

Интернет Университет Суперкомпьютерных технологий

Введение

Учебный курс

Параллельное программирование с OpenMP

Бахтин В.А., кандидат физ.-мат. наук,
заведующий сектором,
Институт прикладной математики им.
М.В.Келдыша РАН

Содержание

- ❑ Тенденции развития современных процессоров
- ❑ Существующие подходы для создания параллельных программ
- ❑ Основные возможности OpenMP
- ❑ Литература

Тенденции развития современных процессоров

В течение нескольких десятилетий развитие ЭВМ сопровождалось удвоением их быстродействия каждые 1.5-2 года. Это обеспечивалось и повышением тактовой частоты и совершенствованием архитектуры (параллельное и конвейерное выполнение команд).

Узким местом стала оперативная память. Знаменитый закон Мура, так хорошо работающий для процессоров, совершенно не применим для памяти, где скорости доступа удваиваются в лучшем случае каждые 6 лет.

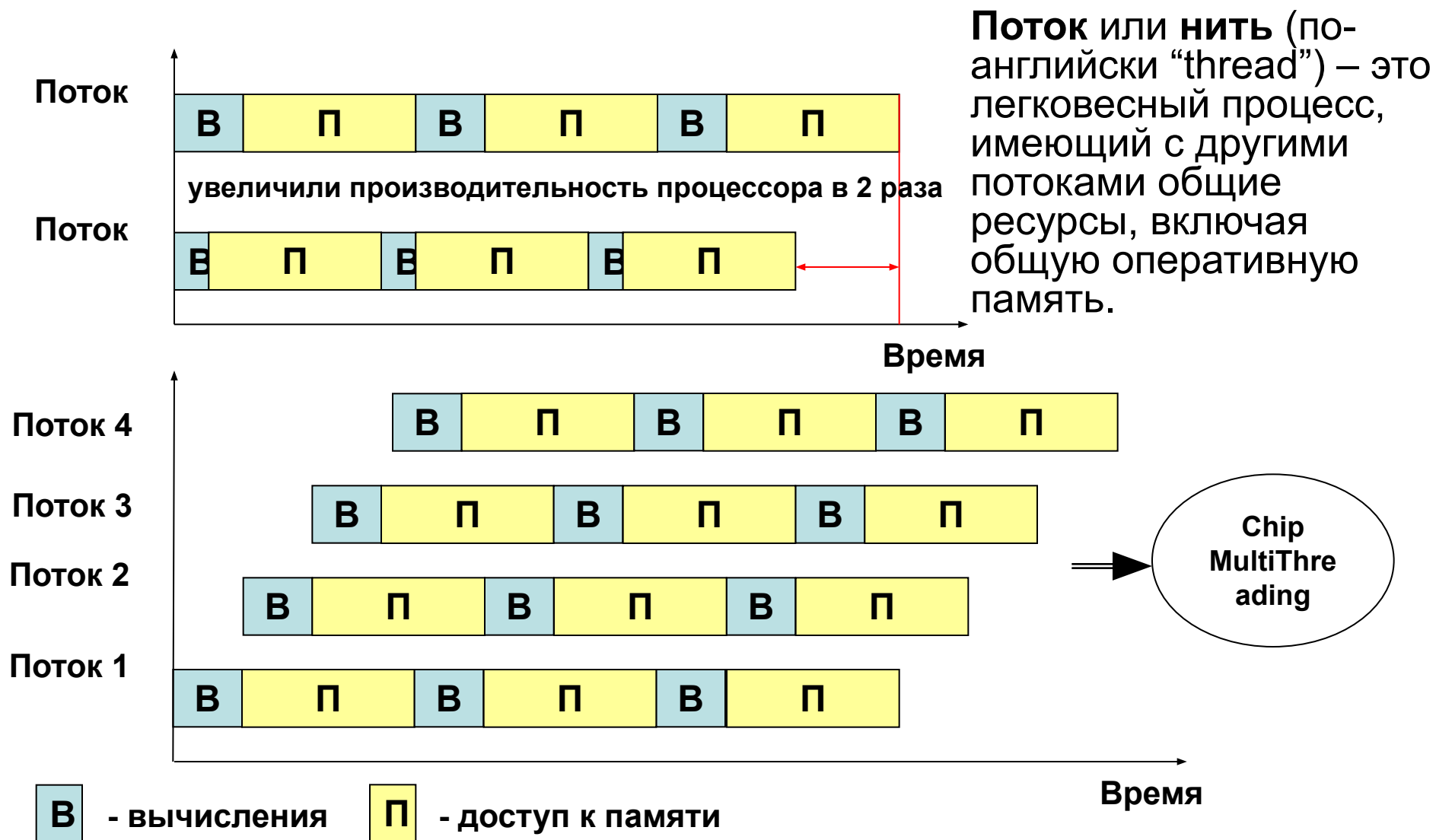
Совершенствовались системы кэш-памяти, увеличивался объем, усложнялись алгоритмы ее использования.

Для процессора Intel Itanium:

- ❑ Latency to L1: 1-2 cycles
- ❑ Latency to L2: 5 - 7 cycles
- ❑ Latency to L3: 12 - 21 cycles
- ❑ Latency to memory: 180 – 225 cycles

Важным параметром становится - **GUPS** (Giga Updates Per Second)

Тенденции развития современных процессоров



Тенденции развития современных процессоров

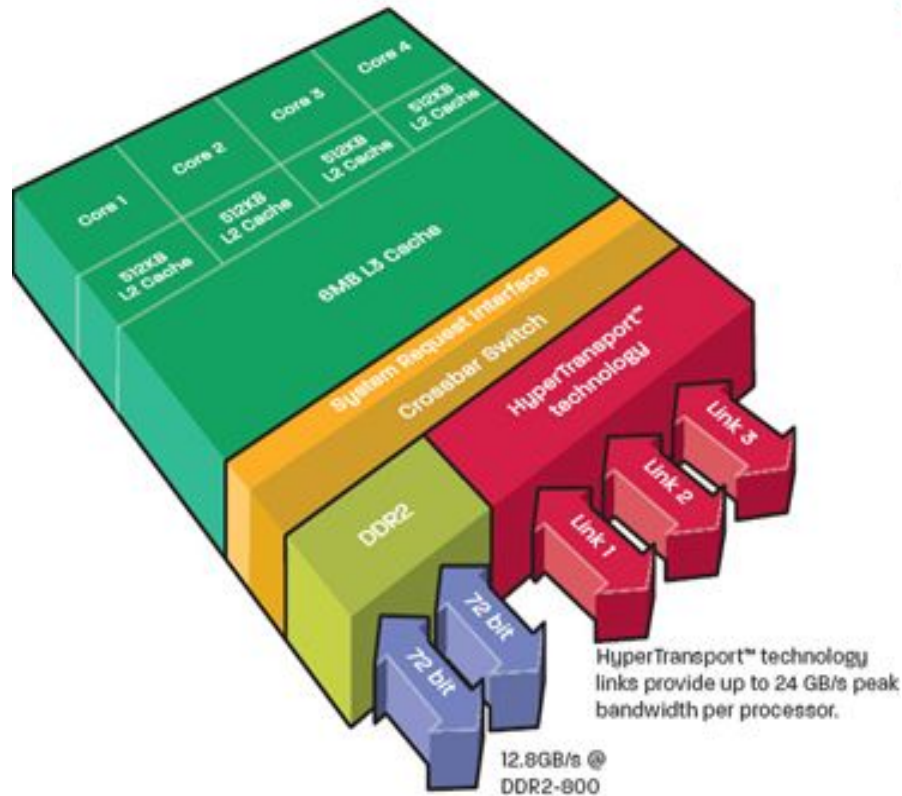
Суперкомпьютер СКИФ МГУ «Чебышев»

- ❑ Пиковая производительность - 60 TFlop/s
- ❑ Число процессоров/ядер в системе - 1250 / 5000
- ❑ Производительность на Linpack - 47.04 TFlop/s (78.4% от пиковой)
- ❑ Номинальное энергопотребление компьютера - **330 кВт**
- ❑ Энергопотребление комплекса - **720 кВт**

Важным параметром становится – **Power Efficiency (Megaflops/watt)**

Как добиться максимальной производительности на Ватт => Chip MultiProcessing, многоядерность.

Тенденции развития современных процессоров



Quad-Core AMD Opteron

- ❑ 4 ядра
- ❑ встроенный контроллер памяти (2 канала памяти DDR2 800 МГц)
- ❑ 3 канала «точка-точка» с использованием HyperTransport

Тенденции развития современных процессоров



Intel Core i7 (архитектура Nehalem)

- ❑ 4 ядра
- ❑ 8 потоков с технологией Intel Hyper-Threading
- ❑ 8 МБ кэш-памяти Intel Smart Cache
- ❑ встроенный контроллер памяти (3 канала памяти DDR3 1066 МГц)
- ❑ технология Intel QuickPath Interconnect

Тенденции развития современных процессоров



SUN UltraSPARC T2 Processor (Niagara 2)

- ☐ 8 ядер
- ☐ 64 потоков
- ☐ 4 контроллера памяти
- ☐ потребляемая мощность – 60-123Ватт
- ☐ встроенный котроллер 2x10 Gigabit Ethernet

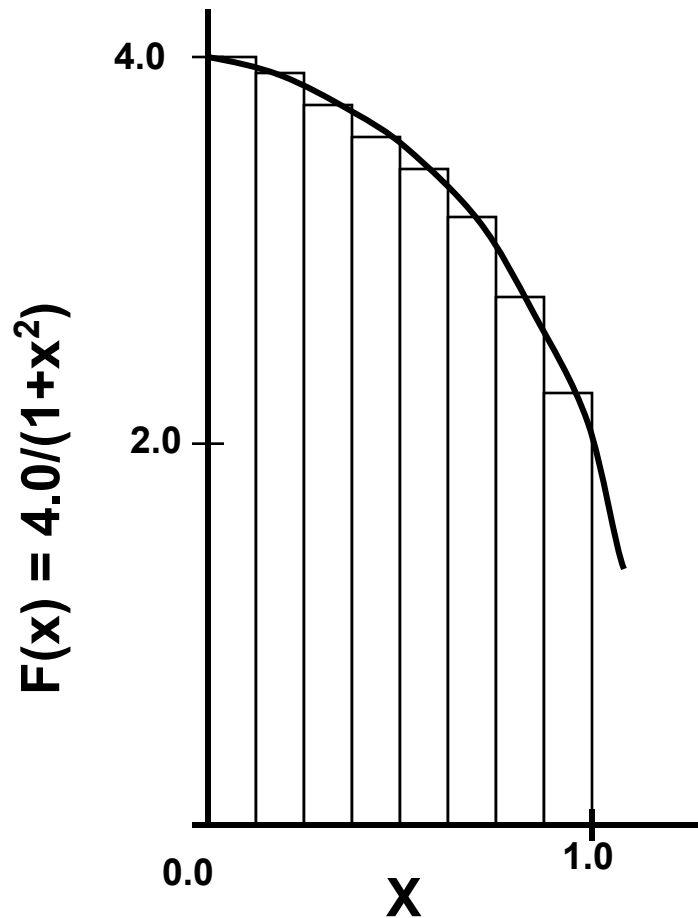
Тенденции развития современных процессоров

- ❑ Темпы уменьшения латентности памяти гораздо ниже темпов ускорения процессоров + прогресс в технологии изготовления кристаллов => CMT (Chip MultiThreading)
- ❑ Опережающий рост потребления энергии при росте тактовой частоты + прогресс в технологии изготовления кристаллов => CMP (Chip MultiProcessing, многоядерность)
- ❑ И то и другое требует более глубокого распараллеливания для эффективного использования аппаратуры

Существующие подходы для создания параллельных программ

- ❑ Автоматическое распараллеливание
- ❑ Библиотеки нитей
 - Win32 API
 - POSIX
- ❑ Библиотеки передачи сообщений
 - MPI
- ❑ OpenMP

Вычисление числа π



$$\int_0^1 \frac{4.0}{(1+x^2)} dx = \pi$$

Мы можем
аппроксимировать интеграл
как сумму прямоугольников:

$$\sum_{i=0}^N F(x_i) \Delta x \approx \pi$$

Где каждый прямоугольник
имеет ширину Δx и высоту
 $F(x_i)$ в середине интервала

Вычисление числа π . Последовательная программа.

```
#include <stdio.h>
int main ()
{
    int n = 100000, i;
    double pi, h, sum, x;
    h = 1.0 / (double) n;
    sum = 0.0;
    for (i = 1; i <= n; i++)
    {
        x = h * ((double)i - 0.5);
        sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
    }
    pi = h * sum;
    printf("pi is approximately %.16f", pi);
    return 0;
}
```

Автоматическое распараллеливание

Polaris, CAPO, WPP, SUIF, VAST/Parallel, OSCAR,
Intel/OpenMP, ParaWise, OPC, САПФОР

```
icc -parallel pi.c
```

```
pi.c(8): (col. 5) remark: LOOP WAS AUTO-PARALLELIZED.
```

```
pi.c(8): (col. 5) remark: LOOP WAS VECTORIZED.
```

```
pi.c(8): (col. 5) remark: LOOP WAS VECTORIZED.
```

В общем случае, автоматическое распараллеливание затруднено:

- ☐ косвенная индексация ($A[B[i]]$);
- ☐ указатели (ассоциация по памяти);
- ☐ сложный межпроцедурный анализ;
- ☐ циклы с зависимостью по данным, как правило не распараллеливаются.

Вычисление числа π с использованием MPI

```
#include "mpi.h"
#include <stdio.h>
int main (int argc, char *argv[])
{
    int n = 100000, myid, numprocs, i;
    double mypi, pi, h, sum, x;
    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &numprocs);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &myid);
    MPI_Bcast(&n, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);
    h = 1.0 / (double) n;
    sum = 0.0;
```

Вычисление числа π с использованием MPI

```
for (i = myid + 1; i <= n; i += numprocs)
{
    x = h * ((double)i - 0.5);
    sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
}
mypi = h * sum;
MPI_Reduce(&mypi, &pi, 1, MPI_DOUBLE, MPI_SUM, 0, MPI_COMM_WORLD);
if (myid == 0) printf("pi is approximately %.16f", pi);
MPI_Finalize();
return 0;
}
```

Вычисление числа π с использованием Win32 API

```
#include <stdio.h>
#include <windows.h>
#define NUM_THREADS 2
CRITICAL_SECTION hCriticalSection;
double pi = 0.0;
int n = 100000;
void main ()
{
    int i, threadArg[NUM_THREADS];
    DWORD threadID;
    HANDLE threadHandles[NUM_THREADS];
    for(i=0; i<NUM_THREADS; i++) threadArg[i] = i+1;
    InitializeCriticalSection(&hCriticalSection);
    for (i=0; i<NUM_THREADS; i++) threadHandles[i] =
        CreateThread(0,0,(LPTHREAD_START_ROUTINE) Pi,&threadArg[i], 0,
        &threadID);
    WaitForMultipleObjects(NUM_THREADS, threadHandles, TRUE,INFINITE);
    printf("pi is approximately %.16f", pi);
}
```


Вычисление числа π с использованием Win32 API

```
void Pi (void *arg)
{
    int i, start;
    double h, sum, x;
    h = 1.0 / (double) n;
    sum = 0.0;
    start = *(int *) arg;
    for (i=start; i<= n; i=i+NUM_THREADS)
    {
        x = h * ((double)i - 0.5);
        sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
    }
    EnterCriticalSection(&hCriticalSection);
    pi += h * sum;
    LeaveCriticalSection(&hCriticalSection);
}
```

Вычисление числа π с использованием OpenMP

```
#include <stdio.h>
int main ()
{
    int n = 100000, i;
    double pi, h, sum, x;
    h = 1.0 / (double) n;
    sum = 0.0;
    #pragma omp parallel for reduction(+:sum) private(x)
    for (i = 1; i <= n; i++)
    {
        x = h * ((double)i - 0.5);
        sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
    }
    pi = h * sum;
    printf("pi is approximately %.16f", pi);
    return 0;
}
```

Достоинства использования OpenMP вместо MPI для многоядерных процессоров

- ❑ Возможность инкрементального распараллеливания
- ❑ Упрощение программирования и эффективность на нерегулярных вычислениях, проводимых над общими данными
- ❑ Ликвидация дублирования данных в памяти, свойственного MPI-программам
- ❑ Объем памяти пропорционален быстродействию процессора. В последние годы увеличение производительности процессора достигается удвоением числа ядер, при этом частота каждого ядра снижается. Наблюдается тенденция к сокращению объема оперативной памяти, приходящейся на одно ядро. Присущая OpenMP экономия памяти становится очень важна.
- ❑ Наличие локальных и/или разделяемых ядрами КЭШей будут учитываться при оптимизации OpenMP-программ компиляторами, что не могут делать компиляторы с последовательных языков для MPI-процессов.

Достоинства использования OpenMP вместо MPI для многоядерных процессоров

Процессоры Intel® Xeon® серии 5000

X5272 2 cores	X5482 4 cores
3400 MHz	3200 MHz

Процессоры Intel® Xeon® серии 7000

7150N 2 cores	X7350 4 cores	X7460 6 cores
3500 MHz	2930 MHz	2660 MHz

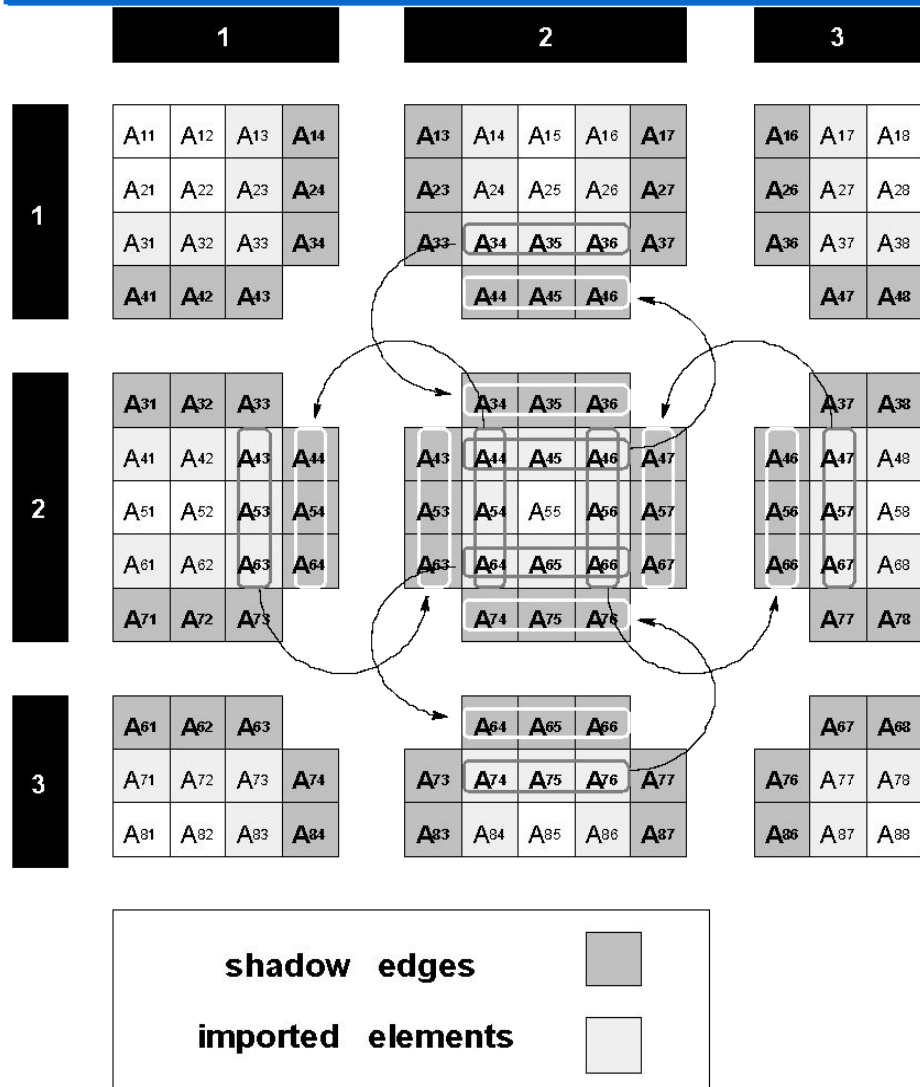
Процессоры AMD Opteron

8224 SE 2 cores	8360 SE 4 cores
3200 MHz	2500 MHz

Достоинства использования OpenMP вместо MPI для многоядерных процессоров

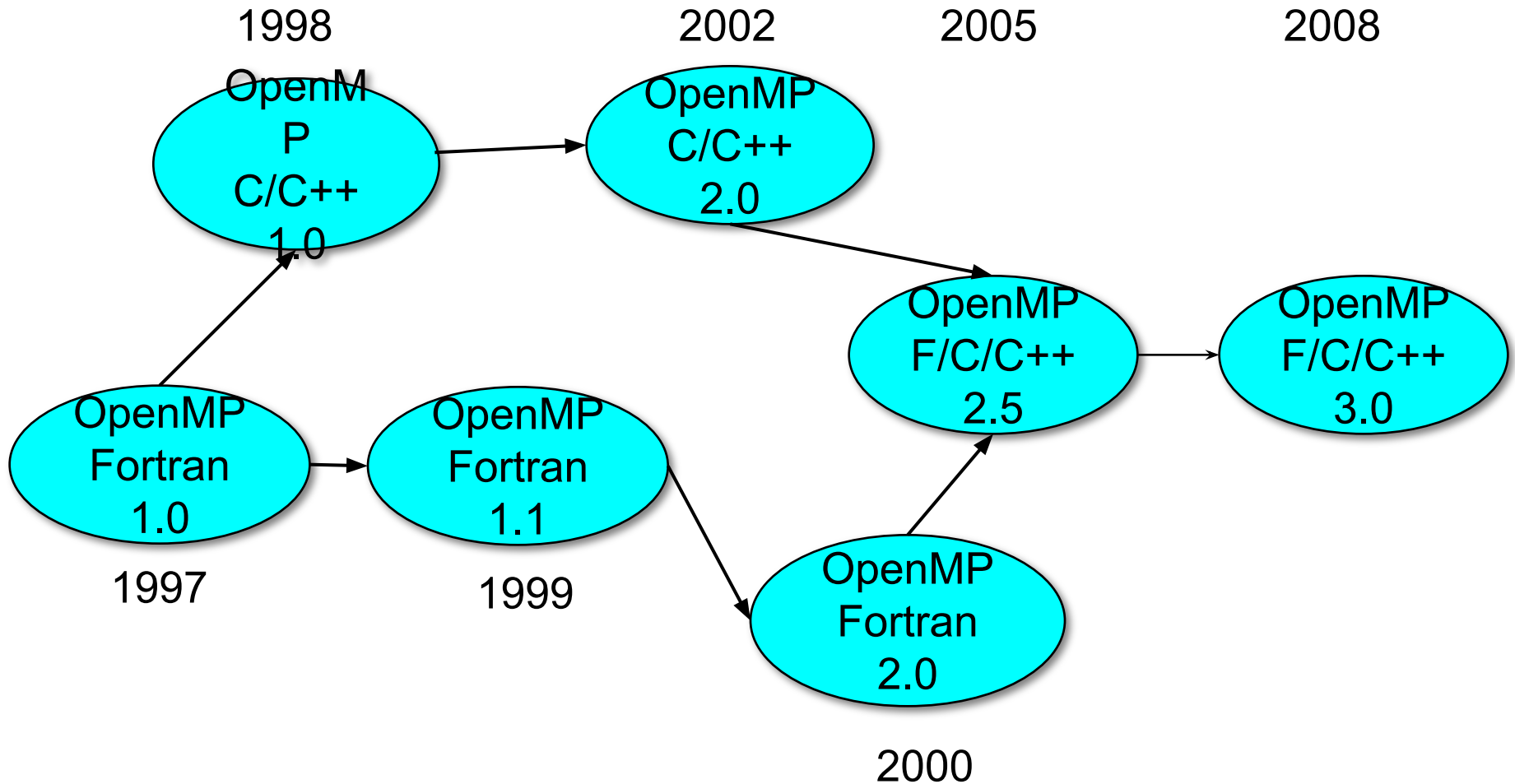
```
#define Max(a,b) ((a)>(b)?(a):(b))
#define L 8
#define ITMAX 20
int i,j,it,k;
double eps, MAXEPS = 0.5;
double A[L][L], B[L][L];
int main(int an, char **as)
{
    for (it=1; it < ITMAX; it++) {
        eps= 0.;
        for(i=1; j<=L-2; j++)
            for(j=1; j<=L-2; j++) {eps = Max(fabs(B[i][j]-A[i][j]),eps); A[i][j] = B[i][j]; }
        for(i=1; j<=L-2; j++)
            for(j=1; j<=L-2; j++) B[i][j] = (A[i-1][j]+A[i+1][j]+A[i][j-1]+A[i][j+1])/4.;
        printf( "it=%4i  eps=%f\n", it,eps);
        if (eps < MAXEPS) break;
    }
}
```

Достоинства использования OpenMP вместо MPI для многоядерных процессоров



- Для получения программы, способной работать на кластере, необходимо распределить данные и вычисления между процессорами.
- После распределения данных требуется организовать межпроцессорные взаимодействия.
- В данном случае - для доступа к удаленным данным используются “теньевые” грани, которые являются источником дублирования данных.

История OpenMP



OpenMP Architecture Review Board

- ☐ AMD
- ☐ Cray
- ☐ Fujitsu
- ☐ HP
- ☐ IBM
- ☐ Intel
- ☐ NEC
- ☐ The Portland Group, Inc.
- ☐ SGI
- ☐ Sun
- ☐ Microsoft
- ☐ ASC/LLNL
- ☐ cOMPunity
- ☐ EPCC
- ☐ NASA
- ☐ RWTH Aachen University

Компиляторы, поддерживающие OpenMP

OpenMP 3.0:

- ☐ Intel 11.0: Linux, Windows and MacOS
- ☐ Sun Studio Express 11/08: Linux and Solaris
- ☐ PGI 8.0: Linux and Windows
- ☐ IBM 10.1: Linux and AIX

Предыдущие версии OpenMP:

- ☐ GNU gcc (4.3.2)
- ☐ Absoft Pro FortranMP
- ☐ Lahey/Fujitsu Fortran 95
- ☐ PathScale
- ☐ HP
- ☐ Microsoft Visual Studio 2008 C++

Обзор основных возможностей OpenMP

`C$OMP FLUSH`

`C$OMP THREADPRIVATE (/ABC/)`

`C$OMP PARALLEL DO SHARED (A,B,C)`

`CALL OMP_INIT_LOCK (LCK)`

`C$OMP SINGLE PRIVATE (X)`

`SET`

`C$OMP PARALLEL DO ORDERED PR`

`C$OMP PARALLEL REDUCTION (-`

`#pragma omp parallel for private(a, b)`

`C$OMP PARALLEL COPYIN (/blk/)`

`nthrds = OMP_GET_NUM_PROCS ()`

OpenMP: API для написания
многонитевых приложений

- Множество директив компилятора, набор функции библиотеки системы поддержки, переменные окружения
- Облегчает создание многонитевых программ на Фортране, С и С++
- Обобщение опыта создания параллельных программ для SMP и DSM систем за последние 20 лет

`C$OMP BARRIER`

`C$OMP DO LASTPRIVATE (XX)`

`omp_set_lock (lck)`

Литература...

- ❑ <http://www.openmp.org>
- ❑ <http://www.compunity.org>
- ❑ http://www.parallel.ru/tech/tech_dev/openmp.html

Литература...

- ❑ **Гергель В.П.** Теория и практика параллельных вычислений. - М.: Интернет-Университет, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
- ❑ **Богачев К.Ю.** Основы параллельного программирования. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.
- ❑ **Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.** Параллельные вычисления. - СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
- ❑ **Немнюгин С., Стесик О.** Параллельное программирование для многопроцессорных вычислительных систем — СПб.: БХВ-Петербург, 2002.

Литература...

Учебные курсы Интернет Университета Информационных технологий

- ❑ **Гергель В.П.** Теория и практика параллельных вычислений. — <http://www.intuit.ru/department/calculate/paralltp/>
- ❑ **Левин М.П.** Параллельное программирование с OpenMP <http://www.intuit.ru/department/se/openmp/>

Дополнительные учебные курсы:

- ❑ **Богданов А.В. и др.** Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем. — <http://www.intuit.ru/department/hardware/atmcs/>
- ❑ **Барский А.Б.** Архитектура параллельных вычислительных систем. — <http://www.intuit.ru/department/hardware/paralltech/>
- ❑ **Барский А.Б.** Параллельное программирование. — <http://www.intuit.ru/department/se/parallprog/>

Вопросы?

Вопросы?

Следующая тема

- ❑ OpenMP – модель параллелизма по управлению

Контакты

□ **Бахтин В.А.**, кандидат физ.-мат. наук, заведующий сектором, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

bakhtin@keldysh.ru