Введение в OpenMP

Алексей А. Романенко
arom@ccfit.nsu.ru

Based on Sun Microsystems' presentation

О чем эта лекция?

- Обзор OpenMP
- Сборка OpenMP программы
- Среда исполнения OpenMP
- Способы параллелизации программы с помощью OpenMP
- пр.

Содержание

- Программная модель OpenMP
- История OpenMP
- Обзор OpenMP
  - Условия (Clauses)
  - конструкции
  - Синхронизация потоков
  - Переменные окружения
  - Runtime functions

История OpenMP

- В начале 90-х, производители SMP систем поставляли похожие, на основе директив расширения к Фортрану:
  - Пользователь снабжает последовательные Fortran программы директивами, указывая, какие циклы должны исполняться параллельно
  - Компилятор отвечает за автоматическое распараллеливание циклов по процессорам SMP
  - Одна функциональность, но разная реализация
- Первая попытка стандарта ANSI - проект X3H5 в 1994 году. Он не был принят, в основном благодаря ослабевающему к нему интересу, поскольку популярность набирали системы с распределенной памятью.
- История OpenMP стандарта началась весной 1997 года. когда новые SMP машины стали широко распространены.

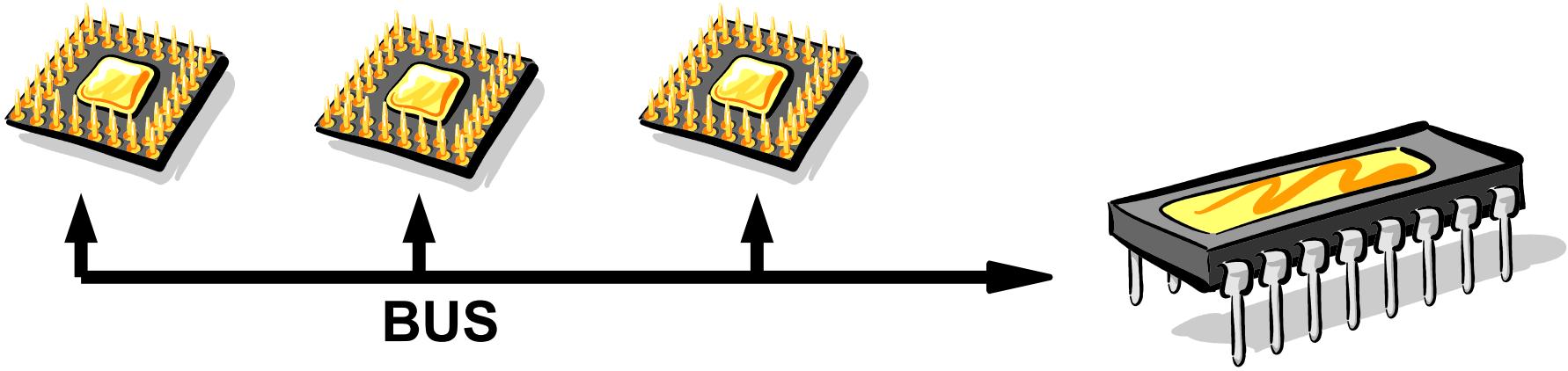
OpenMP сегодня

- Модель OpenMP мощный, но в тоже время компактный стандарт de-facto для программирования систем с общей памятью
- Текущая версия - 3.0
- Спецификация от мая 2008

Цели OpenMP

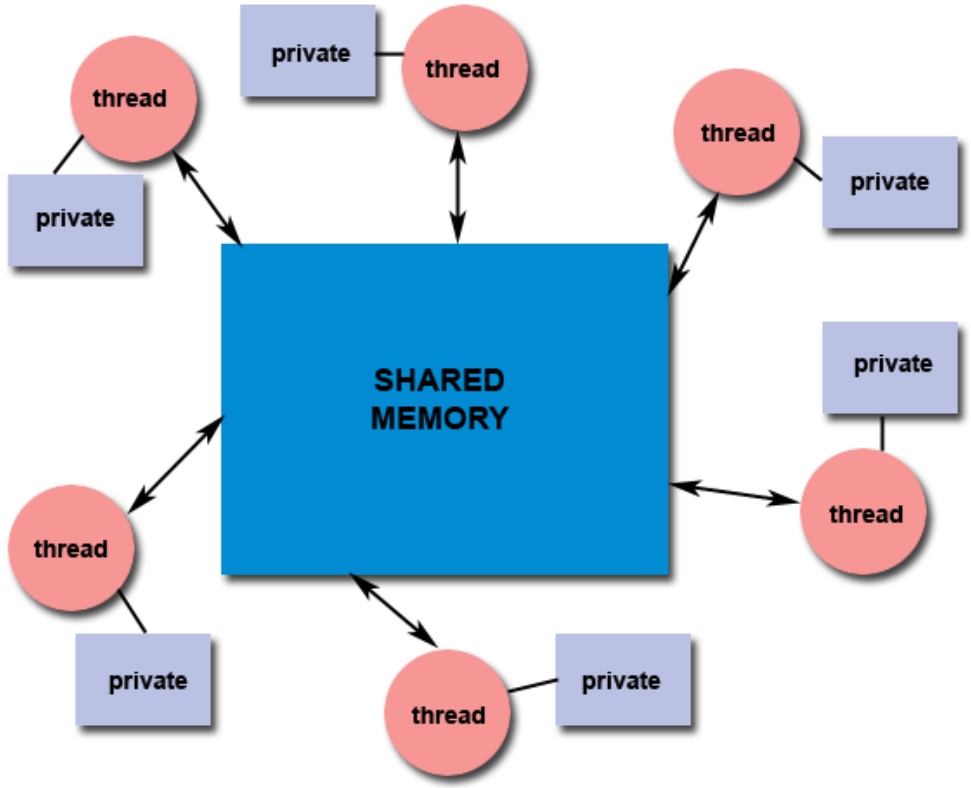
- Быть стандартом для различных архитектур и платформ с распределенной памятью
- Дать простой, но ограниченный набор директив для параллелизации программы.
- Обеспечивать совместимость и возможность инкрементальной параллелизации программы.
- Дать возможность как для мелкозернистого распараллеливания, так и для крупнозернистого.
- Поддержка Fortran (77, 90 и 95), C, и C++

SMP системы



Модель с разделяемой памятью

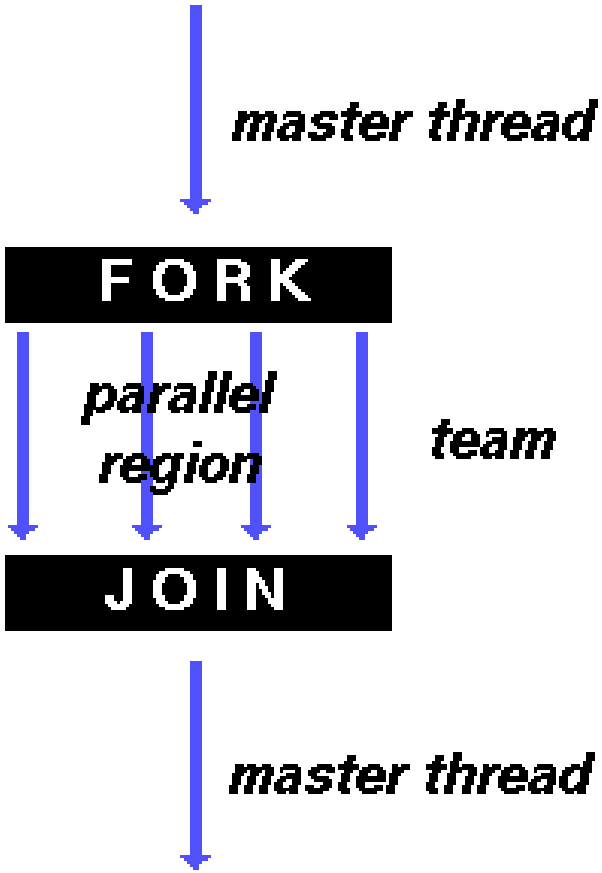
- Все потоки имеют доступ к глобальной разделяемой памяти
- Данные могут быть разделяемые и приватные
- Разделяемые данные доступны всем потокам
- Приветные — только одному
- Синхронизация требуется для доступа к общим данным



О данных

- В параллельных программах все данные имеют "метки":
  - Метка "Private" ⇨ видима только одному потоку
    - Изменения в переменной локальны и не видны другим потокам
    - Пример — локальная переменная в функции, которая исполняется параллельно
  - Метка "Shared" ⇨ видима всем потокам
    - Изменения в переменной видны всем потокам
    - Пример — глобальные данные

Модель выполнения OpenMP



Пример

Sequential code

```
void main(){
  double x[1000];
  for(i=0; i<1000; i++){
    calc_smth(&x[i]);
  }
}
```

Parallel code

```
void main(){
  double x[1000];
#pragma omp parallel for ...
  for(i=0; i<1000; i++){
    calc_smth(&x[i]);
  }
}
```

OpenMP Guided Tour

http://www.openmp.org

Когда использовать OpenMP?

- Компилятор не может выполнить параллелизацию кода, которую вы хотите:
- Цикл не параллелизуется:
  - Не возможно определить зависимость по данным между итерациями цикла
  - Не достаточная гранулярность
  - Компилятору не достаточно информации

Терминология

- OpenMP Team := Master + Workers
- Параллельный регион — блок кода, который всеми потоками исполняется одновременно
  - Поток мастер имеет ID 0
  - Все потоки синхронизируются при входе в параллельный регион
  - Параллельные регионы могут быть вложены, но поведение зависит отреализации
  - Условие "if" может быть использовано для «ограждения»; Если условие "false", код исполняется последовательно
- Работа в параллельном регионе распределяется между всеми потоками

Параллелизация цикла с помощью OpenMP

```
#pragma omp parallel shared(a,b)
{
#pragma omp for private(i)
  for(i=0; i<10000; i++)
    a[i] = a[i] + b[i];
}
```

Компоненты OpenMP

Формат директив

- C: регистр имеет значение
  - Синтаксис: #pragma omp directive [clause [clause] ...]
- Продление: использовать «\» в прагме
- Условие компиляции: _OPENMP макрос определен

Пример

```
#ifdef _OPENMP
printf("Caution: The program was compiled with "
       "OpenMP and can consume all CPU resources "
       " of your PC!\n");
#endif
...
#omp parallel for private(i,j) \
   shared(a,b,c)
{
   for(i=0; i<100; i++)
      for(j=0; j<100; j++)
         a[i] = b[i][j]*c[j];
}
```

Некоторые OpenMP условия

Об OpenMP условиях

- Большинство OpenMP директив поддерживают условия
- Служат для задания дополнительной информации директивам
- Например, **private(a)** для директивы **for**:
  - **#pragma omp for *private(a)***

Условия if/private/shared

- if (скалярное выражение)
  - Исполнить параллельно, если выражение истино
  - В противном случае - последовательно
- private (list)
  - Переменные не связаны с исходным объектом
  - Все переменные локальны
  - При входе и выходе значение переменных не определено
- shared (list)
  - Данные доступны всем потокам в группе
  - Все потоки имеют доступ к одним и тем же адресам

Пример

```
#omp parallel for private(i,j) \
    shared(a,b,c) if(M>100)
{
    for(i=0; i<M; i++)
        for(j=0; j<100; j++)
            a[i] = b[i][j]*c[j];
}
```

О хранении данных

- Значение приватных переменных не определено при входе и выходе из параллельного региона
- Значение исходной переменной (до параллельного региона) не определено после выхода из региона!
- Приватная переменная никак не связана с глобальной переменной с тем же именем
- Используйте first/last private условия для изменения такого поведения

Условие first/last private

- firstprivate (list)
  - Всем приватным переменным в списке присваивается значение исходных переменных до начала параллельного региона
- lastprivate (list)
  - Переменным присваивается значение того потока, который бы последним исполнялся последовательно.

Пример

```
#pragma omp parallel
{
#pragma omp for private(i) lastprivate(k)
  for(i=0; i<10; i++)
      k = i*i;
}
printf("k = %d\n", k); // k == 81
```

Пример

```
int myid, a;

a = 10;
#pragma omp parallel default(private) \
                     firstprivate(a)
{
   myid = omp_get_thread_num();
   printf("Thread%d: a = %d\n", myid, a);
   a = myid;
   printf("Thread%d: a = %d\n", myid, a);
}
```

```
Thread1: a = 10
Thread1: a = 1
Thread2: a = 10
Thread0: a = 10
Thread3: a = 10
Thread3: a = 3
Thread2: a = 2
Thread0: a = 0
```

Условие default

- default (none | shared)
- none
  - Все задается явно
- shared
  - Все переменные разделяемые

Условие reduction - Пример

- Пример:

```
#pragma omp parallel
   {
   #pragma for shared(x, sum) private(i)
      for(i=0; i<10000; i++)
         sum = sum + x[i];
   }
```

- Нужна осторожность при работе с переменной SUM
- При использовании условия «reduction» компилятор заботится о синхронизации доступа к SUM

Условие reduction

- reduction (operator : list)
  - Редукционные переменные должны быть разделяемыми

```
#pragma omp parallel
   {
   #pragma for shared(x) private(i) reduction(+:sum)
       for(i=0; i<10000; i++)
          sum += x[i];
   }

#pragma omp parallel
   {
   #pragma for shared(x) private(i) reduction(min:gmin)
      for(i=0; i<10000; i++)
          gmin = min(gmin, x[i]);
   }
```

Условие nowait

- Используется для минимизации операций синхронизации

```
#pragma omp for nowait
{
    ...
}
```

Параллельный регион

- Параллельный регион, в котором все потоки исполняют блок кода параллельно

```
#pragma omp parallel [clause[[,] clause] ...]
{
    "this will be executed in parallel"
} //implied barrier
```

Параллельный регион - условия

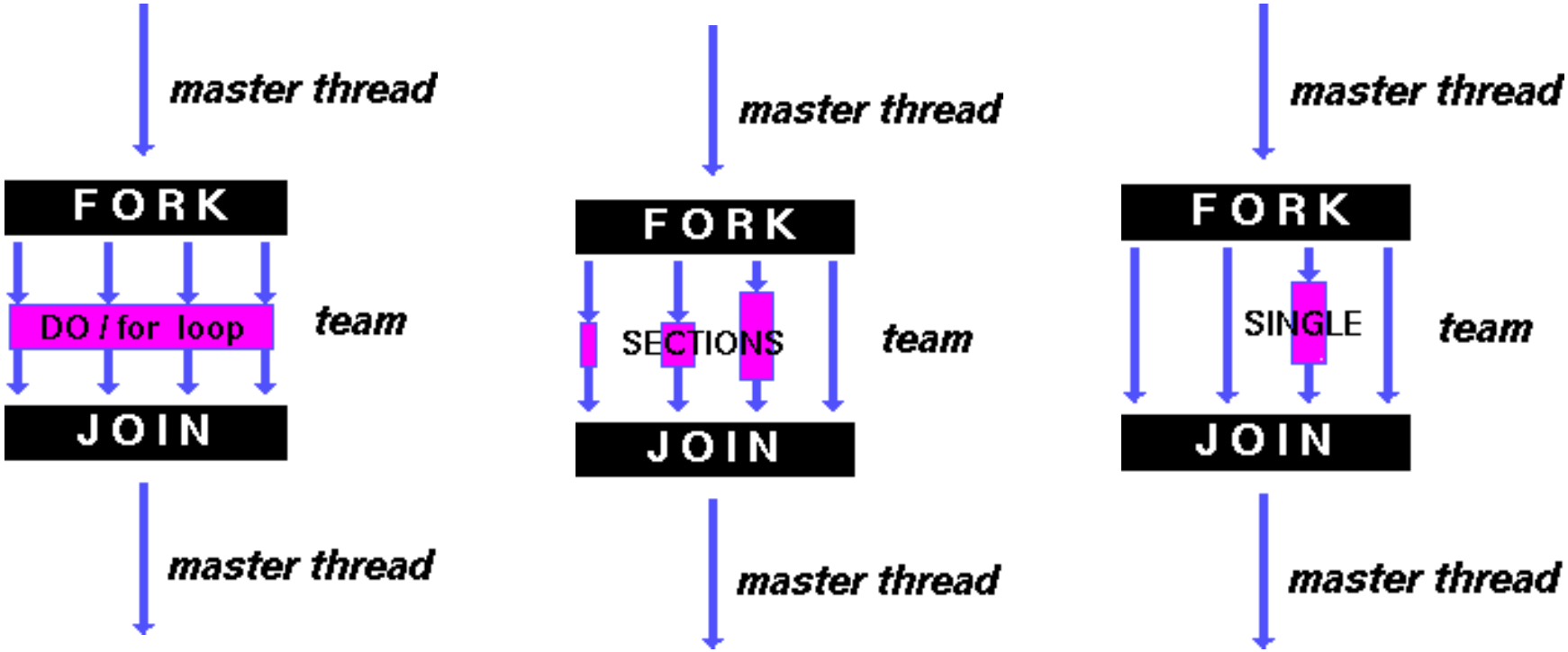
- Поддерживаются следующие условия:
  - if (scalar expression)
  - private (list)
  - shared (list)
  - default (none|shared)
  - reduction (operator: list)
  - copyin (list)
  - firstprivate (list)
  - num_threads (scalar_int_expr)

Директивы распределения работы

Конструкции распределения работы

- for, section, single
  - Работа распределяется по потокам
  - Должны быть внутри параллельного региона
  - Нет подразумеваемых барьеров на входе; подразумеваемых барьера на выходе (если NOWAIT указано)
  - Конструкция распределения работы не порождает дополнительного потока

Конструкции распределения работ



Директива omp for

- Итерации цикла распределяются по потокам

```
#pragma omp for [clause[[,] clause] ...]
        <original for-loop>
```

- Поддерживаются следующие условия:
  - private
  - firstprivate
  - lastprivate
  - reduction
  - ordered
  - schedule
  - nowait

Балансировка загрузки

- Важные аспект производительности
- Для обычных операций (например, векторное сложение) балансировка редко нужна
- Для менее регулярных операций требуется балансировка
- Примеры:
  - Транспонирование матриц
  - Умножение треугольных матриц
  - Поиск в списке

Условие schedule

- schedule (static | dynamic | guided [, chunk] | runtime)
- static [, chunk]
  - Итерации распределяются блоками размером "chunk" о потокам в циклической форме
  - При неуказании "chunk", каждый поток выполняет приблизительно N/P итераций, где длина цикла N и P потоков

Условие schedule

- dynamic [, chunk]
  - Фиксированная порция работы
  - Берется следующая свободная порция
- guided [, chunk]
  - Аналогично предыдущему, но размер порции уменьшается экспоненциально
- runtime
  - Определяется переменной окружения OMP_SCHEDULE

Директива SECTIONS

- Индивидуальный блок кода для потоков
- Поддерживаемые условия:
  - private
  - firstprivate
  - lastprivate
  - reduction
  - nowait

Синхронизация исполнения

Барьер

- Предположим мы выполняем следующий код:

```
for (i=0; i < N; i++)
    a[i] = b[i] + c[i];
for (i=0; i < N; i++)
    d[i] = a[i] + b[i];
```

- Если циклы выполнять параллельно, то может быть неправильный ответ
- Нужна синхронизация по доступу к a[i]

Barrier

- Каждый поток ждет, пока все потоки достигнут определенную точку:
  - #pragma omp barrier

Когда использовать барьеры?

- Когда изменение данных происходит асинхронно и целостность данных может быть под вопросом
- Примеры:
  - Между операциями чтения записи одного участка памяти
  - После каждого временного шага в решателе
- К сожалению барьеры могут привести к падению производительности и масштабируемости программы
- Следовательно использовать их надо с осторожностью

Критические секции

- Если sum разделяемая переменная, то цикл нельзя исполнять параллельно

```
for (i=0; i < N; i++){
        .....
      sum += a[i];
        .....
}
```

- Можно использовать критическую секцию:

```
for (i=0; i < N; i++){
        .....
  //one at a time can proceed
     sum += a[i];
  //next in line, please
        .....
}
```

Критическая секция

- Полезны для избавления от ошибок соревнования, чтения записи данных (неопределенный порядок)
- Может привести к тому, что параллельная программа станет последоовательной
- Все потоки исполняют код, но не одновременно:
  - #pragma omp critical [(name)]
    {<code-block>}
  - #pragma omp atomic
    <statement>

Конструкции SINGLE и MASTER

- Только один поток из группы исполняет код

  #pragma omp single [clause[[,] clause] ...]
  { <code-block> }

- Только основной поток (мастер) исполняет код

  #pragma omp master
  {<code-block>}

Переменные окружения OpenMP

- OMP_NUM_THREADS n
- OMP_SCHEDULE “schedule,[chunk]”
- OMP_DYNAMIC { TRUE | FALSE }
- OMP_NESTED { TRUE | FALSE }

Среда выполнения OpenMP

- OpenMP предоставляет различные функции для:
  - Управления средой выполнения
  - Управления семафорами и блокировками
    - Вложенные блокировки возможны, но не рассматриваются
- Функции имеют выше приоритет, чем переменные окружения
- Рекомендуется использовать под управлением макроса #ifdef for _OPENMP (C/C++)
- В C/C++ необходимо включать <omp.h>

Список OpenMP функций

omp_set_num_threads	Установить количество потоков
omp_get_num_threads	Вернуть количество потоков в группе
omp_get_max_threads	Максимальное количество потоков
omp_get_thread_num	ID потока
omp_get_num_procs	Максимальное количество процессоров
omp_in_parallel	В параллельном регионе?
omp_set_dynamic	*Activate dynamic thread adjustment*
omp_get_dynamic	Check for dynamic thread adjustment
omp_set_nested	*Activate nested parallelism*
omp_get_nested	Check for nested parallelism
omp_get_wtime	Вернуть время
omp_get_wtick	Number of seconds between clock ticks

Функции блокировки в OpenMP

- Блокировки — более гибкий способ для управления критическими секциями:
  - Возможно реализовать асинхронное поведение
- Используются специальные переменные:
  - C/C++: тип omp_lock_t и omp_nest_lock_t для вложенных блокировок
- Можно управлять только через API
- Без инициализации переменных, поведение функций блокировок не определено

Вложенная блокировка

- Простая блокировка: нельзя блокировать дважды
- Вложенная блокировка: один поток может многократно блокировать переменную перед разблокированием
- Список функций аналогичен:

Simple locks	**Nestable locks**
omp_init_lock	omp_init_nest_lock
omp_destroy_lock	omp_destroy_nest_lock
omp_set_lock	omp_set_nest_lock
omp_unset_lock	omp_unset_nest_lock
omp_test_lock	omp_test_nest_lock

OpenMP и компиляторы

- OpenMP v2.5
  - Visual C++ 2005 (Professional and Team System editions)
  - Intel Parallel Studio
  - Sun Studio
  - Portland Group compilers
  - GCC since version 4.2.
- OpenMP v3.0
  - GCC 4.3.1
  - Nanos compiler
  - Intel Fortran and C/C++ versions 11.0 and 11.1 Compilers, and Intel Parallel Studio.
  - IBM XL C/C++ Compiler
  - Sun Studio 12 update 1

Сборка программы

- `gcc -fopenmp -o test test.c`
- `icc -openmp -o test test.c`

Выводы

- OpenMP - компактная, но мощьная модель программирования систем с общей памятью
- OpenMP поддерживает Fortran, C\C++
- OpenMP переносимы на разные SMP системы
- OpenMP программа может исполняться и последовательно.