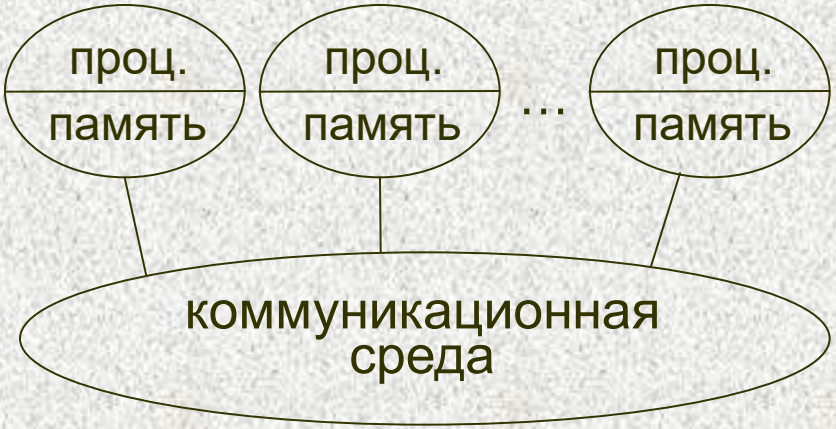
В SMP-компьютерах все, кроме процессоров, в одном экземпляре: образ операционной системы, память, подсистема ввода-вывода…

Компьютеры с распределенной памятью



Компьютеры с распределенной памятью состоят из вычислительных узлов, каждый из которых является полноценным компьютером со своей памятью, ОС, устройствами ввода-вывода и т.п., взаимодействующих друг с другом через коммуникационную среду.

Компьютеры с общей и распределенной памятью



+ относительная простота параллельного программирования,
– сложность увеличения числа процессоров (роста производительности)

– сложность параллельного программирования,
+ относительная простота увеличения числа процессоров (роста производительности)

Высокопроизводительные компьютеры и две задачи параллельных вычислений

Две задачи параллельных вычислений:

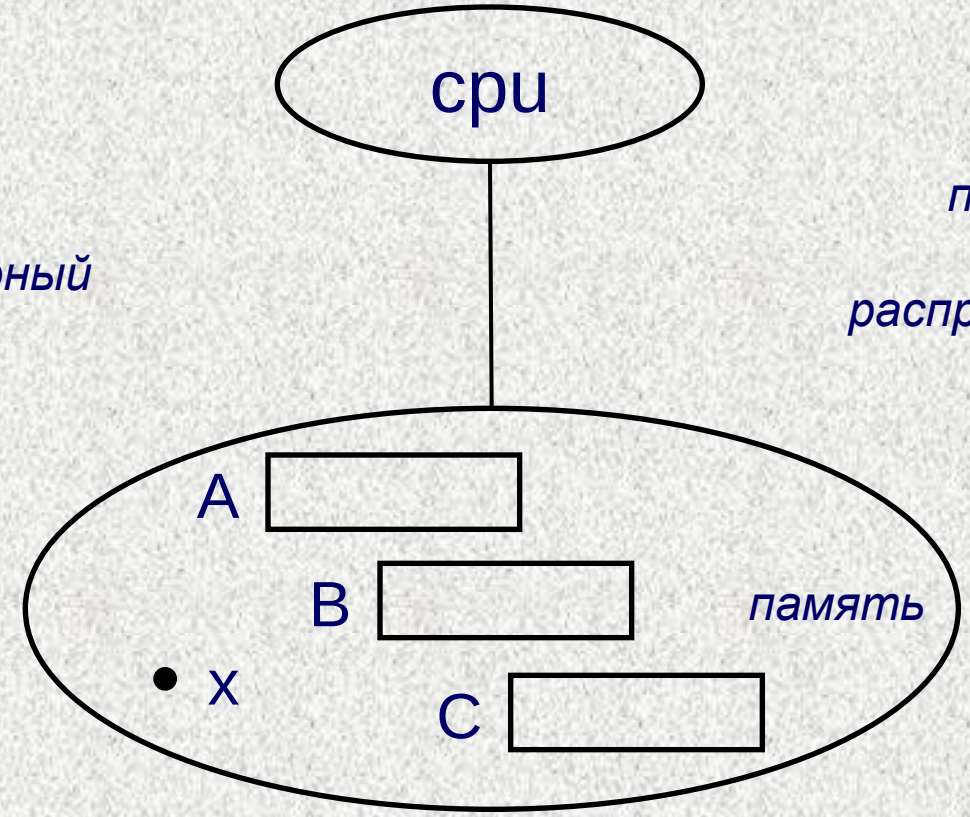
- *построение вычислительных систем с максимальной производительностью:*
  - *это компьютеры с распределенной памятью*

- *эффективное программирование параллельных вычислительных систем:*
  - *это компьютеры с общей памятью.*

Почему компьютеры с распределенной памятью программировать сложнее, чем компьютеры с общей памятью?

Программирование на общей и распределенной памяти

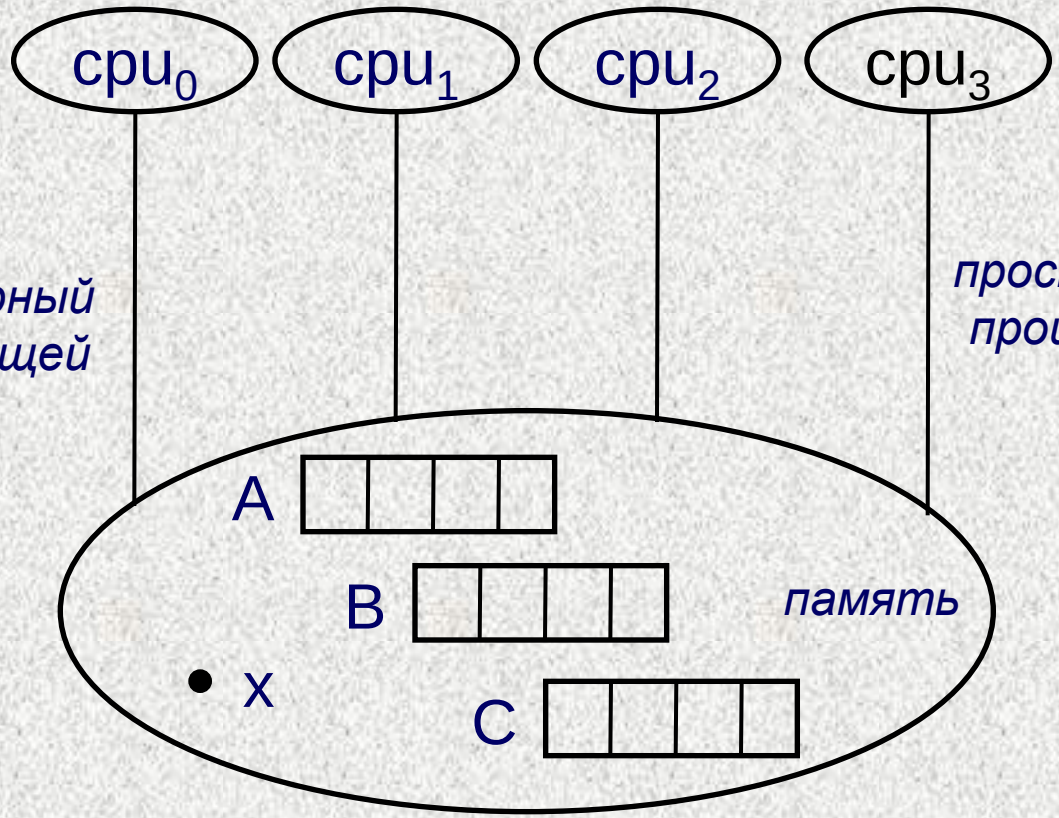
Однопроцессорный компьютер



Одно адресное пространство, один процессор, с распределением работы проблем нет.

$$A_i = B_i + C_i * x, \quad i = 1, \ldots, n$$

Программирование на общей и распределенной памяти

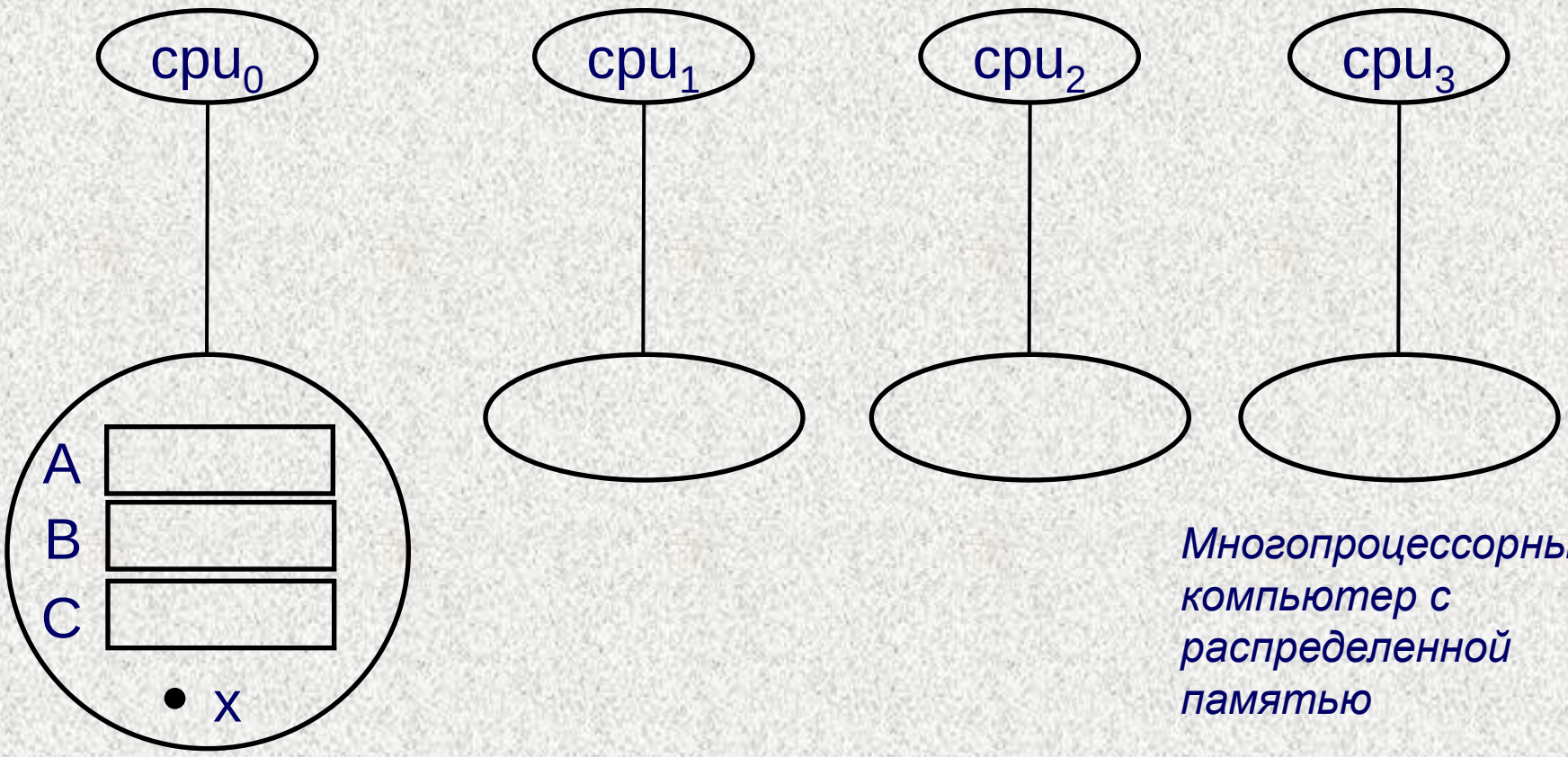


Многопроцессорный компьютер с общей памятью

Единое адресное пространство, много процессоров, каждый выполняет свою часть работы.

$$A_i = B_i + C_i * x, \quad i = 1, \ldots, n$$

Программирование на общей и распределенной памяти

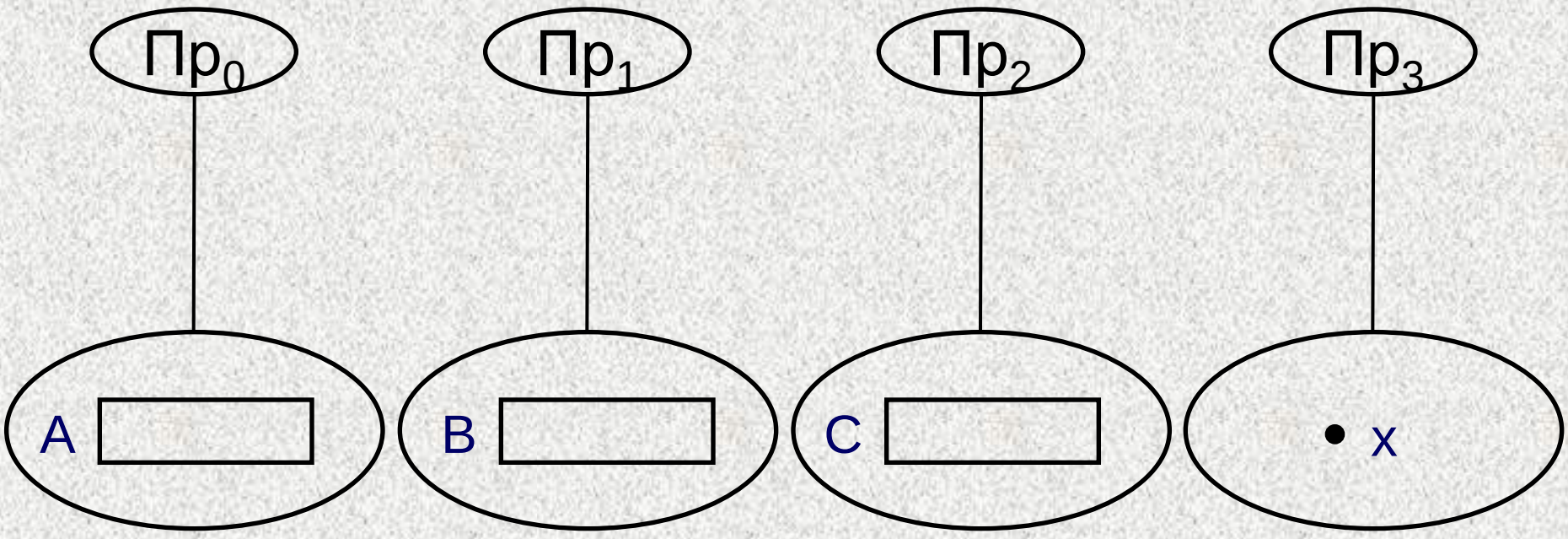


Многопроцессорный компьютер с распределенной памятью

Различные адресные пространства, плохое распределение данных, низкая локальность данных, много пересылок, низкая производительность.

$$A_i = B_i + C_i * x, \quad i = 1, \ldots, n$$

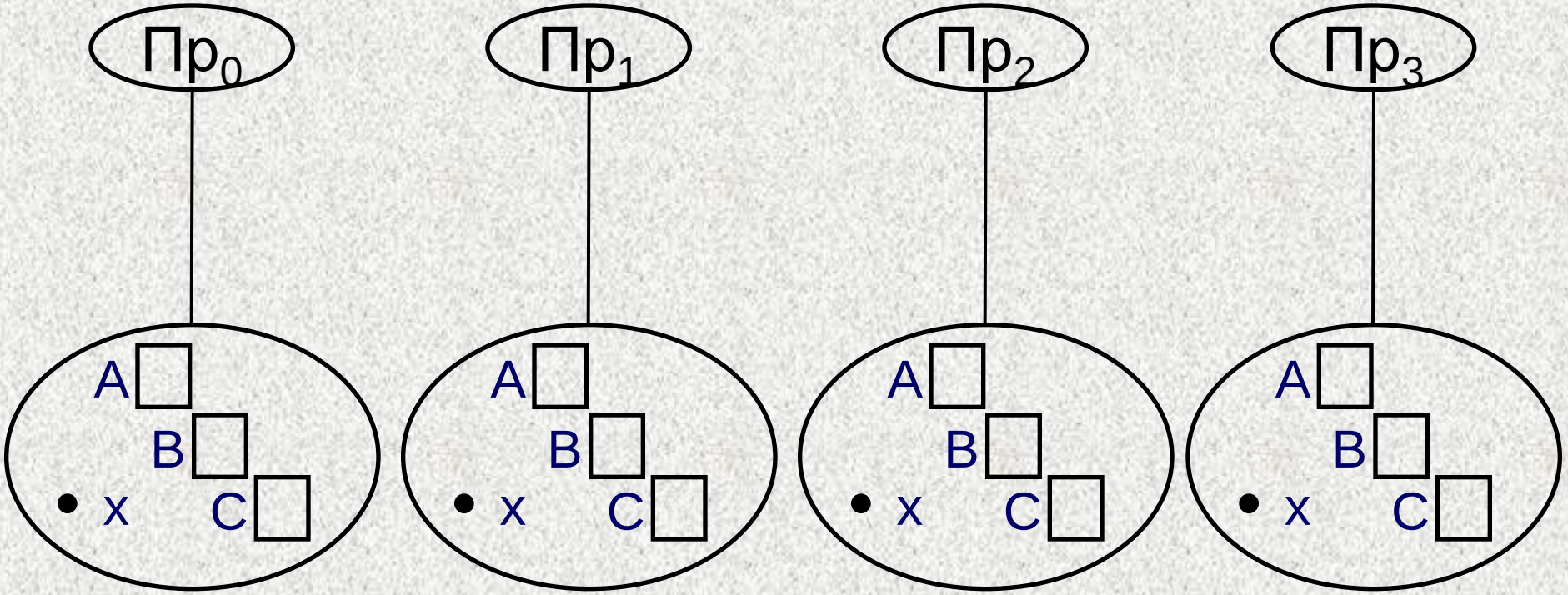
Программирование на общей и распределенной памяти



Различные адресные пространства, плохое распределение данных, низкая локальность данных, много пересылок, низкая производительность.

$$A_i = B_i + C_i * x, \quad i = 1, \ldots, n$$

Программирование на общей и распределенной памяти



Различные адресные пространства, хорошее распределение данных, высокая локальность данных, мало пересылок, высокая производительность.

$$A_i = B_i + C_i * x, \quad i = 1, \ldots, n$$

Программирование на общей и распределенной памяти

Последовательный алгоритм:

```
N=1000;
for(i=0; i<N; ++i)
   A[i]=B[i]+C[i]*x;
for(i=0; i<N; ++i)
   A[i]=(A[i]+C[i])*B[N-i-1];
```

На последовательном компьютере все данные (массивы A, B, C и скаляр x) лежат в общей памяти, различий в классах переменных нет.

Программирование на общей и распределенной памяти

Оба цикла являются параллельными, их итерации могут быть распределены между процессорами. Распределение вычислений обязательно должно быть согласовано с распределением данных!

На параллельном компьютере с общей памятью распределение данных не требуется (память общая), нужно распределить операции (итерации циклов). Возможных вариантов распределений очень много.

Программирование на общей и распределенной памяти

Первый вариант (блочное распределение итераций):

```
N=1000;
n_pr=4;
size=N/n_pr;
ibegin=proc_id*size;
iend=ibegin+size;
for(i=ibegin; i<iend; ++i)
   A[i]=B[i]+C[i]*x;
for(i=ibegin; i<iend; ++i)
   A[i]=(A[i]+C[i])*B[N-i-1];
```

Возникает понятие классов переменных. В данном случае переменные proc_id, i, ibegin, iend должны быть локальными (своя копия на каждом процессоре), а переменные A, B, C, x должны быть распределёнными (одна копия данных для всех процессоров).

Программирование на общей и распределенной памяти

Другой вариант (циклическое распределение итераций):

```
N=1000;
n_pr=4;
for(i=proc_id; i<N; i+=n_pr)
   A[i]=B[i]+C[i]*x;
for(i=proc_id; i<N; i+=n_pr)
   A[i]=(A[i]+C[i])*B[N-i-1];
```

Переменные proc_id, i должны быть локальными (своя копия на каждом процессоре), а переменные A, B, C, x должны быть распределёнными (одна копия данных для всех процессоров).

Программирование на общей и распределенной памяти

На параллельном компьютере с распределённой памятью помимо распределения операций требуется также распределение данных по локальным модулям памяти разных процессоров и организация обменов данными.

```
N=1000;
n_pr=4;
N1=N/n_pr;
<обмен 1> // рассылка частей массивов A, B, C и скаляра x
for(i=0; i<N1; ++i)
   A[i]=B[i]+C[i]*x;
<обмен 2> // обмен частями B: процессы 0<->3 и 1<->2
for(i=0; i<N1; ++i)
   A[i]=(A[i]+C[i])*B[N-i-1];
<обмен 3> // пересылка результирующего массива A
```

Программирование на общей и распределенной памяти

Для эффективного программирования компьютеров С общей памятью необходимо:

1.Найти в программе ресурс параллелизма.
2.Распределить операции по исполнительным устройствам.
3.Разграничить доступ к данным в общей памяти.

Программирование на общей и распределенной памяти

Для эффективного программирования компьютеров с распределенной памятью необходимо:

1. *Найти в программе ресурс параллелизма.*
2. *Распределить данные по модулям памяти вычислительных узлов.*
3. *Распределить операции по исполнительным устройствам.*
4. *Согласовать распределение данных с параллелизмом вычислений.*
5. *Организовать необходимые пересылки данных.*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Факультет Вычислительной математики и кибернетики

СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ И ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ (лекция 4)

А.С.Антонов

Вед. н.с. НИВЦ МГУ, к.ф.-м.н.

asa@parallel.ru

ВМК МГУ, 2024