Средства и системы параллельного программирования

сентябрь – декабрь 2016 г.

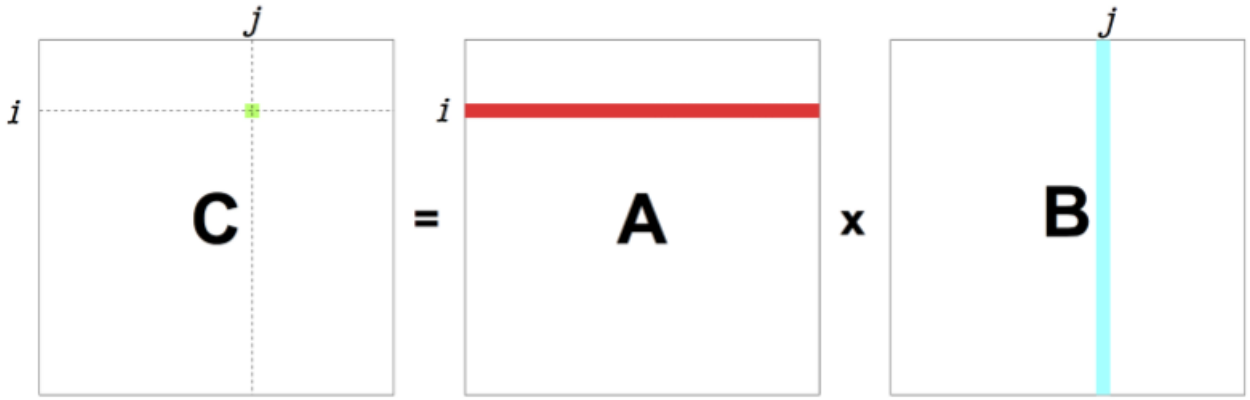
Лектор доцент Н.Н.Попова

Лекция 2
19 сентября 2016 г.

Тема

- Исследование производительности матричного умножения
- PAPI

Матричное умножение C=AxB

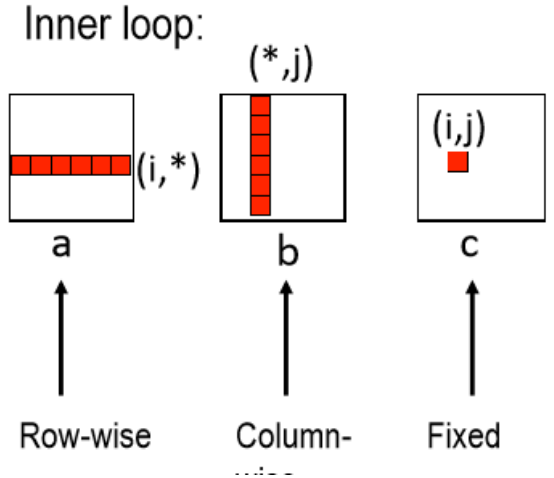


- A, B и C – квадратные матрицы размера n×n
- n достаточно большое, т.е. n > L

Матричное умножение

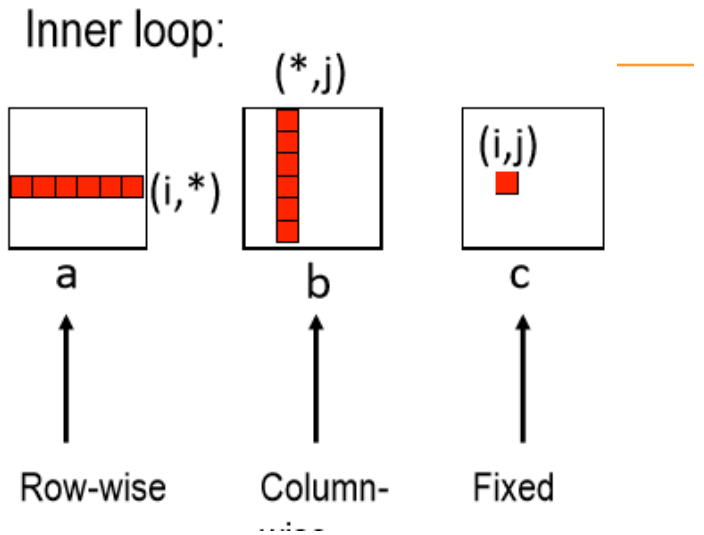
- Матричное умножение – классический пример алгоритма с плохой производительностью кэша
  - время выполнения - O(N3)
  - c[i][j] вычисляется как скалярное произведение строки i на столбец j
- предположим, что строка кэша равна 32 Bytes и размер матрицы достаточно большой (N > 1000)
  - в строке кэша могут размещаться 4 вещественных числа двойной точности

```
for (int i=0; i<N; i++)  {
   for (int j=0; j<N; j++) {
      double sum = 0.0;
      for (int k=0; k<N; k++)
           sum += a[i][k] * b[k][j];
      c[i][j] = sum;
  }
}
```



Матричное умножение

```
for (int i=0; i<N; i++)  {
   for (int j=0; j<N; j++) {
      double sum = 0.0;
      for (int k=0; k<N; k++)
           sum += a[i][k] * b[k][j];
      c[i][j] = sum;
  }
}
```



Исследуем доступ к памяти во вложенном цикле.

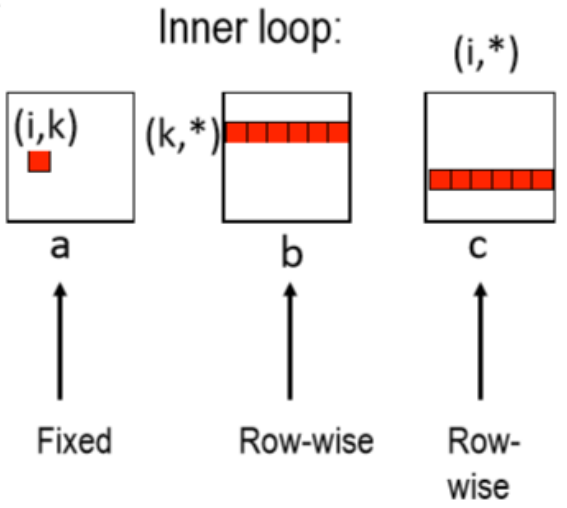
- Элементы матрицы a доступны с шагом 1
  - при чтении очередного элемента в строку кэша аписываются 4 элемента., т.е. каждый 4-ый доступ к элементу будет происходить промах кэша (тип промаха – compulsory)
- Доступ к элементам матрицы b происходит с шагом N
  - при каждом чтении элемента матрицы b происходит проиах кэша
- Значение sum будет находиться на регистре

Промахи кэша

a	b	c
0,25	1,0	0,0

Альтернативная реализация: (i,k,j)

- Что меняется, если меняем порядок вложенных циклов
  - умножаем a[i][k] на все элементы строки k матрицы b и получаем частичную сумму строки i матрицы c
  - доступ к элементам матриц b и c строчный
  - переменная r будет находиться на регистре



Промахи кэша:

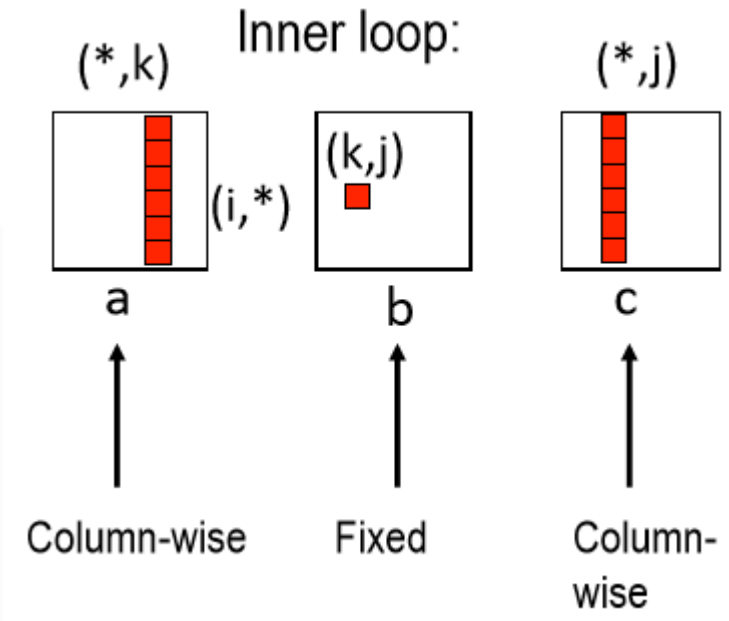
a	b	c
0,0	0,25	0,25

```
for (int i=0; i<N; i++)  {
   for (int k=0; k<N; k++) {
      double r = a[i][k];
      for (int j=0; j<N; j++)
           c[i][j] += r * b[k][j];
  }
}
```

Альтернативная реализация : (j,k,i)

```
for (int j=0; j<N; j++)  {
    for (int k=0; k<N; k++) {
        double r = b[k][j];
        for (int i=0; i<N; i++)
            c[i][j] += a[i][k] * r;
   }
}
```

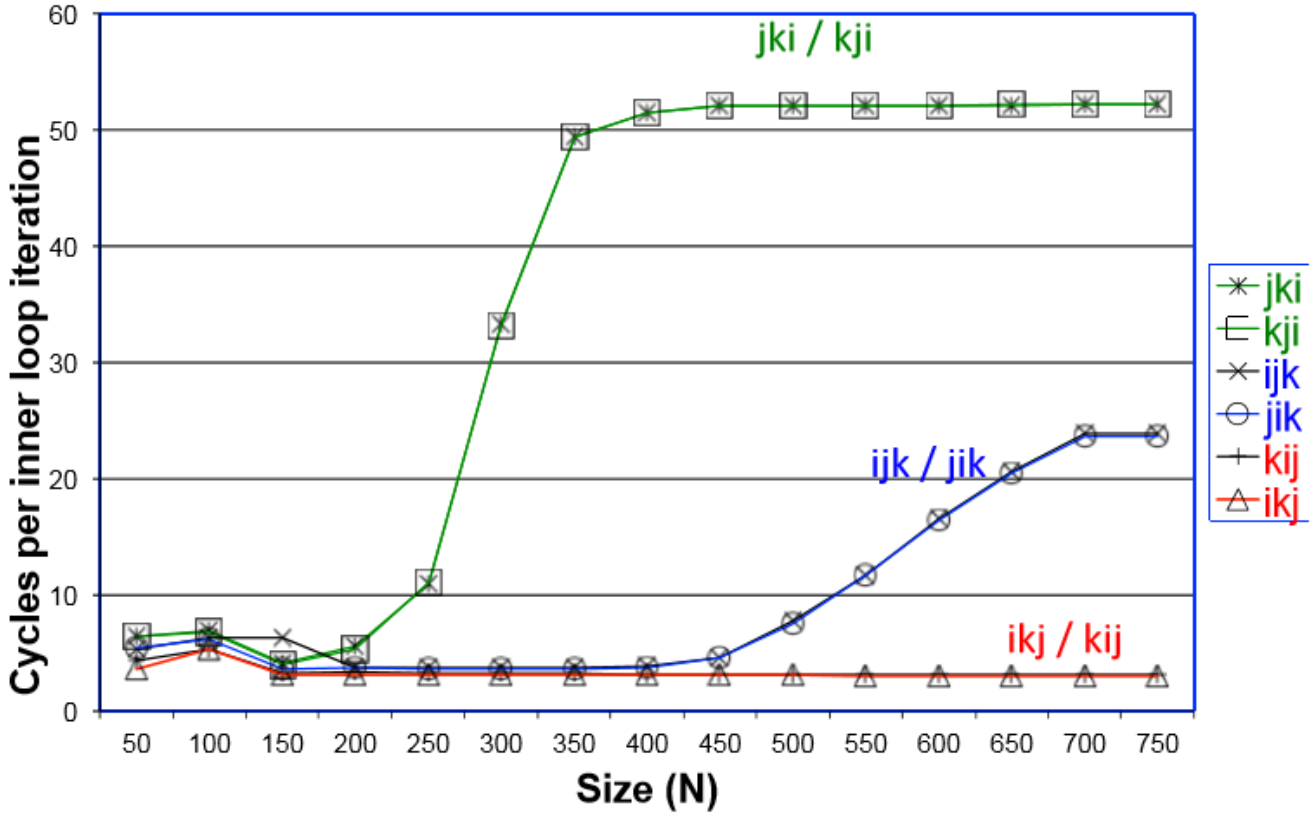
a	b	c
1,0	0,0	1,0



Выводы

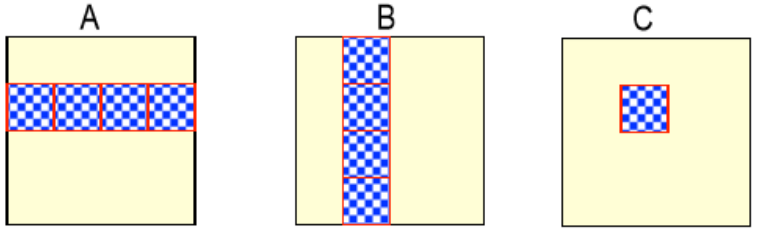
- Можно определить 6 вариантов перестановок 3-ех вложенных циклов перестановок индексов трех вложенных циклов при реализации алгоритма матричного умножения
  - варианты, при которых меняется порядок двух внешних циклов, имеют идентичное поведение промахов кэша
- ijk (и jik)
  - 2 loads, 0 stores
  - 1,25 cache misses/iteration
- ikj (и kij)
  - 2 loads, 1 store
  - 0,5 cache misses/iteration
- jki (и kji)
  - 2 loads, 1 store
  - 2,0 cache misses/iteration

Производительность матричного умножения на процессоре Core i7



Блочное матричное умножение

- Оптимизация для данных, которые не укладываются в кэше
- Разделение данных на меньшие блоки размера b*b, которые размещаются в кэше
  - выполнение вычислений над блоками, находящимися в кэше
- Пример: матричное умножение C = A*B
  - матрицы представляются в виде NxN матриц
  - вычисления над блоком выполняются без дополнительного обращения к памяти
- Размер блока выбирается таким образом, чтобы все данные, необходимые для вычисления одного блока, располагались в кэше
  - доступ к элеметам B по-прежнему остается по столбцам, но блок при этом полностью располагается в кэше.



Блочное матричное умножение

```
for (int i = 0; i < N; i+=b)  // b is the blocksize
    for (int j = 0; j < N; j+=b)
        for (int k = 0; k < N; k+=b)
            /* B x B mini matrix multiplications */
            for (i1 = i; i1 < i+b; i++)
                for (j1 = j; j1 < j+b; j++)
                    for (k1 = k; k1 < k+b; k++)
                        c[i1][j1] += a[i1][k1]*b[k1][j1];
```

Алгоритм с представлением матриц одним массивом

- Элементы матрицы располагаются одним массивом
- Формат представления – строчный
- m×n - m число строк, n – столбцов
- A(i,j) элемент: i-ая строка, j-ый столбец,
  индекс в одномерном массиве - (i ×n + j)

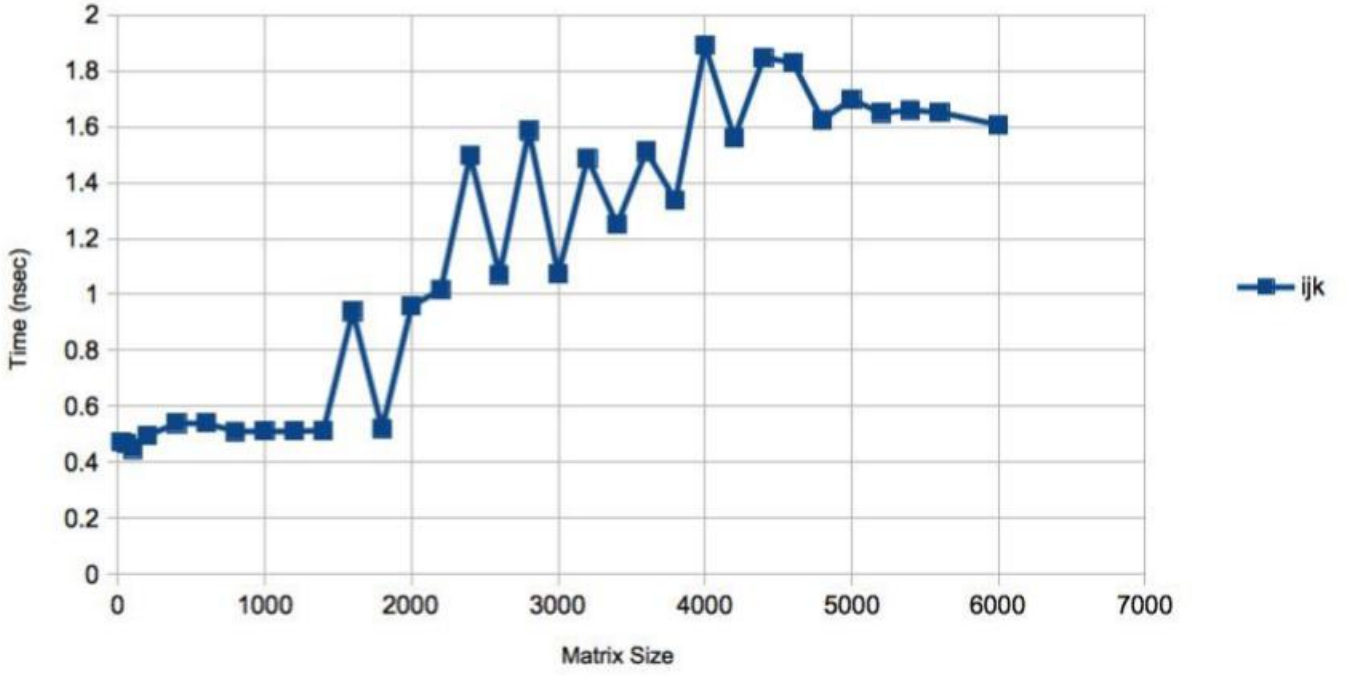
Умножение для представления матриц одномерным массивом

```
void square_dgemm (int n, double* A, double* B, double* C)
{
      for (int i = 0; i < n; ++i)  {
          const int iOffset = i*n;
          for (int j = 0; j < n; ++j) {
                double cij = 0.0;
               for( int k = 0; k < n; k++ )
                   cij += A[iOffset+k] * B[k*n+j];
            c[iOffset+j] += cij;
           }
     }
}
```

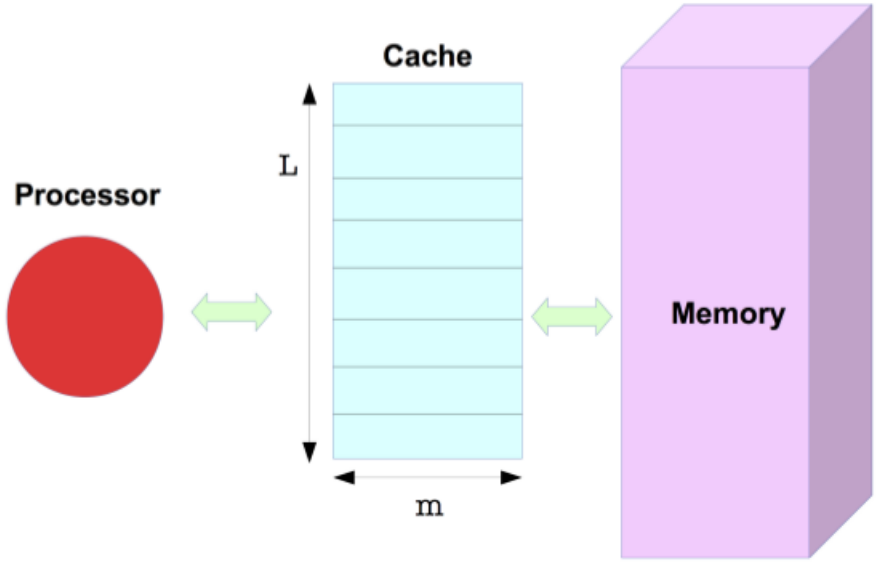
n

Общее число умножений: n^3

Время умножения: ijk

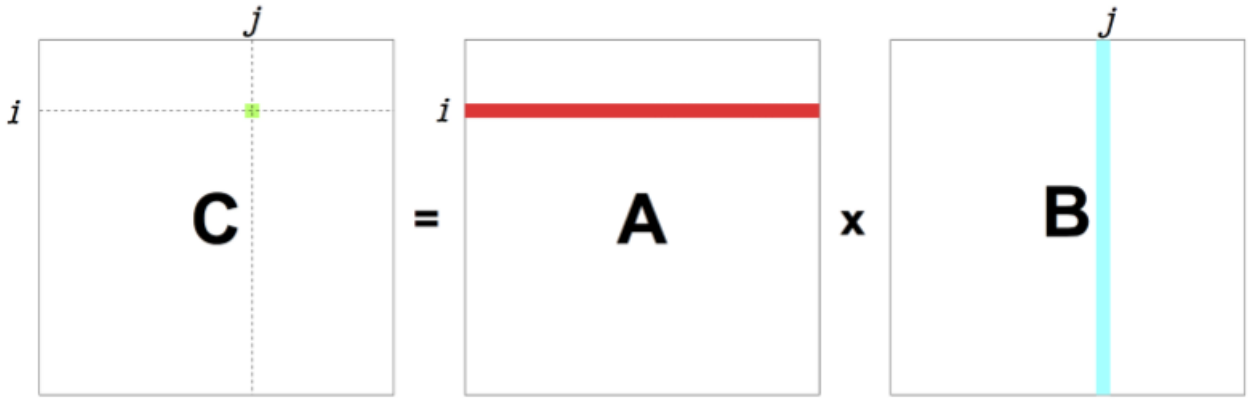


Пример: организация кэша



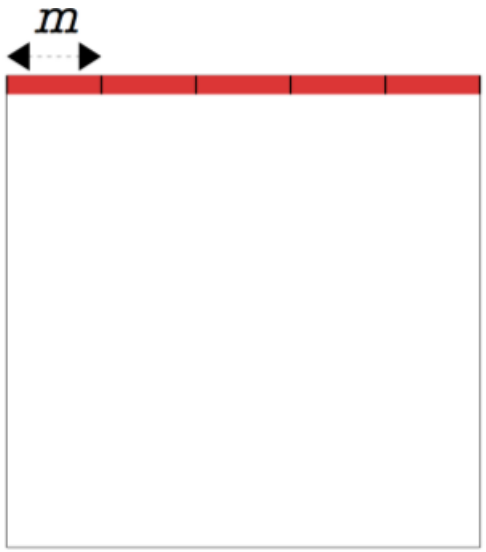
- L строк объемом m вещественных чисел с плав. точкой
- Предположим, что кэш «высокий» : L > m
- Алгоритм : Least Recently Used
- Нет аппаратной реализации предваритеьной загрузки (prefetching)

Матричное умножение C=AxB



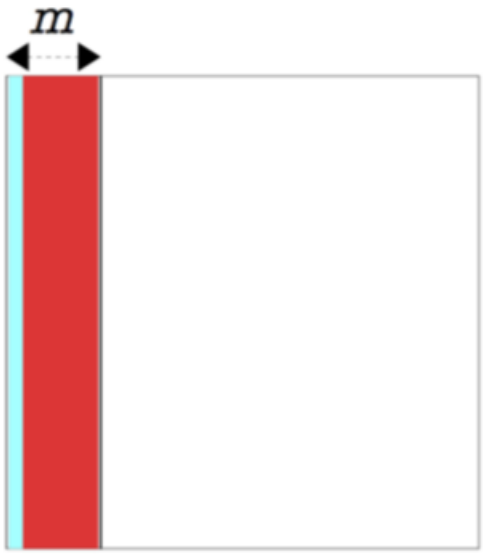
- A, B и C – квадратные матрицы размера n×n
- n достаточно большое, т.е., n > L

Доступ к элементам строки в L1



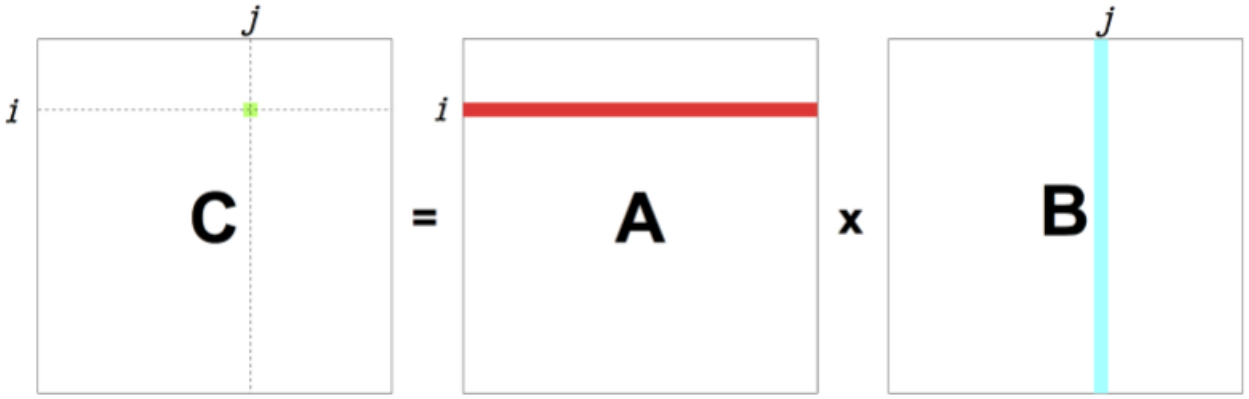
•Последовательный доступ : доступ к элементам строки требует $\frac{n}{m}$ промахов кэша

Доступ к элементам столбца в L1



- Доступ с шагом (Strided) : доступ к столбцу требует n промахов кэша

Оценка числа промахов кэша: ijk



- Для вычисления каждого C[i][j] число промахов кэша: $1 + \frac{n}{m} + n$
- Если n < m L , общее число промахов кэша - $\frac{2n^2}{m} + n^3$
- Если n>m L, общее число промахов кэша - $\frac{n^2}{m} + \frac{n^3}{m} + n^3$

Оценка числа промахов кэша при n < mL

- Размер строки кэша 64 bytes означает m = 8
- 256 KB L2 кэш означает mL = 32768
- В реальных приложениях n < 10 – 15 k
- Таким образом , если n < mL, общее число промахов кэш: :

$$2n^2m + n^3 = O(n^3)$$

- Можно улучшить?

Альтернативный доступ к элементам массивов: ikj

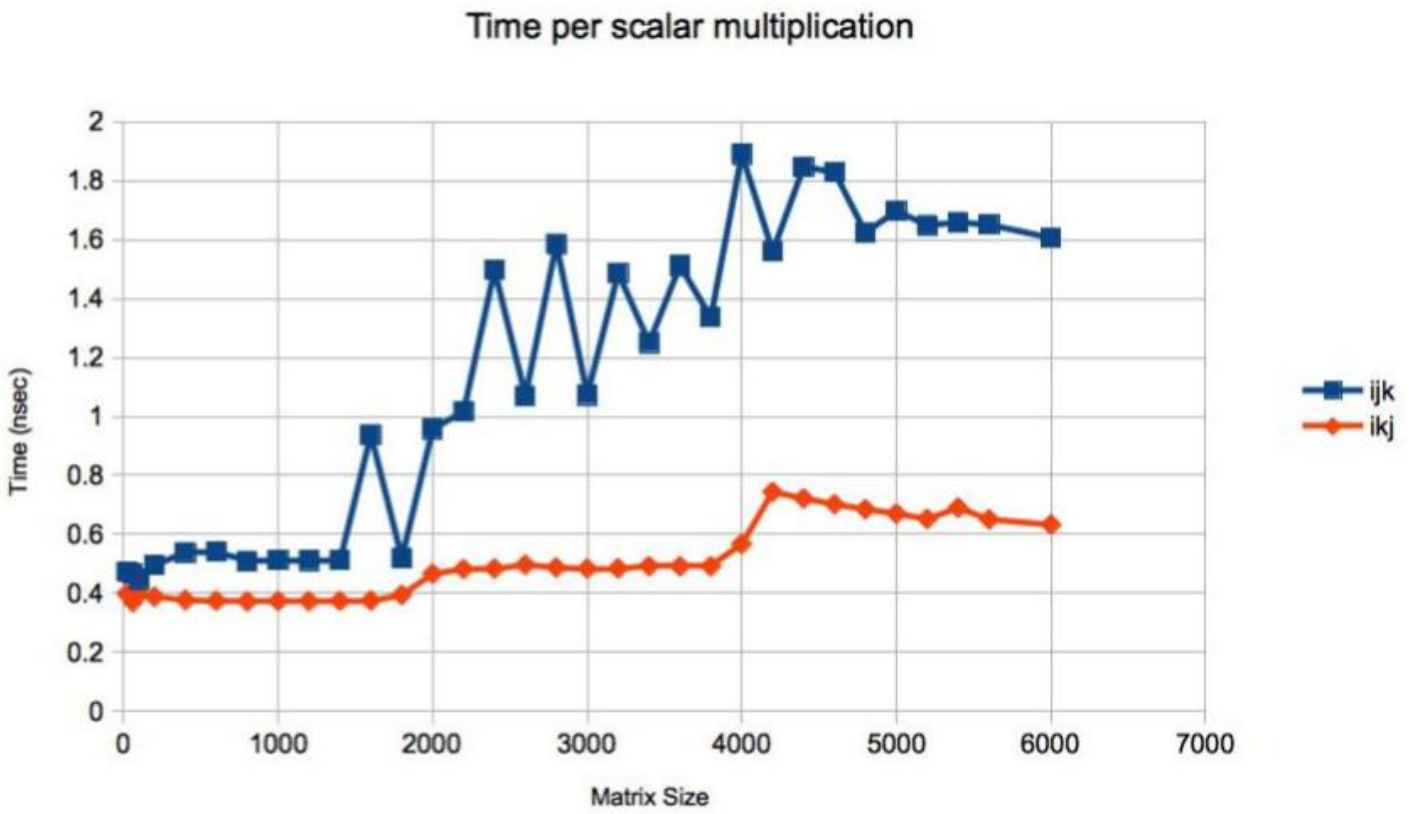
- Вычисление строки C(i,:) промахи кэша $\frac{2n}{m} + \frac{n^2}{m}$

- Общее число промахов : $\frac{2n^2}{m} + \frac{n^3}{m} = O(\frac{n^3}{m})$

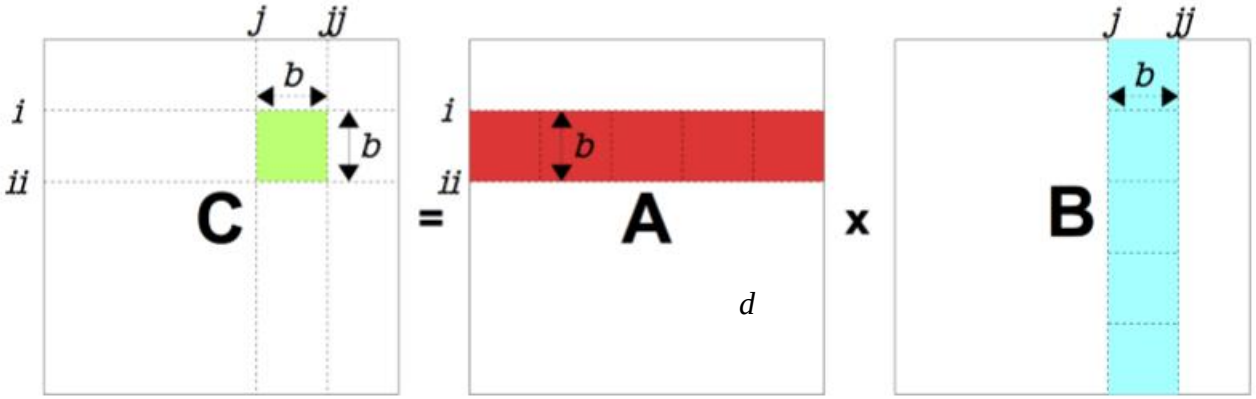
ikj реализация

```
void square_dgemm (int n, double* A, double* B, double* C)
{
       for (int i = 0; i < n; ++i)
        {
                const int iOffset = i*n;
               for (int k = 0; k < n; ++k) {
                  double cij = 0.0;
                for( int j = 0; j < n; j++ )
                   const int kOffset = k*n;
                 C[iOffset+j] += A[iOffset+j] * B[kOffset+j]
                      cij += A[iOffset+k] * B[k*n+j];
                c[iOffset+j] += cij;
      }
}
```

Сравнение времени ikj и ijk



Блочный вариант



- Предположения для анализа: $n\%b = 0 \quad m\%b = 0$
- Промахи кэша при загрузке кэша: $\frac{b^2}{m}$
- Промахи кэша при вычислении блока C: $\frac{b^2}{m} + \frac{b^2}{m}\frac{2n}{b} = \frac{b^2}{m} + \frac{2nb}{m}$
- Общее число промахов кэша: $\frac{n^2}{b^2}\left(\frac{b^2}{m} + \frac{2nb}{m}\right) = \frac{n^2}{m} + \frac{2n^3}{mb} = \Theta\left(\frac{n^3}{mb}\right)$

Оценка размера блока

- 3 блока A, B и C должны разместиться в кэше
- $3b^2 = mL$, i.e., $b = \sqrt{\frac{mL}{3}}$
- Для L1 объемом 32 KB, mL= 4096 и b = 36.95
- Значение b можно выбрать равным 32
- Общее число промахоа кэша: $\frac{2n^3}{mb} = \frac{2\sqrt{3}n^3}{m\sqrt{mL}} = \Theta(\frac{n^3}{m\sqrt{\text{Cache Size}}})$

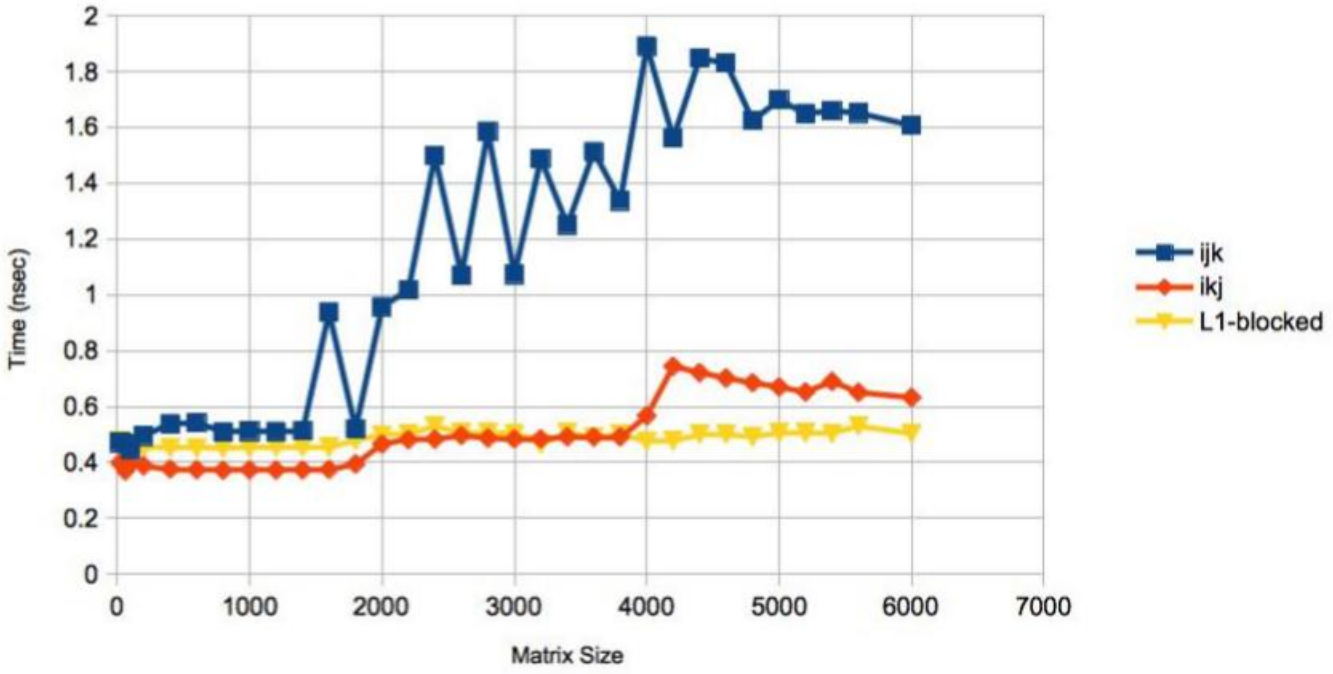
Блочный алгоритм (1)

```
void square_dgemm (int n, double* A, double* B, double* C)
{
    for (int i = 0; i < n; i += BLOCK_SIZE)
    {
        const int iOffset = i * n;
        for (int j = 0; j < n; j += BLOCK_SIZE)
            for (int k = 0; k < n; k += BLOCK_SIZE)
            {
                /* Correct block dimensions if block "goes off
                    edge of" the matrix */
                int M = min (BLOCK_SIZE, n-i);
                int N = min (BLOCK_SIZE, n-j);
                int K = min (BLOCK_SIZE, n-k);
                /* Perform individual block dgemm */
                do_block(n, M, N, K, A + iOffset + k,
                        B + k*n + j, C + iOffset + j);
            }
    }
```

Блочный алгоритм (2)

```
static void do_block (int n, int M, int N, int K, double* A,
    double* B, double* C)
{
    for (int i = 0; i < M; ++i)
    {
        const int iOffset = i*n;
        for (int j = 0; j < N; ++j)
        {
            double cij = 0.0;
            for (int k = 0; k < K; ++k)
                cij += A[iOffset+k] * B[k*n+j];
            C[iOffset+j] += cij;
        }
    }
}
```

Сравнение вариантов ijk, ikj и L1-блочный

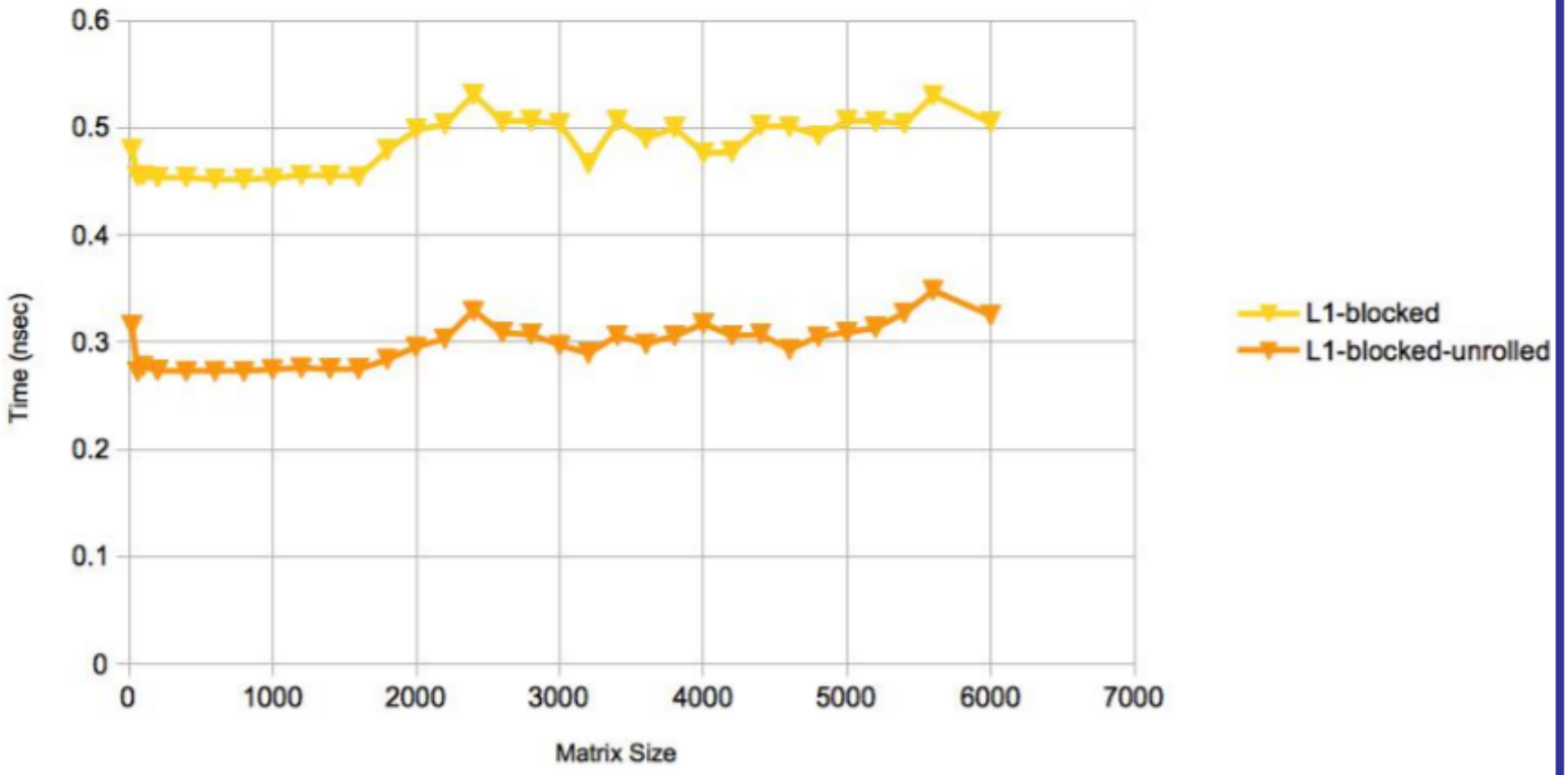


Оптимизация блочного алгоритма

```
for (int k = 0; k < K; ++k)
    cij += A[iOffset+k] * B[k*n+j];
```

```
for (int k = 0; k < K; k += 8)
{
    const double d0 = A[iOffset+k] * B[k*n+j];
    const double d1 = A[iOffset+k+1] * B[(k+1)*n+j];
    const double d2 = A[iOffset+k+2] * B[(k+2)*n+j];
    const double d3 = A[iOffset+k+3] * B[(k+3)*n+j];
    const double d4 = A[iOffset+k+4] * B[(k+4)*n+j];
    const double d5 = A[iOffset+k+5] * B[(k+5)*n+j];
    const double d6 = A[iOffset+k+6] * B[(k+6)*n+j];
    const double d7 = A[iOffset+k+7] * B[(k+7)*n+j];
    cij += (d0 + d1 + d2 + d3 + d4 + d5 + d6 + d7);
}
```

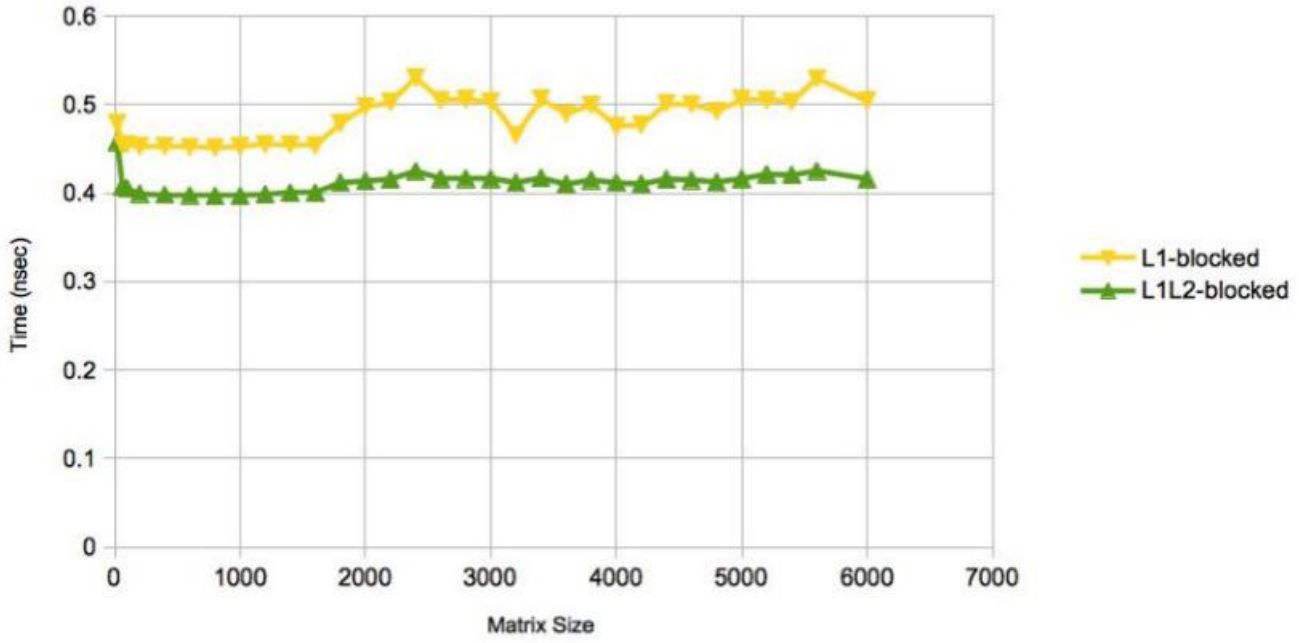
Сравнение: L1-блочный и L1-блочный с оптимизацией



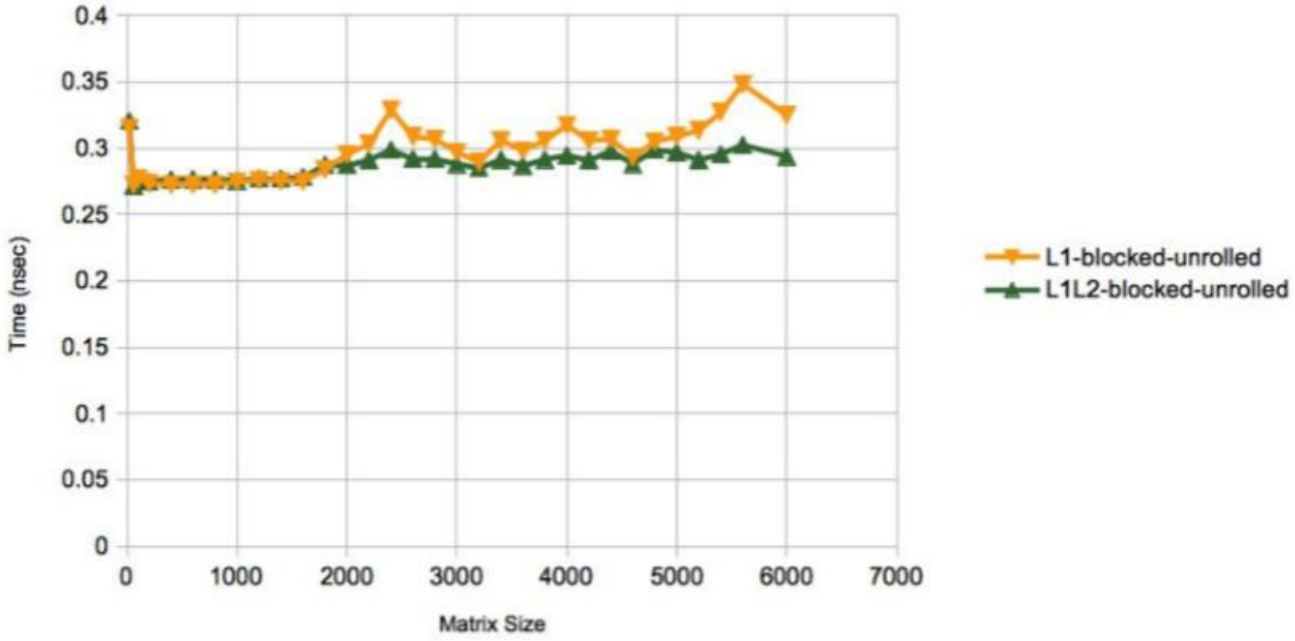
L2

- В дополнение к L1 блочность может быть и для L2
- Для L2 объемом 256 KB, mL =4096 и b=105
- Определение лучшего размера L2 является нетривиальной задачей и требует проведения экспериментов с различными размерами
- В приводимом примере выбрано значение 88 для L2

Сравнение: L1-блочный & L1L2-блочный



Сравнение оптимизированных вариантов: L1-блочный & L1L2-блочный



Рекурсивный алгоритм умножения

$$C = A \times B$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}$$

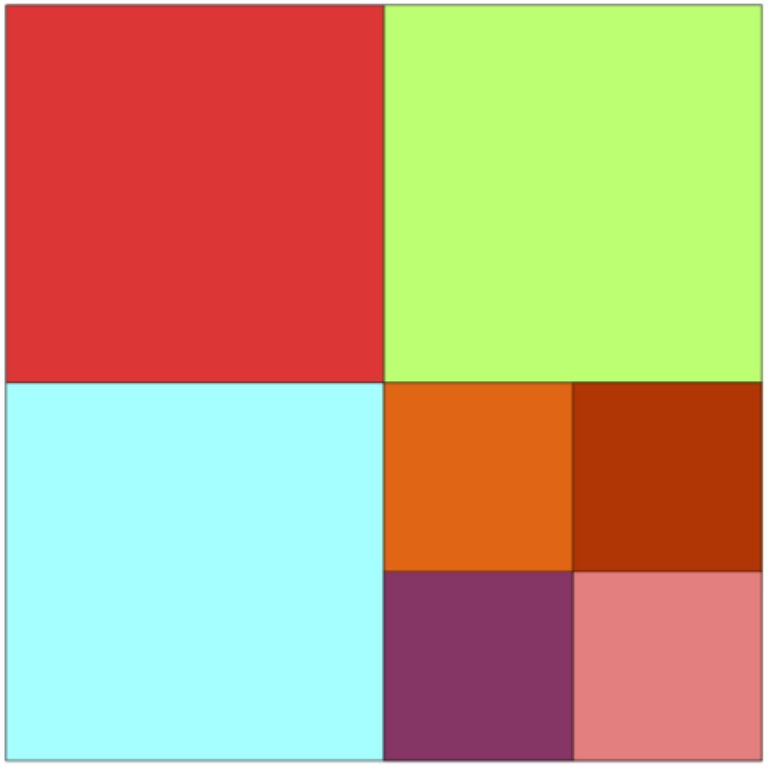
$$\Rightarrow C_{11} = A_{11}B_{11} + A_{12}B_{21}$$

$$C_{12} = A_{11}B_{12} + A_{12}B_{22}$$

$$C_{21} = A_{21}B_{11} + A_{22}B_{21}$$

$$C_{22} = A_{21}B_{12} + A_{22}B_{22}$$

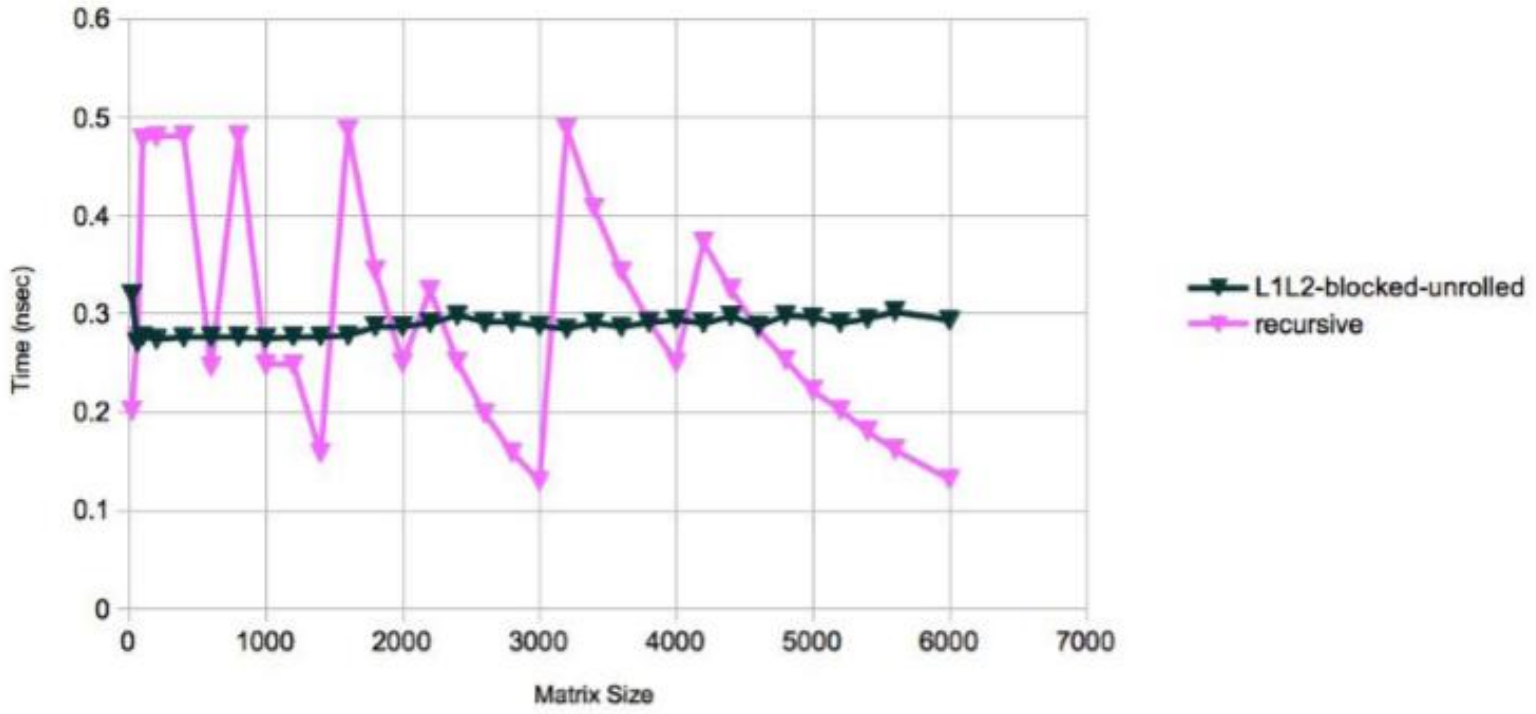
Рекурсивный алгоритм: разбиение матриц



Рекурсивный алгоритм

```
void multiply(const int n, const int m, double * A, double * B, double * C)
{
    //Base cases
    if(m == 2)
    {
        baseCase2(n, m, A, B, C);
        return;
    }
    else if(m == 1)
    {
        C[0] += A[0] * B[0];
        return;
    }
    //Recursive multiply
    const int offset12 = m/2;
    const int offset21 = n*m/2;
    const int offset22 = offset21 + offset12;
    multiply(n, m/2, A, B, C);
    multiply(n, m/2, A+offset12, B+offset21, C);
    multiply(n, m/2, A, B+offset12, C+offset12);
    multiply(n, m/2, A+offset12, B+offset22, C+offset12);
    multiply(n, m/2, A+offset21, B, C+offset21);
    multiply(n, m/2, A+offset22, B+offset21, C+offset21);
    multiply(n, m/2, A+offset21, B+offset12, C+offset22);
    multiply(n, m/2, A+offset22, B+offset22, C+offset22);
    return;
}
```

Сравнение: рекурсивный алгоритм и L1L2 оптимизированный блочный



Литература

- Optimizing software in C++: An optimization guide for Windows, Linux and Mac platforms, Agner Fog (http://www.agner.org/optimize/)
- Cache: a place for concealment and safekeeping, Gustavo Duarte (http://duartes.org/gustavo/blog/post/intel-cpu-caches/)

- Drepper, U. What Every Programmer Should Know About Memory (2007). http://people.redhat.com/drepper/cpumemory.pdf.

Архитектура процессоров

- RISC или суперскалярные архитектуры
  - Конвейерные функциональные устройства (ФУ)
  - Несколько ФУ на процессоре
  - Спекулятивное исполнение операций
  - Многоуровневый кэш
  - Блоки (Cache lines) могут разделяться между несколькими процессорами

Аппаратные счетчики

- Небольшое множество регистров, который накапливают число *событий* – специфических сигналов, связанных с функционированием процессора
- Контроль за этими событиями позволяет наблюдать за тем, насколько эффективно исполняемая на процессоре программа использует ресурсы процессора

Конвейерные ФУ

- Схема из логических элементов на процессоре, которая выполняет определенные операции называется ***функциональным устройством***

- Большинство ФУ, выполняющих целочисленную арифметику и операции с плавающей точкой являются ***конвейерными***
  - Каждая стадия конвейерного ФУ работает одновременно (со своими операндами)
  - Цель: после начальной инициализации конвейера генерировать результат за один такт работы процессора

Суперскалярные процессоры

- Процессоры, имеющие несколько ФУ называются ***суперскалярными***

- Пример:
  - IBM Power 3
    - 2 floating point units (multiply-add)
    - 3 fixed point units
    - 2 load/store units
    - 1 branch/dispatch unit

“Out of Order” выполнение операций

- CPU динамически выполняет инструкции по мере их готовности, в случае необходимости, не в последовательном, предусмотренном программой порядке
  - Любой результат, полученный в результате «out of order» является временным, пока все предшествующие операции не завершатся успешно.
  - Для выбора инструкций на выполнение на ФУ используются очереди
  - Соответствующие аппаратные метрики: выданные инструкции, завершенные инструкции

Спекулятивное выполнение

- ЦПУ пытается предсказать порядок условных переходов и выполняет инструкции спекулятивно по предсказанному пути
  - Если предсказание неверное, выполненные инструкции отменяются
  - На многих процессорах аппаратные счетчики накапливают число правильных и неправильных предсказаний (branch prediction).

Счетчики инструкций (instruction counts) и статуса ФУ

- Аппаратные счетчики, хранящие данные об
  - общем числе тактов
  - общем числе инструкций
  - операциях с плавающей точкой
  - Load/store инструкциях
  - тактах, во время которых ФУ простаивали
  - заблокированных тактах, связанных с
    - ожиданием доступа к операндам в памяти
    - ожиданием ресурсов
  - Инструкциях условного перехода
    - выполненных
    - неправильно предсказанных (mispredicted)

Аппаратные счетчики для работы с кэшем

- Аппаратные счетчики
  - Cache misses and hit ratios
  - Cache line invalidations (рассогласование кэша)

TLB и виртуальная память

- Страничная организация памяти .
- ОС транслирует виртуальные адреса в физические.
  - Последние используемые адреса кэшируются в *translation lookaside buffer (TLB).*
  - Если в программе происходит доступ к виртуальным адресам, отсутствующим в TLB, происходит *TLB miss* .
- Соответствующий аппаратный счетчик: TLB misses

Задержки по доступу к памяти (latency)

- CPU register: 0 cycles
- L1 cache hit: 2-3 cycles
- L1 cache miss satisfied by L2 cache hit: 8-12 cycles
- L2 cache miss satisfied from main memory, no TLB miss: 75-250 cycles
- TLB miss requiring only reload of the TLB: ~2000 cycles
- TLB miss requiring reload of virtual page – *page fault*: hundreds of millions of cycles

Измерение времени выполнения программы

- Типы времени

  w***all-clock time***

  - базируется на реальном времени (постоянно меняется)

  - включает все активности

  virtual process time (CPU time)

  - время, когда выполняется процесс (CPU активно)

  user time and system time (могут означать разные вещи)

  - не включает время ожидания, в котором находится процесс

Timer: gettimeofday()

- UNIX функция
  - возвращает wall-clock time в секундах и микросекундах
  - точность зависит от аппартуры
  - базовое отсчет от 00:00 UTC, January 1, 1970
  - некоторые реализации возвращают и временную зону

Пример

```
#include <sys/time.h>
struct timeval tv;
double walltime; /* seconds */
gettimeofday(&tv, NULL);
walltime = tv.tv_sec + tv.tv_usec * 1.0e-6;
```

Timer: clock_gettime()

POSIX функция

- wall-clock время в секундах и наносекундах
- Разрешение зависит от аппаратуры

```
#include <time.h>
struct timespec tv;
double walltime; /* seconds */
clock_gettime(CLOCK_REALTIME, &tv);
walltime = tv.tv_sec + tv.tv_nsec * 1.0e-9;
```

Timer: getrusage()

- UNIX функция

  - обеспечивает различную информацию, включая время, системное время, использование памяти и т.п.

  - зависит от реализации

```
#include <sys/resource.h>
struct rusage ru;
double usrtime; /* seconds */
int memused;
getrusage(RUSAGE_SELF, &ru);
usrtime = ru.ru_utime.tv_sec +
ru.ru_utime.tv_usec * 1.0e-6;
memused = ru.ru_maxrss;
```

Аппаратные метрики

- Cycles / Instructions IPC
- Floating point instructions FLOPS
- Integer instructions computation intensity
- Load/stores instructions per load/store
- Cache misses load/stores per cache miss
- Cache misses cache hit rate
- Cache misses loads per load miss
- TLB misses loads per TLB miss

Overview of PAPI) (http://icl.cs.utk.edu/papi/

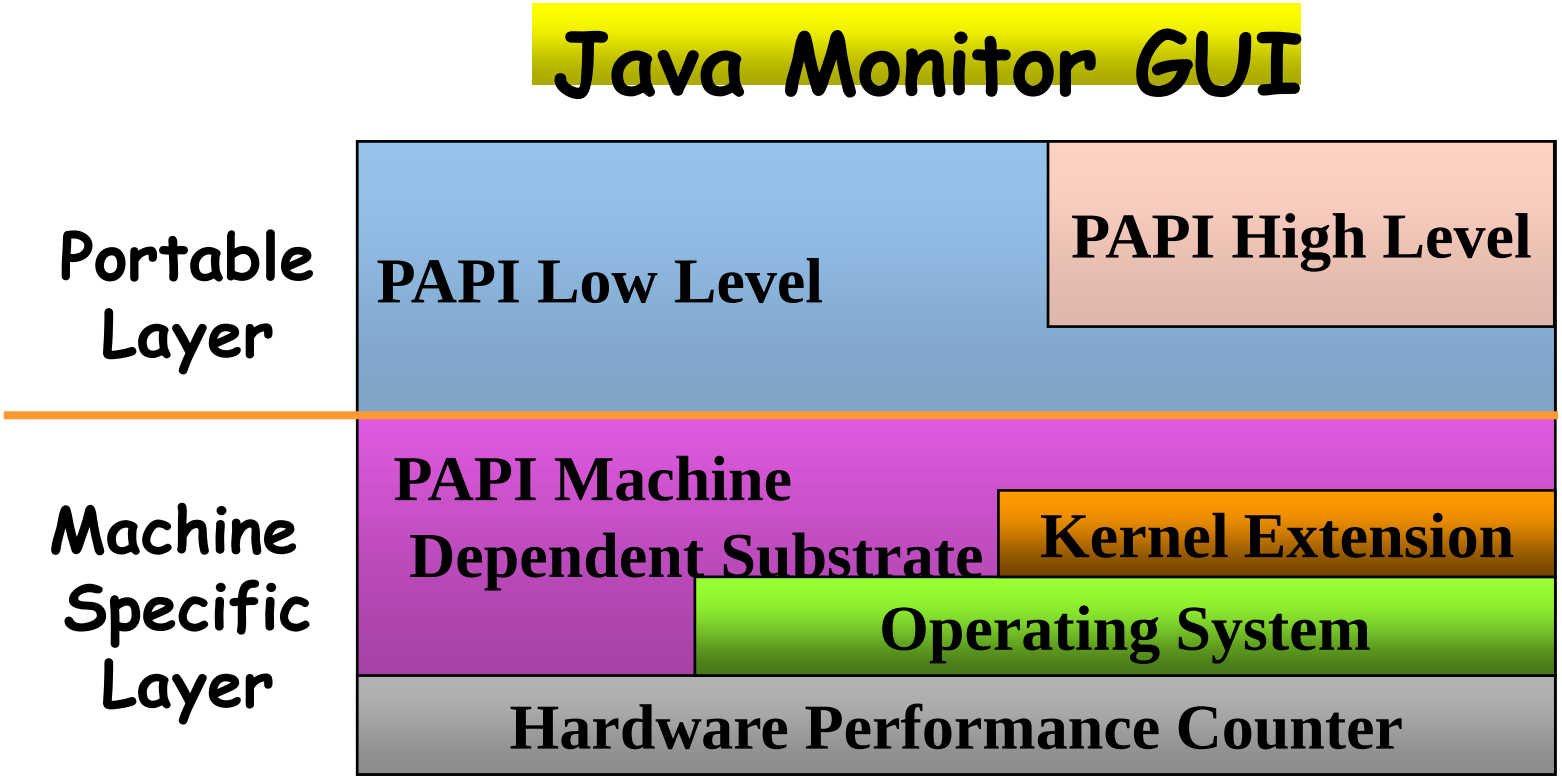
- **P**erformance **A**pplication **P**rogramming **I**nterface
- The purpose of the PAPI project is to design, standardize and implement a portable and efficient API to access the hardware performance monitor counters found on most modern microprocessors.
- Parallel Tools Consortium project

  http://www.ptools.org/

PAPI Counter Interfaces

- PAPI обеспечивает 3 типа интерфейса к аппаратным счетчикам:
  1. The low level interface manages hardware events in user defined groups called *EventSets*.
  2. The high level interface simply provides the ability to start, stop and read the counters for a specified list of events.
  3. Graphical tools to visualize information.

PAPI ***Implementation***



Основные функции PAPI

- Восемь основных функций:
  - *PAPI_num_counters*
  - *PAPI_start_counters,*
  - *PAPI_stop_counters*
  - *PAPI_read_counters*
  - *PAPI_accum_counters*
  - *PAPI_flops*
  - *PAPI_flips, PAPI_ipc*

Low Level API

- Increased efficiency and functionality over the high level PAPI interface
  - 54 functions
  - access to native events
  - obtain information about the executable, the hardware, and memory
  - set options for multiplexing and overflow handling

Event sets

- The event set contains key information
  - What low-level hardware counters to use
  - Most recently read counter values
  - The state of the event set (running/not running)
  - Option settings (e.g., domain, granularity, overflow, profiling)
- Event sets can overlap if they map to the same hardware counter set-up.
  - Allows inclusive/exclusive measurements

Event set Operations

- Event set management
  PAPI_create_eventset, PAPI_add_event[s],
  PAPI_rem_event[s], PAPI_destroy_eventset
- Event set control
  PAPI_start, PAPI_stop, PAPI_read, PAPI_accum
- Event set inquiry
  PAPI_query_event, PAPI_list_events,...

Initialize the PAPI library PAPI_library_init()

```
PAPI_library_init()
if (PAPI_VER_CURRENT !=
    PAPI_library_init(PAPI_VER_CURRENT))
                    ehandler("PAPI_library_init error.");
```

PAPI_num_counters()

Check how many counters this CPU can monitor

```
const size_t EVENT_MAX = PAPI_num_counters();
```

PAPI_query_event()

```
if (PAPI_OK!=PAPI_query_event(PAPI_TOT_INS))
                    ehandler("Cannot count PAPI_TOT_INS.");
if (PAPI_OK != PAPI_query_event(PAPI_L1_DCM))
                    ehandler("Cannot count PAPI_L1_DCM.");
if (PAPI_OK != PAPI_query_event(PAPI_L2_DCM))
                    ehandler("Cannot count PAPI_L2_DCM.");
```

PAPI_start_counters()

```
size_t  EVENT_COUNT = 3;
int events[] = { PAPI_TOT_INS, PAPI_L1_DCM, PAPI_L2_DCM };
PAPI_start_counters(events, EVENT_COUNT);
```

PAPI_read_counters()

```
long long values[EVENT_COUNT];
if (PAPI_OK != PAPI_read_counters(values, EVENT_COUNT))
    ehandler("Problem reading counters 1.");
C = matrix_prod(n, n, n, n, A, B);
if (PAPI_OK != PAPI_read_counters(values, EVENT_COUNT))
    ehandler("Problem reading counters 2.");
printf("%d %lld %lld %lld\n", n, values[0], values[1], values[2])
```

PAPI_flops()

```
float rtime;
float ptime;
long long flpops;
float mflops;
if (PAPI_OK != PAPI_flops(&rtime, &ptime, &flpops, &mflops))
    ehandler("Problem reading flops 1");
C = matrix_prod(n, n, n, n, A, B);
if (PAPI_OK != PAPI_flops(&rtime, &ptime, &flpops, &mflops))
    ehandler("Problem reading flops 2");
printf("%d %lld %f\n", n, flpops, mflops);
```

Simple Example

```
#include "papi.h"
#define NUM_EVENTS 2
int Events[NUM_EVENTS]={PAPI_FP_INS,PAPI_TOT_CYC}, EventSet;
long_long values[NUM_EVENTS];
/* Initialize the Library */
retval = PAPI_library_init(PAPI_VER_CURRENT);
/* Allocate space for the new eventset and do setup */
retval = PAPI_create_eventset(&EventSet);
/* Add Flops and total cycles to the eventset */
retval = PAPI_add_events(&EventSet,Events,NUM_EVENTS);
/* Start the counters */
retval = PAPI_start(EventSet);

do_work();  /* What we want to monitor*/

/*Stop counters and store results in values */
retval = PAPI_stop(EventSet,values);
```

High-level Interface

- Meant for application programmers wanting coarse-grained measurements
- Not thread safe
- Calls the lower level API
- Allows only PAPI preset events
- Easier to use and less setup (additional code) than low-level

High-level API

- C interface
  PAPI_start_counters
  PAPI_read_counters
  PAPI_stop_counters
  PAPI_accum_counters
  PAPI_num_counters
  PAPI_flops

PAPI High-level Example

```
long long values[NUM_EVENTS];
unsigned int
   Events[NUM_EVENTS]={PAPI_TOT_INS,PAPI_TOT_CYC}
   ;
 /* Start the counters */
 PAPI_start_counters((int*)Events,NUM_EVENTS);
 /* What we are monitoring? */
 do_work();
 /* Stop the counters and store the results in values */
 retval = PAPI_stop_counters(values,NUM_EVENTS);
```

Setting up the High-level Interface

- ***int PAPI_num_counters(void)***
  - Initializes PAPI (if needed)
  - Returns number of hardware counters
- ***int PAPI_start_counters(int *events, int len)***
  - Initializes PAPI (if needed)
  - Sets up an event set with the given counters
  - Starts counting in the event set
- ***int PAPI_library_init(int version)***
  - Low-level routine implicitly called by above

Controlling the Counters

- ***PAPI_stop_counters(long_long *vals, int alen)***
  Stop counters and put counter values in array

- ***PAPI_accum_counters(long_long *vals, int alen)***
  Accumulate counters into array and reset

- ***PAPI_read_counters(long_long *vals, int alen)***
  Copy counter values into array and reset counters

- ***PAPI_flops(float *rtime, float *ptime,***
  long_long *flpins, float *mflops)
  - Wallclock time, process time, FP ins since start,
  - Mflop/s since last call

PAPI_flops

- ***int PAPI_flops(float *real_time, float *proc_time, long_long *flpins, float *mflops)***
  - only two calls needed, PAPI_flops before and after the code you want to monitor
  - real_time is the wall-clocktime between the two calls
  - proc_time is the “virtual” time or time the process was actually executing between the two calls (not as fine grained as real_time but better for longer measurements)
  - flpins is the total floating point instructions executed between the two calls
  - mflops is the Mflop/s rating between the two calls

Return codes

Name	Description
PAPI_OK	No error
PAPI_EINVAL	Invalid argument
PAPI_ENOMEM	Insufficient memory
PAPI_ESYS	A system/C library call failed. Check errno variable
PAPI_ESBSTR	Substrate returned an error. E.g. unimplemented feature
PAPI_ECLOST	Access to the counters was lost or interrupted
PAPI_EBUG	Internal error
PAPI_ENOEVNT	Hardware event does not exist
PAPI_ECNFLCT	Hardware event exists, but resources are exhausted
PAPI_ENOTRUN	Event or envent set is currently counting
PAPI_EISRUN	Events or event set is currently running
PAPI_ENOEVST	No event set available
PAPI_ENOTPRESET	Argument is not a preset
PAPI_ENOCNTR	Hardware does not support counters
PAPI_EMISC	Any other error occured

Пример (1)

```
#include <papi.h>
#define NUM_FLOPS 10000
#define NUM_EVENTS 1
main()
{
int Events[NUM_EVENTS] = {PAPI_TOT_INS};
long_long values[NUM_EVENTS];
/* Start counting events */
if (PAPI_start_counters(Events, NUM_EVENTS) != PAPI_OK)
handle_error(1);
/* Defined in tests/do_loops.c in the PAPI source distribution */
do_flops(NUM_FLOPS);
/* Read the counters */
```

Пример (2)

```
if (PAPI_read_counters(values, NUM_EVENTS) != PAPI_OK)
    handle_error(1);
printf("After reading the counters: %lld\n",values[0]);
do_flops(NUM_FLOPS);
/* Add the counters */
if (PAPI_accum_counters(values, NUM_EVENTS) != PAPI_OK)
    handle_error(1);
printf("After adding the counters: %lld\n", values[0]);
do_flops(NUM_FLOPS);
/* Stop counting events */
if (PAPI_stop_counters(values, NUM_EVENTS) != PAPI_OK)
    handle_error(1);
printf("After stopping the counters: %lld\n", values[0]);}
```

Пример

Вывод программы:

- After reading the counters: 441027
- After adding the counters: 891959
- After stopping the counters: 443994