Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского

Факультет Вычислительной математики и кибернетики

Введение в OpenMP

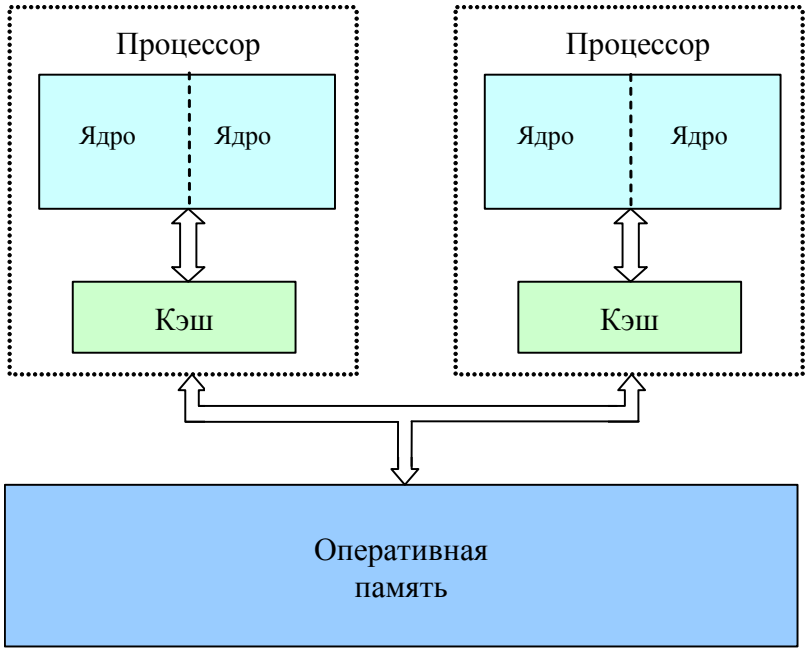
Гергель В.П., Сысоев А.В.
Кафедра математического обеспечения ЭВМ

Содержание

- Обзор технологии OpenMP
- Директивы OpenMP
  - Формат, области видимости, типы
  - Определение параллельной области
  - Управление областью видимости данных
  - Распределение вычислений между потоками
  - Операция редукции
  - Синхронизация
  - Совместимость директив и их параметров
- Библиотека функций OpenMP
- Переменные окружения
- Информационные ресурсы

Обзор технологии OpenMP

- Интерфейс OpenMP задуман как стандарт параллельного программирования для многопроцессорных систем с общей памятью (SMP, ccNUMA, …)



В общем вид системы с общей памятью описываются в виде модели параллельного компьютера с произвольным доступом к памяти (*parallel random-access machine – PRAM*)

Обзор технологии OpenMP

Динамика развития стандарта

- OpenMP Fortran API v1.0 (1997)
- OpenMP C/C++ API v1.0 (1998)
- OpenMP Fortran API v2.0 (2000)
- OpenMP C/C++ API v2.0 (2002)
- OpenMP C/C++, Fortran API v2.5 (2005)
- OpenMP C/C++, Fortran API v3.0 (2008)

- Разработкой стандарта занимается организация OpenMP Architecture Review Board, в которую вошли представители крупнейших компаний - разработчиков SMP-архитектур и программного обеспечения.

Обзор технологии OpenMP

- Основания для достижения эффекта – разделяемые потоками данные располагаются в общей памяти и для организации взаимодействия не требуется операций передачи сообщений.

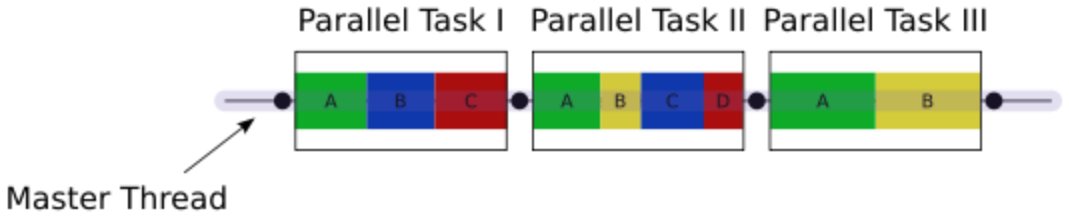
Обзор технологии OpenMP
Положительные стороны

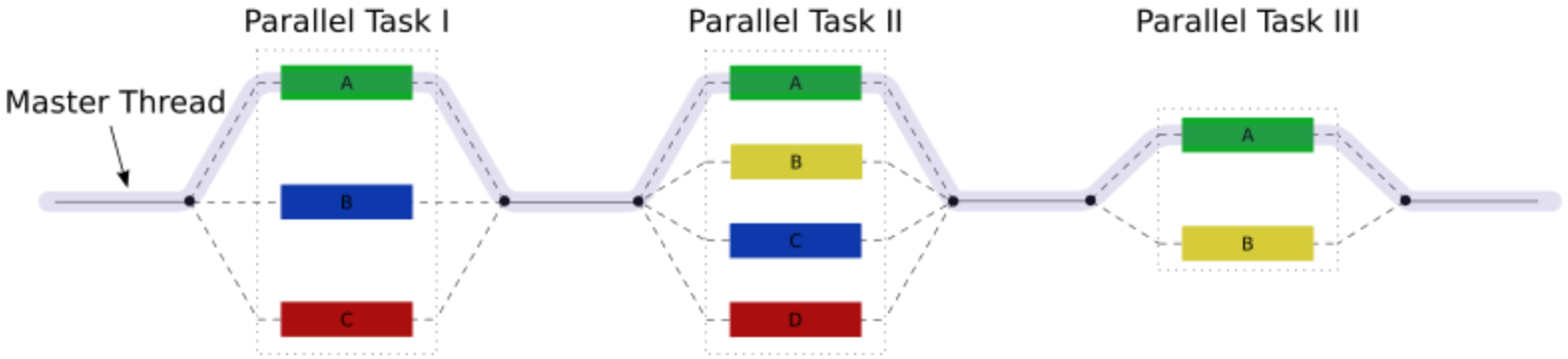
- Поэтапное (инкрементальное) распараллеливание
  - Можно распараллеливать последовательные программы поэтапно, не меняя их структуру
- Единственность разрабатываемого кода
  - Нет необходимости поддерживать последовательный и параллельный вариант программы, поскольку директивы игнорируются обычными компиляторами (в общем случае)
- Эффективность
  - Учет и использование возможностей систем с общей памятью
- Переносимость
  - поддержка большим числом компиляторов под разные платформы и ОС, стандарт для распространенных языков C/C++, Fortran

Обзор технологии OpenMP

Принципы организации параллелизма

- Использование потоков (общее адресное пространство)
- Пульсирующий (fork-join) параллелизм





* Источник: http://en.wikipedia.org/wiki/OpenMP

Обзор технологии OpenMP

Принципы организации параллелизма

- При выполнении обычного кода (вне параллельных областей) программа исполняется одним потоком (master thread)
- При появлении директивы #parallel происходит создание “команды” (team) потоков для параллельного выполнения вычислений
- После выхода из области действия директивы #parallel происходит синхронизация, все потоки, кроме master, уничтожаются
- Продолжается последовательное выполнение кода (до очередного появления директивы #parallel)

Обзор технологии OpenMP
Компиляторы

- Список на http://openmp.org/wp/openmp-compilers/

- Версию 3.0 поддерживают:
  - gcc с версии 4.4
  - IBM XL C/C++ V10.1, IBM XL Fortran V12.1
  - Sun Studio Express 7.08 Compilers
- Версию 2.5 поддерживают:
  - Intel C/C++, Visual Fortran Compilers 10.1
  - PathScale Compiler Suite
- Версию 2.0 поддерживают:
  - MS VS 2005, 2008

Обзор технологии OpenMP
Структура

- Набор директив компилятора
- Библиотека функций
- Набор переменных окружения

- Изложение материала будет проводиться на примере C/C++

Директивы OpenMP
Формат записи директив

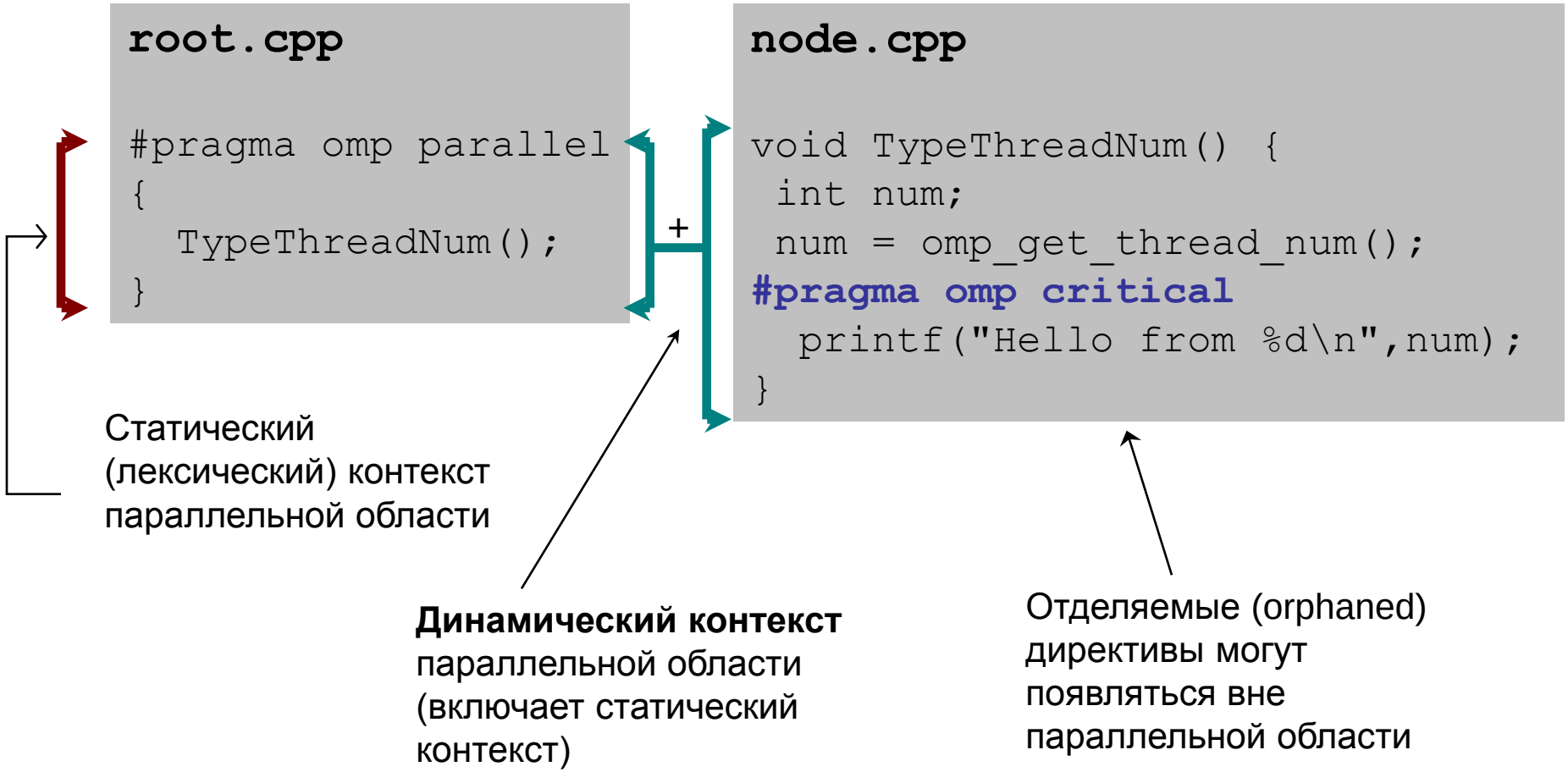
- Формат

```
#pragma omp имя_директивы [clause,…]
```

- Пример

```
#pragma omp parallel default(shared) private(beta,pi)
```

Директивы OpenMP
Формат записи директив



Директивы OpenMP
Типы директив

- Определение параллельной области
- Разделение работы
- Синхронизация

Директивы OpenMP
Определение параллельной области

- Директива parallel (основная директива OpenMP)
- Когда основной поток выполнения достигает директиву parallel, создается набор (team) потоков; входной поток является основным потоком этого набора (master thread) и имеет номер 0
- Код области дублируется или разделяется между потоками для параллельного выполнения
- В конце области обеспечивается синхронизация потоков – выполняется ожидание завершения вычислений всех потоков; далее все потоки завершаются – дальнейшие вычисления продолжает выполнять только основной поток

Директивы OpenMP
Определение параллельной области

- Формат директивы parallel

```
#pragma omp parallel [clause ...] newline
structured_block
```

- Возможные параметры (clause)

```
if (scalar_expression)
private (list)
firstprivate (list)
default (shared | none)
shared (list)
copyin (list)
reduction (operator: list)
num_threads(integer-expression)
```

Директивы OpenMP
Определение параллельной области

- Количество потоков (по убыванию старшинства)
  - num_threads(N)
  - omp_set_num_threads()
  - OMP_NUM_THREADS
  - Число, равное количеству процессоров, которое “видит” операционная система
- Параметр (clause) if – если условие в if не выполняется, то процессы не создаются

Директивы OpenMP
Определение параллельной области

- Пример использования директивы parallel

```
#include <omp.h>
main () {
  int nthreads, tid;
  // Создание параллельной области
  #pragma omp parallel private(tid)
  {
    // печать номера потока
    tid = omp_get_thread_num();
    printf("Hello World from thread = %d\n", tid);
    // Печать количества потоков - только master
    if (tid == 0) {
      nthreads = omp_get_num_threads();
      printf("Number of threads = %d\n", nthreads);
    }
  } // Завершение параллельной области
}
```

Директивы OpenMP
Управление областью видимости данных

- Управление областью видимости обеспечивается при помощи параметров (clause) директив

  private, firstprivate, lastprivate, shared, default,

  reduction, copyin

- которые определяют, какие соотношения существуют между переменными последовательных и параллельных фрагментов выполняемой программы

Директивы OpenMP
Управление областью видимости данных

- Параметр shared определяет список переменных, которые будут общими для всех потоков параллельной области; правильность использования таких переменных должна обеспечиваться программистом

```
#pragma omp parallel shared(list)
```

- Параметр private определяет список переменных, которые будут локальными для каждого потока; переменные создаются в момент формирования потоков параллельной области; начальное значение переменных является неопределенным

```
#pragma omp parallel private(list)
```

Директивы OpenMP
Определение параллельной области

- Пример использования директивы parallel

```
#include <omp.h>
main () {
  int nthreads, tid;
  // Создание параллельной области
  #pragma omp parallel private(tid)
  {
    // печать номера потока
    tid = omp_get_thread_num();
    printf("Hello World from thread = %d\n", tid);
    // Печать количества потоков - только master
    if (tid == 0) {
      nthreads = omp_get_num_threads();
      printf("Number of threads = %d\n", nthreads);
    }
  } // Завершение параллельной области
}
```

Директивы OpenMP
Управление областью видимости данных

- Параметр firstprivate позволяет создать локальные переменные потоков, которые перед использованием инициализируются значениями исходных переменных

```
#pragma omp parallel firstprivate(list)
```

- Параметр lastprivate позволяет создать локальные переменные потоков, значения которых запоминаются в исходных переменных после завершения параллельной области (используются значения потока, выполнившего последнюю итерацию цикла или последнюю секцию)

```
#pragma omp parallel lastprivate(list)
```

Директивы OpenMP
Распределение вычислений между потоками

- Существует 3 директивы для распределения вычислений в параллельной области
  - DO / for – распараллеливание циклов
  - sections – распараллеливание раздельных фрагментов кода (функциональное распараллеливание)
  - single – директива для указания последовательного выполнения кода
- Начало выполнения директив по умолчанию не синхронизируется
- Завершение директив по умолчанию является синхронным

Директивы OpenMP
Распределение вычислений между потоками

- Формат директивы for

```
#pragma omp for [clause ...] newline
for loop
```

- Возможные параметры (clause)

```
private(list)
firstprivate(list)
lastprivate(list)
reduction(operator: list)
ordered
schedule(kind[, chunk_size])
nowait
```

Директивы OpenMP
Распределение вычислений между потоками

- Распределение итераций в директиве for регулируется параметром (clause) schedule
  - static – итерации делятся на блоки по chunk итераций и статически разделяются между потоками; если параметр chunk не определен, итерации делятся между потоками равномерно и непрерывно
  - dynamic – распределение итерационных блоков осуществляется динамически (по умолчанию chunk=1)
  - guided – размер итерационного блока уменьшается экспоненциально при каждом распределении; chunk определяет минимальный размер блока (по умолчанию chunk=1)
  - runtime – правило распределения определяется переменной OMP_SCHEDULE (при использовании runtime параметр chunk задаваться не должен)

Директивы OpenMP
Распределение вычислений между потоками

- Пример использования директивы for

```
#include <omp.h>
#define CHUNK 100
#define NMAX 1000
main () {
  int i, n, chunk;
  float a[NMAX], b[NMAX], c[NMAX];
  for (i=0; i < NMAX; i++)
    a[i] = b[i] = i * 1.0;
  n = NMAX; chunk = CHUNK;
  #pragma omp parallel shared(a,b,c,n,chunk) private(i)
  {
    #pragma omp for schedule(dynamic,chunk) nowait
    for (i=0; i < n; i++)
      c[i] = a[i] + b[i];
  } // end of parallel section
}
```

Директивы OpenMP
Распределение вычислений между потоками

- Формат директивы sections

```
#pragma omp sections [clause ...] newline
{
  #pragma omp section newline
    structured_block
  #pragma omp section newline
    structured_block
}
```

- Возможные параметры (clause)

```
private(list)
firstprivate(list)
lastprivate(list)
reduction(operator: list)
nowait
```

Директивы OpenMP
Распределение вычислений между потоками

- Директива sections – распределение вычислений для раздельных фрагментов кода
  - фрагменты выделяются при помощи директивы section
  - каждый фрагмент выполняется однократно
  - разные фрагменты выполняются разными потоками
  - завершение директивы по умолчанию синхронизируется
  - директивы section должны использоваться только в статическом контексте

Директивы OpenMP
Распределение вычислений между потоками

- Пример использования директивы sections

```
#include <omp.h>
#define NMAX 1000
main () {
  int i, n;
  float a[NMAX], b[NMAX], c[NMAX];
  for (i=0; i < NMAX; i++)
    a[i] = b[i] = i * 1.0;
  n = NMAX;
  #pragma omp parallel shared(a,b,c,n) private(i)
  {
    #pragma omp sections nowait
    {
      #pragma omp section
        for (i=0; i < n/2; i++)
          c[i] = a[i] + b[i];
      #pragma omp section
        for (i=n/2; i < n; i++)
          c[i] = a[i] + b[i];
    } // end of sections
  } // end of parallel section
}
```

Директивы OpenMP
Распределение вычислений между потоками

- Объединение директив parallel и for/sections

```
#include <omp.h>
#define CHUNK 100
#define NMAX 1000
main () {
  int i, n, chunk;
  float a[NMAX], b[NMAX], c[NMAX];
  for (i=0; i < NMAX; i++)
    a[i] = b[i] = i * 1.0;
  n = NMAX;
  chunk = CHUNK;
  #pragma omp parallel for shared(a,b,c,n) \
    schedule(static,chunk)
    for (i=0; i < n; i++)
      c[i] = a[i] + b[i];
}
```

Директивы OpenMP
Операция редукции

- Параметр reduction определяет список переменных, для которых выполняется операция редукции
  - перед выполнением параллельной области для каждого потока создаются копии этих переменных,
  - потоки формируют значения в своих локальных переменных
  - при завершении параллельной области на всеми локальными значениями выполняются необходимые операции редукции, результаты которых запоминаются в исходных (глобальных) переменных

reduction (operator: list)

Директивы OpenMP
Операция редукции

- Пример использования параметра reduction

```
#include <omp.h>
main () { // vector dot product
  int i, n, chunk;
  float a[100], b[100], result;
  n = 100; chunk = 10;
  result = 0.0;
  for (i=0; i < n; i++) {
    a[i] = i * 1.0; b[i] = i * 2.0;
  }
  #pragma omp parallel for default(shared) \
    schedule(static,chunk) reduction(+:result)
  for (i=0; i < n; i++)
    result = result + (a[i] * b[i]);
  printf("Final result= %f\n",result);
}
```

Директивы OpenMP
Операция редукции

- Правила записи параметра reduction
  - Возможный формат записи выражения

    x = x op expr

    x = expr op x

    x binop = expr

    x++, ++x, x--, --x
  - x должна быть скалярной переменной
  - expr не должно ссылаться на x
  - op (operator) должна быть неперегруженной операцией вида

    +, -, *, /, &, ^, |, &&, ||
  - binop должна быть неперегруженной операцией вида

    +, -, *, /, &, ^, |

Директивы OpenMP
Синхронизация

- Директива master определяет фрагмент кода, который должен быть выполнен только основным потоком; все остальные потоки пропускают данный фрагмент кода (завершение директивы по умолчанию не синхронизируется)

```
#pragma omp master newline
  structured_block
```

- Директива single определяет фрагмент кода, который должен быть выполнен только одним потоком (любым)

```
#pragma omp single [clause ...] newline
  structured_block
```

Директивы OpenMP
Синхронизация

- Формат директивы single

```
#pragma omp single [clause ...] newline
  structured_block
```

- Возможные параметры (clause)

```
private(list)
firstprivate(list)
copyprivate(list)
nowait
```

- Один поток исполняет блок в single, остальные потоки приостанавливаются до завершения выполнения блока

Директивы OpenMP
Синхронизация

- Директива critical определяет фрагмент кода, который должен выполняться только одним потоком в каждый текущий момент времени (критическая секция)

```
#pragma omp critical [name] newline
  structured_block
```

Директивы OpenMP
Синхронизация

- Пример использования директивы critical

```
#include <omp.h>
main() {
  int x;
  x = 0;
  #pragma omp parallel shared(x)
  {
    #pragma omp critical
      x = x + 1;
  } // end of parallel section
}
```

Директивы OpenMP
Синхронизация

- Директива barrier – определяет точку синхронизации, которую должны достигнуть все процессы для продолжения вычислений (директива должны быть вложена в блок)

```
#pragma omp barrier newline
```

Директивы OpenMP
Синхронизация

- Директива atomic – определяет переменную, доступ к которой (чтение/запись) должна быть выполнена как неделимая операция

```
#pragma omp atomic newline
  statement_expression
```

- Возможный формат записи выражения

  x binop = expr , x++, ++x, x--, --x

  x должна быть скалярной переменной

  expr не должно ссылаться на x

  binop должна быть неперегруженной операцией вида

  +, -, *, /, &, ^, |, >>, <<

Директивы OpenMP
Синхронизация

- Директива flush – определяет точку синхронизации, в которой системой должно быть обеспечено единое для всех процессов состояние памяти (т.е. если потоком какое-либо значение извлекалось из памяти для модификации, измененное значение обязательно должно быть записано в общую память)

```
#pragma omp flush (list) newline
```

- Если указан список list, то восстанавливаются только указанные переменные
- Директива flush неявным образом присутствует в директивах barrier, critical, ordered, parallel, for, sections, single

Директивы OpenMP

Совместимость директив и их параметров

Clause	Directive					
	PARALLEL	DO/for	SECTIONS	SINGLE	PARALLEL DO/for	PARALLEL SECTIONS
IF	●				●	●
PRIVATE	●	●	●	●	●	●
SHARED	●	●			●	●
DEFAULT	●				●	●
FIRSTPRIVATE	●	●	●	●	●	●
LASTPRIVATE		●	●		●	●
REDUCTION	●	●	●		●	●
COPYIN	●				●	●
SCHEDULE		●			●	
ORDERED		●			●	
NOWAIT		●	●	●		

Библиотека функций OpenMP

```
void omp_set_num_threads(int num_threads)
```

- Позволяет назначить максимальное число потоков для использования в следующей параллельной области (если это число разрешено менять динамически). Вызывается из последовательной области программы

```
int omp_get_max_threads(void)
```

- Возвращает максимальное число потоков

```
int omp_get_num_threads(void)
```

- Возвращает фактическое число потоков в параллельной области программы

Библиотека функций OpenMP

```
int omp_get_thread_num(void)
```

- Возвращает номер потока

```
int omp_get_num_procs(void)
```

- Возвращает число процессоров, доступных приложению

```
int omp_in_parallel(void)
```

- Возвращает true, если вызвана из параллельной области программы

Библиотека функций OpenMP
Функции синхронизации

- В качестве замков используются общие переменные типа omp_lock_t. Данные переменные должны использоваться только как параметры примитивов синхронизации.

```
void omp_init_lock(omp_lock_t *lock)
```

- Инициализирует замок, связанный с переменной lock

```
void omp_destroy_lock(omp_lock_t *lock)
```

- Удаляет замок, связанный с переменной lock

Библиотека функций OpenMP
Функции синхронизации

```
void omp_set_lock(omp_lock_t *lock)
```

- Заставляет вызвавший поток дождаться освобождения замка, а затем захватывает его

```
void omp_unset_lock(omp_lock_t *lock)
```

- Освобождает замок, если он был захвачен потоком ранее

```
int omp_test_lock(omp_lock_t *lock)
```

- Пробует захватить указанный замок. Если это невозможно, возвращает false

Переменные окружения

- OMP_SCHEDULE – определяет способ распределения итераций в цикле, если в директиве for использована клауза schedule(runtime)
- OMP_NUM_THREADS – определяет число нитей для исполнения параллельных областей приложения
- OMP_DYNAMIC – разрешает или запрещает динамическое изменение числа нитей
- OMP_NESTED – разрешает или запрещает вложенный параллелизм
- Компилятор с поддержкой OpenMP определяет макрос “_OPENMP”, который может использоваться для условной компиляции отдельных блоков, характерных для параллельной версии программы

Информационные ресурсы

- www.openmp.org
- Что такое OpenMP – http://parallel.ru/tech/tech_dev/openmp.html
- Introduction to OpenMP - www.llnl.gov/computing/tutorials/workshops/workshop/openMP/MAIN.html
- Chandra, R., Menon, R., Dagum, L., Kohr, D., Maydan, D., McDonald, J. Parallel Programming in OpenMP. – Morgan Kaufmann Publishers, 2000
- Quinn, M. J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. – New York, NY: McGraw-Hill, 2004.

Вопросы

- ???