Новосибирский государственный университет
Факультет информационных технологий
Кафедра параллельных вычислений

Эффективное программирование современных микропроцессоров и мультипроцессоров

Векторизация вычислений

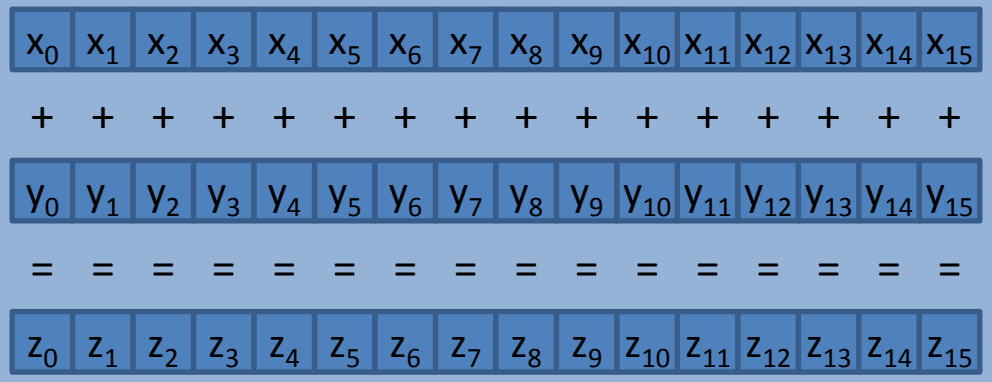
Преподаватели:
Киреев С.Е.
Калгин К.В.

План лекции

- **Введение**
- Обзор векторных расширений современных x86-микропроцессоров
- Проблемы векторизации
- Средства векторизации
- Автоматическая векторизация программ компилятором
- Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

Введение

- **Векторные вычисления** –
  это вид параллельных вычислений
  с параллелизмом на уровне данных
  (SIMD – Single Instruction Multiple Data)



Введение

- **Скалярная программа** – программа, оперирующая отдельными числами
- **Векторная программа** – программа, оперирующая векторами
- **Векторизация** (вид распараллеливания) – преобразование скалярной программы в векторную

Введение

- Цели векторизации
  1. **Ускорить работу программы**
  2. Уменьшить объем кода

- Предпосылки
  - Одна векторная команда распознаётся, декодируется и выполняется быстрее нескольких скалярных, выполняющих то же действие
  - Одна векторная команда занимает меньше места в программе и в различных очередях/таблицах/буферах в процессоре

Введение

- В современных скалярных микропроцессорах общего назначения векторные вычисления поддержаны с помощью **векторных расширений** архитектуры
  - Примеры векторных расширений: MMX, SSE, AVX, …

- Векторные расширения включают:
  - Векторные регистры – хранят множества скалярных значений
  - Векторные команды – для работы с векторными регистрами

План лекции

- Введение
- **Обзор векторных расширений современных x86-микропроцессоров**
- Проблемы векторизации
- Средства векторизации
- Автоматическая векторизация программ компилятором
- Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

Векторные расширения современных микропроцессоров

Основные параметры

- Размер регистра:
  - 8 байт, 16 байт, 32 байта, 64 байта
- Поддерживаемые типы данных:
  - Целочисленные: 1,2,4,8 байт, знаковые/беззнаковые
  - Вещественные: 4 байта (float), 8 байт (double)
- Поддерживаемые операции:
  - Чтение, запись
  - Арифметические, логические
  - Перестановки, копирование элементов вектора
  - Сравнение
  - Преобразования типов
  - Специальные операции

Векторные расширения современных микропроцессоров

- 1997 – MMX (Pentium MMX)
  - 8 байт, целочисленные операции

- 8 регистров: mm0-mm7 (поверх FPU)
- Двухоперандные операции
- Арифметика с насыщением

Векторные расширения современных микропроцессоров

- 1997 – MMX (Pentium MMX)
  - 8 байт, целочисленные операции
- 1998 – 3DNow! (K6-2)
  - 8 байт, float

- 8 регистров (поверх MMX и FPU)

Векторные расширения современных микропроцессоров

- 1997 – MMX (Pentium MMX)
  - 8 байт, целочисленные операции
- 1998 – 3DNow! (K6-2)
  - 8 байт, float
- 1999 – SSE (Pentium III)
  - 16 байт, float

- 8 (16) регистров: xmm0-xmm7 (xmm15)

Векторные расширения современных микропроцессоров

- 1997 – MMX (Pentium MMX)
  - 8 байт, целочисленные операции
- 1998 – 3DNow! (K6-2)
  - 8 байт, float
- 1999 – SSE (Pentium III)
  - 16 байт, float
- 2001 – SSE2 (Pentium 4)
  - 16 байт, double

- 8 (16) регистров: xmm0-xmm7 (xmm15)

Векторные расширения современных микропроцессоров

- 1997 – MMX (Pentium MMX)
  - 8 байт, целочисленные операции
- 1998 – 3DNow! (K6-2)
  - 8 байт, float
- 1999 – SSE (Pentium III)
  - 16 байт, float
- 2001 – SSE2 (Pentium 4)
  - 16 байт, double
- 2004 – SSE3 (Pentium 4 Prescott)
  - Горизонтальные операции
- 2006 – SSSE3 (Core 2, Atom)
  - Расширение набора целочисленных команд
- 2007 – SSE4.1 (Penryn)
- 2008 – SSE4.2 (Nehalem)
  - Специальные команды: обработка видео, обработка строк, криптография

Векторные расширения современных микропроцессоров

- 1997 – MMX (Pentium MMX)
- 1999 – SSE (Pentium III)
  - 16 байт, float
- 2001 – SSE2 (Pentium 4)
  - 16 байт, double
- 2004 – SSE3 (Pentium 4 Prescott)
  - Горизонтальные операции
- 2006 – SSSE3 (Core 2, Atom)
  - Расширение набора целочисленных команд
- 2007 – SSE4.1 (Penryn)
- 2008 – SSE4.2 (Nehalem)
  - Специальные команды: обработка видео, обработка строк, криптография

- 16 регистров ymm0-ymm15
  - регистры xmm – часть регистров ymm
- Отсутствуют требования к выравниванию обращений к памяти

- 2011 – AVX (Sandy Bridge)
  - 32 байта, float, double
  - Трёхоперандные команды
- 2013 – AVX2 (Haswell)
  - 32 байта, целочисленные операции
  - FMA: r = a*b + c

Векторные расширения современных микропроцессоров

- 1997 – MMX (Pentium MMX)
  - 8 байт, целочисленные операции
- 1998 – 3DNow! (K6-2)
  - 8 байт, float
- 1999 – SSE (Pentium III)
  - 16 байт, float
- 2001 – SSE2 (Pentium 4)
  - 16 байт, double
- 2004 – SSE3 (Pentium 4 Prescott)
  - Горизонтальные операции
  - Специальные команды: обработка видео, обработка строк, криптография
- 2011 – AVX (Sandy Bridge)
  - 32 байта, float, double
  - Трёхоперандные команды
- 2013 – AVX2 (Haswell)
  - 32 байта, целочисленные операции
  - FMA: r = a*b + c
- 2016 – AVX-512 (KNL)
  - 64 байта

- 32 регистра zmm0-zmm31
  - регистры ymm – часть регистров zmm
- 8 регистров масок: k0-k7
- Команды scatter, gather
- Операции по маске

Векторные расширения современных микропроцессоров

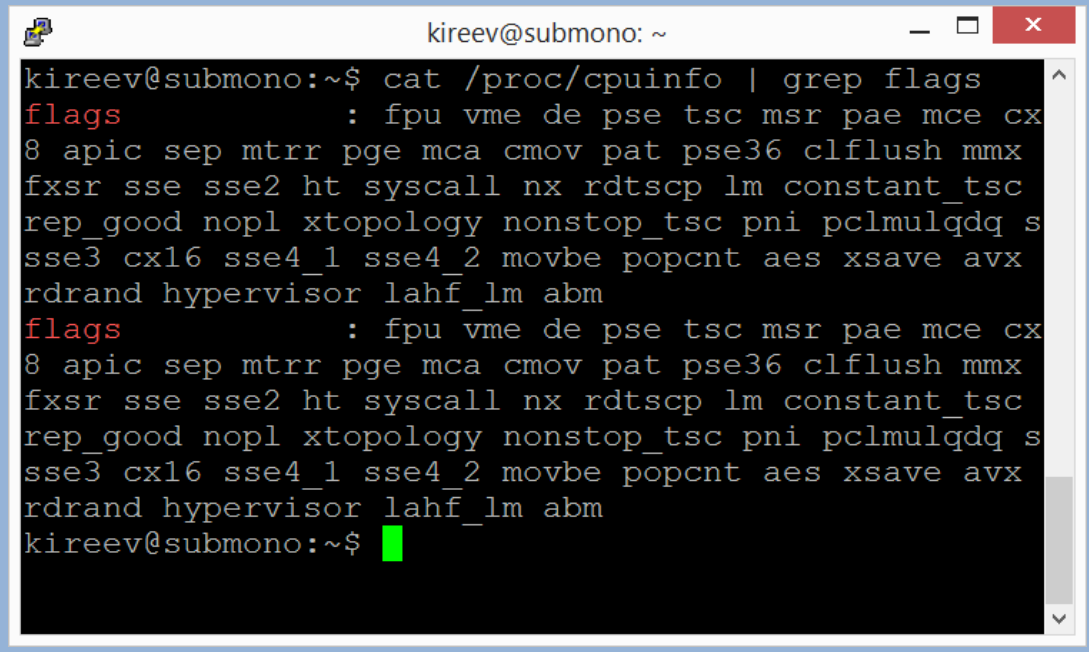
- 1997 – MMX (Pentium MMX)
  - 8 байт, целочисленные операции
- 1998 – 3DNow! (K6-2)
  - 8 байт, float
- 1999 – SSE (Pentium III)
  - 16 байт, float
- 2001 – SSE2 (Pentium 4)
  - 16 байт, double
- 2004 – SSE3 (Pentium 4 Prescott)
  - Горизонтальные операции
- 2006 – SSSE3 (Core 2, Atom)
  - Расширение набора целочисленных команд
- 2007 – SSE4.1 (Penryn)
- 2008 – SSE4.2 (Nehalem)
  - Специальные команды: обработка видео, обработка строк, криптография
- 2011 – AVX (Sandy Bridge)
  - 32 байта, float, double
  - Трёхоперандные команды
- 2013 – AVX2 (Haswell)
  - 32 байта, целочисленные операции
  - FMA: r = a*b + c
- 2016 – AVX-512 (KNL)
  - 64 байта

Векторные расширения: общий взгляд

- **SSE3** (SSE, SSE2, SSE3)
  - Где: все современные микропроцессоры
  - Что: размер регистра: 16 байт
- **AVX**
  - Где: не слишком старые микропроцессоры (после 2011 г.)
  - Что: размер регистра: 32 байта, float, double
- **AVX2**
  - Где: самые новые микропроцессоры
  - Что: размер регистра: 32 байта, FMA
- **AVX-512**
  - Где: ещё нет
  - Что: размер регистра: 64 байта

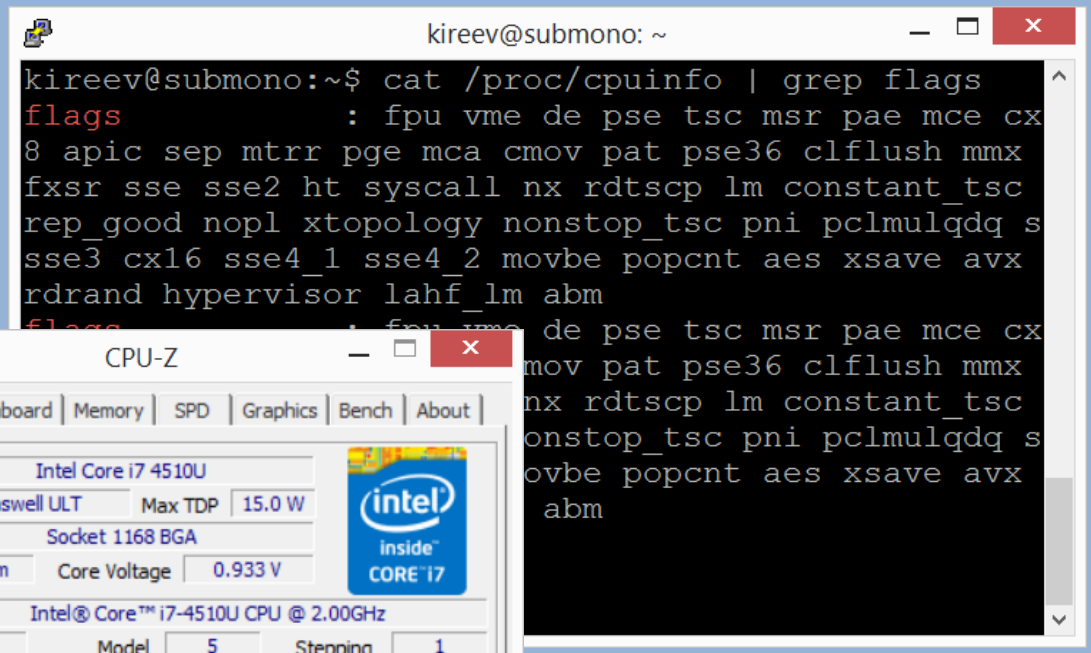
Векторные расширения: как проверить наличие

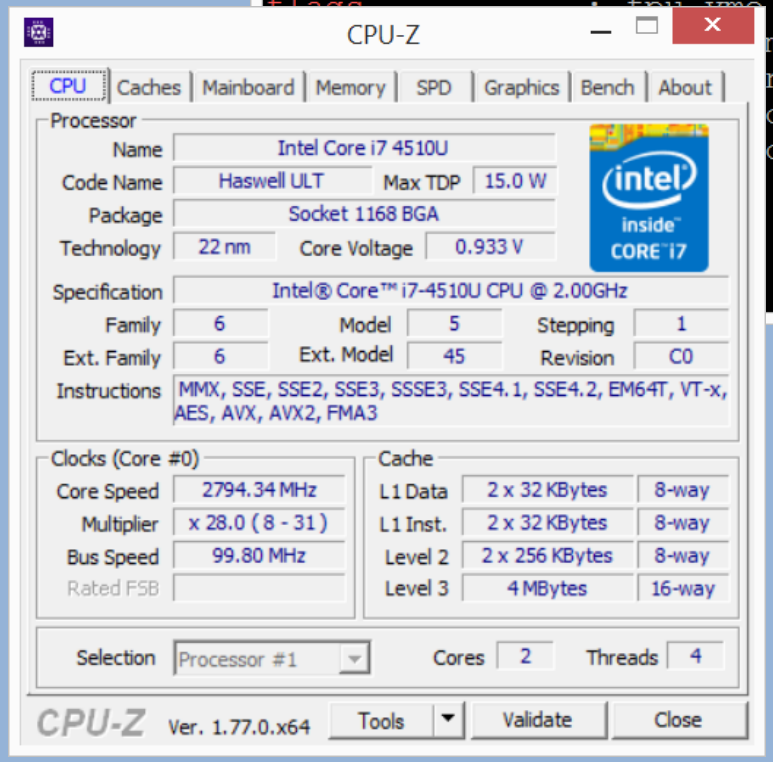
- Linux
  - cat /proc/cpuinfo
- Windows
  - CPU-Z



Векторные расширения: как проверить наличие

- Linux
  - cat /proc/cpuinfo
- Windows
  - CPU-Z





Скалярные или векторные, в чём разница?

- Скалярные инструкции: 1 × double
  - addsd a + b latency: 3, 4 throughput: 1, 0.8
  - mulsd a * b latency: 3, 5 throughput: 1, 0.5
  - divsd a / b latency: <14-22 throughput: 4-22
- Векторные SSE2: 2 × double
  - addpd a + b latency: 3, 4 throughput: 1, 0.8
  - mulpd a * b latency: 3, 5 throughput: 1, 0.5
  - divpd a / b latency: <14-22 throughput: 4-22
- Векторные AVX: 4 × double
  - vaddpd a + b latency: 3, 4 throughput: 1
  - vmulpd a * b latency: 3,4,5 throughput: 1, 0.5
  - vdivpd a / b latency: 14-35 throughput: 8-28
- Векторные AVX2: 4 × double
  - vfmadd132pd a*b+c latency: 5 throughput: 0.5

Скалярные или векторные, в чём разница?

- Скалярные инструкции: 1 × double
  - addsd a + b latency: 3, 4 throughput: 1, 0.8
  - mulsd a * b latency: 3, 5 throughput: 1, 0.5
  - divsd a / b latency: <14-22 throughput: 4-22
- Векторные SSE2: 2 × double
  - addpd a + b latency: 3, 4 throughput: 1, 0.8
  - mulpd a * b latency: 3, 5 throughput: 1, 0.5
  - divpd a / b latency: <14-22 throughput: 4-22

×2

- Векторные AVX: 4 × double
  - vaddpd a + b latency: 3, 4 throughput: 1
  - vmulpd a * b latency: 3,4,5 throughput: 1, 0.5
  - vdivpd a / b latency: 14-35 throughput: 8-28

×4

- Векторные AVX2: 4 × double
  - vfmadd132pd a*b+c latency: 5 throughput: 0.5

×4+

План лекции

- Введение
- Обзор векторных расширений современных x86-микропроцессоров
- **Проблемы векторизации**
- Средства векторизации
- Автоматическая векторизация программ компилятором
- Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

Проблемы векторизации

- Поиск в программе однотипных операций над различными данными
(приведение к однотипным операциям)
  - Проще для операций с векторами и массивами
- Доказательство независимости операций
- Выровненный доступ к данным
- Оценка затрат на сборку-разборку векторов
  - Выигрыш должен быть больше затрат
- Переносимость
  - Какое векторное расширение использовать?
  - Многоверсионный код

План лекции

- Введение
- Обзор векторных расширений современных x86-микропроцессоров
- Проблемы векторизации
- **Средства векторизации**
- Автоматическая векторизация программ компилятором
- Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

Средства векторизации

- Вставки на ассемблере (микрокодирование)
- Векторные операции и типы данных в языке
  - Встроенные в компилятор операции (intrinsics) и типы данных
  - Классы векторных типов данных в ICC
  - Встроенные атрибуты векторных типов в GCC
- Директивы компилятора
- Векторизуемые операции с массивами
- Векторизующий компилятор
- Библиотеки векторизованных подпрограмм

Средства векторизации
Вставки на ассемблере (микрокодирование)

Где работает:

- Работает на всех компиляторах, допускающих ассемблерные вставки
- Встроенный ассемблер должен знать используемые команды

Пример: сложение двух 4-элементных векторов
с использованием расширения SSE

```
typedef struct{
        float x, y, z, w;
} Vector4;

void SSE_Add(Vector4 *res, Vector4 *a, Vector4 *b){
        asm volatile ("mov %0, %%eax"::"m"(a));
        asm volatile ("mov %0, %%ebx"::"m"(b));
        asm volatile ("movups (%eax), %xmm0");
        asm volatile ("movups (%ebx), %xmm1");
        asm volatile ("addps %xmm1, %xmm0");
        asm volatile ("mov %0, %%eax"::"m"(res));
        asm volatile ("movups %xmm0, (%eax)");
}
```

Средства векторизации

Векторные операции и типы данных в языке

Встроенные в компилятор операции (intrinsics) и типы данных

- Для каждого представления векторного регистра есть свой тип данных
- Для каждой векторной команды процессора есть своя встроенная функция

Где работает:

- На большинстве известных компиляторов (gcc, clang, icc, cl.exe, …)
- Компилятор должен поддерживать используемое векторное расширение

Пример: скалярное произведение векторов длины n, кратной 4-м,
с использованием расширения SSE

```
#include <xmmintrin.h>
float inner(int n, float* x, float* y){
  __m128 *xx = (__m128*)x;
  __m128 *yy = (__m128*)y;
  __m128 s = _mm_setzero_ps();
  for(int i=0; i<n/4; ++i){
    __m128 p = _mm_mul_ps(xx[i],yy[i]);
    s = _mm_add_ps(s,p);
  }
 __m128 p = _mm_movehl_ps(p,s);
  s = _mm_add_ps(s,p);
  p = _mm_shuffle_ps(s,s,1);
  s = _mm_add_ss(s,p);
  float sum;
  _mm_store_ss(&sum,s);
  return sum;
}
```

Intel Intrinsics Guide:
https://software.intel.com/sites/landingpage/IntrinsicsGuide/

Средства векторизации

Векторные операции и типы данных в языке

Классы векторных типов данных в Intel C++ Compiler

- Для каждого представления векторного регистра есть свой класс
- Для каждой векторной команды процессора есть свой метод
  - обёртка над SIMD intrinsics
- Дополнительные методы и операторы для работы с векторами
  - add_horizontal, mul_horizontal, flip_sign, length, length_sqr, dot, normalize, <<, [], …

Где работает:

- Intel C++ Compiler, необходимо подключить ivec.h / fvec.h / dvec.h

Пример: скалярное произведение векторов длины n, кратной 4-м, с использованием расширения SSE

```
#include<fvec.h>

float inner(int n, float* x, float* y){
  F32vec4 *xx = (F32vec4*)x;
  F32vec4 *yy = (F32vec4*)y;
  F32vec4 s; s.set_zero();
  for(int i=0; i<n/4; ++i)
    s += xx[i] * yy[i];
  return add_horizontal(s);
}
```

Средства векторизации

Векторные операции и типы данных в языке

Встроенные атрибуты векторных типов в GCC

- Векторные типы данных: __attribute__((vector_size(16)))
- Перегруженные обычные операции: +, *, >=, >>, …
- Встроенные операции: __builtin_shuffle(a,b,mask)

Где работает:

- gcc, clang

Пример: вычисление квадрата разности двух 4-элементных векторов

```
typedef float v4f __attribute__ ((vector_size (16)));

float inner(int n, float* x, float* y){
  v4f *xx = (v4f*)x;
  v4f *yy = (v4f*)y;
  v4f s = {0.0f, 0.0f, 0.0f, 0.0f};
  for(int i=0; i<n/4; ++i)
    s += xx[i] * yy[i];
  return s[0] + s[1] + s[2] + s[3];
}
```

GCC vector extension:
https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Vector-Extensions.html

Средства векторизации
Директивы компилятора

- Директивы распараллеливания циклов на основе OpenMP
- Программист сам следит за корректностью применения директив

Где работает:

- Intel C/C++ Compiler (#pragma simd)
- Компиляторы, поддерживающие OpenMP 4.0
  - icc, gcc-4.9 -fopenmp-simd

- Пример: скалярное произведение векторов длины n:

```
float inner(int n, float* x, float* y){
  float s = 0.0f;
  #pragma omp simd reduction(+:s)
  for(int i=0; i<n; ++i)
    s += x[i] * y[i];
  return s;
}
```

Intel SIMD vectorization:
https://software.intel.com/ru-ru/node/512635
OpenMP 4.0:
http://www.openmp.org/mp-documents/OpenMP4.0.0.pdf

Средства векторизации

Расширение языка

- Правила выделения секций массивов
- Скалярные операции и функции определены для массивов
- Функции для редукции по элементам массива

Где работает Cilk Plus:

- icc, gcc-4.9 -fcilkplus

Пример:

Fortran 90	Расширение Intel Cilk Plus для C/C++

`real*8 a(N,N), b(N,N), c(N,N)`
`a(1:N/2,:) = -1.0`
`a(N/2+1:N,:) = 1.0`
`b = 2.0`
`c = sin(a) + b*5.0`
	`double a[N][N], b[N][N], c[N][N];`
	`a[ 0:N/2][:] = -1.0;`
	`a[N/2:N/2][:] = 1.0;`
	`b[:][:] = 2.0;`
	`c[:][:] = sin(a[:][:]) + b[:][:]*5.0;`

Пример: скалярное произведение векторов длины n:

```
float inner(int n, float x[n], float y[n]){
  return __sec_reduce_add(x[:] * y[:]);
}
```

Intel Cilk Plus:
https://www.cilkplus.org/

Средства векторизации
Векторизующий компилятор

- Компилятор распознаёт циклы, которые могут быть векторизованы, и векторизует их
- Пользователь может сообщать компилятору дополнительную информацию и пожелания с помощью директив
- Где работает:
  - gcc (циклы попроще), icc (циклы посложнее)
- Пример: скалярное произведение векторов длины n:

```
float inner(int n, float* x, float* y){
  float s = 0.0f;
  for(int i=0; i<n; ++i)
    s += x[i] * y[i];
  return s;
}

$icc -vec-report=3 test.c
…
test.c(21): (col. 3) remark: LOOP WAS VECTORIZED
…
```

Intel automatic vectorization:
https://software.intel.com/ru-ru/node/512629

Средства векторизации

Библиотеки векторизованных подпрограмм

- Библиотека подпрограмм, которые уже реализованы с использованием векторных расширений
- Пример: операция вычисления скалярного произведения векторов из библиотеки BLAS MKL

Где работает: везде

```
#include<mkl_blas.h>

float inner(int n, float* x, float* y){
  int inc = 1;
  return SDOT(&n,x,&inc,y,&inc);
}
```

ATLAS: http://math-atlas.sourceforge.net/
Intel MKL: https://software.intel.com/en-us/intel-mkl
AMD ACML: http://developer.amd.com/tools-and-sdks/cpu-development/amd-core-math-library-acml/

План лекции

- Введение
- Обзор векторных расширений современных x86-микропроцессоров
- Проблемы векторизации
- Средства векторизации
- **Автоматическая векторизация программ компилятором**
- Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Рассматриваются внутренние циклы

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Рассматриваются внутренние циклы
- Цикл должен быть правильной структуры
  - for (i=a1; i<a2; i+=a3) …
  - a1,a2,a3 – целочисленные, инварианты цикла
  - Нет других точек входа и выхода (return, break, continue, goto)

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Рассматриваются внутренние циклы
- Цикл должен быть правильной структуры
  - for (i=a1; i<a2; i+=a3) …
  - a1,a2,a3 – целочисленные, инварианты цикла
  - Нет других точек входа и выхода (return, break, continue, goto)
- Тело цикла должно быть простым
  - Без циклов, без сложных условных конструкций

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Рассматриваются внутренние циклы
- Цикл должен быть правильной структуры
  - for (i=a1; i<a2; i+=a3) …
  - a1,a2,a3 – целочисленные, инварианты цикла
  - Нет других точек входа и выхода (return, break, continue, goto)
- Тело цикла должно быть простым
  - Без циклов, без сложных условных конструкций
- Итерации цикла должны быть независимыми на дистанции размера вектора

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Рассматриваются внутренние циклы
- Цикл должен быть правильной структуры
  - for (i=a1; i<a2; i+=a3) …
  - a1,a2,a3 – целочисленные, инварианты цикла
  - Нет других точек входа и выхода (return, break, continue, goto)
- Тело цикла должно быть простым
  - Без циклов, без сложных условных конструкций
- Итерации цикла должны быть независимыми на дистанции размера вектора
- Типы данных должны быть векторизуемыми

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Рассматриваются внутренние циклы
- Цикл должен быть правильной структуры
  - for (i=a1; i<a2; i+=a3) …
  - a1,a2,a3 – целочисленные, инварианты цикла
  - Нет других точек входа и выхода (return, break, continue, goto)
- Тело цикла должно быть простым
  - Без циклов, без сложных условных конструкций
- Итерации цикла должны быть независимыми на дистанции размера вектора
- Типы данных должны быть векторизуемыми
- Вызываемые функции должны иметь векторизованные варианты (Intel C/C++ Compiler)

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Рассматриваются внутренние циклы
- Цикл должен быть правильной структуры
  - for (i=a1; i<a2; i+=a3) …
  - a1,a2,a3 – целочисленные, инварианты цикла
  - Нет других точек входа и выхода (return, break, continue, goto)
- Тело цикла должно быть простым
  - Без циклов, без сложных условных конструкций
- Итерации цикла должны быть независимыми на дистанции размера вектора
- Типы данных должны быть векторизуемыми
- Вызываемые функции должны иметь векторизованные варианты (Intel C/C++ Compiler)
- Векторизация должна быть выгодна

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 1: первый взгляд на векторизацию
  - Включение векторизации:
    - в GCC: ключи -ftree-vectorize, -O3
    - в ICC: ключи -simd, -O2

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 1: первый взгляд на векторизацию
  - Включение векторизации:
    - в GCC: ключи -ftree-vectorize, -O3
    - в ICC: ключи -simd, -O2
  - Проверка векторизации:
    - в GCC: ключи -fopt-info-vec-optimized, -fopt-info-vec-missed
    - в ICC: ключ -vec-report=3
    - Посмотреть команды ассемблера

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 1: первый взгляд на векторизацию
  - Включение векторизации:
    - в GCC: ключи -ftree-vectorize, -O3
    - в ICC: ключи -simd, -O2
  - Проверка векторизации:
    - в GCC: ключи -fopt-info-vec-optimized, -fopt-info-vec-missed
    - в ICC: ключ -vec-report=3
    - Посмотреть команды ассемблера
  - Разные векторные расширения
    - -msse4, -mavx, -mavx2, -march=haswell

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 1: первый взгляд на векторизацию
  - Включение векторизации:
    - в GCC: ключи -ftree-vectorize, -O3
    - в ICC: ключи -simd, -O2
  - Проверка векторизации:
    - в GCC: ключи -fopt-info-vec-optimized, -fopt-info-vec-missed
    - в ICC: ключ -vec-report=3
    - Посмотреть команды ассемблера
  - Разные векторные расширения
    - -msse4, -mavx, -mavx2, -march=haswell
  - Есть ли эффект от векторизации?

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 1: первый взгляд на векторизацию
  - Включение векторизации:
    - в GCC: ключи -ftree-vectorize, -O3
    - в ICC: ключи -simd, -O2
  - Проверка векторизации:
    - в GCC: ключи -fopt-info-vec-optimized, -fopt-info-vec-missed
    - в ICC: ключ -vec-report=3
    - Посмотреть команды ассемблера
  - Разные векторные расширения
    - -msse4, -mavx, -mavx2, -march=haswell
  - Есть ли эффект от векторизации?
    - Зависит от соотношения операций и обращений в память

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 1: первый взгляд на векторизацию
  - Включение векторизации:
    - в GCC: ключи -ftree-vectorize, -O3
    - в ICC: ключи -simd, -O2
  - Проверка векторизации:
    - в GCC: ключи -fopt-info-vec-optimized, -fopt-info-vec-missed
    - в ICC: ключ -vec-report=3
    - Посмотреть команды ассемблера
  - Разные векторные расширения
    - -msse4, -mavx, -mavx2, -march=haswell
  - Есть ли эффект от векторизации?
    - Зависит от соотношения операций и обращений в память
    - Зависит от векторизуемых операций

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 2: выравнивание данных
  - Хорошее: `y[i] = 2.5*x[i] + y[i];`

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 2: выравнивание данных
  - Хорошее: `y[i] = 2.5*x[i] + y[i];`
  - Не очень хорошее: `y[i] = 2.5*x[i+1] + y[i];`

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 2: выравнивание данных
  - Хорошее: `y[i] = 2.5*x[i] + y[i];`
  - Не очень хорошее: `y[i] = 2.5*x[i+1] + y[i];`
  - Не очень хорошее: `y[i] = 2.5*x[2*i] + y[i];`

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 3: функции в цикле

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 3: функции в цикле
  - Нет векторных аналогов в GCC: sin(x)

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 3: функции в цикле
  - Нет векторных аналогов в GCC: sin(x)
  - Есть векторные, но не используются: sqrt(x)

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 3: функции в цикле
  - Нет векторных аналогов в GCC: sin(x)
  - Есть векторные, но не используются: sqrt(x)
  - Используются, если понизить требования к вещественной арифметике: ключи –ffast-math, -Ofast

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 3: функции в цикле
  - Нет векторных аналогов в GCC: sin(x)
  - Есть векторные, но не используются: sqrt(x)
  - Используются, если понизить требования к вещественной арифметике: ключи –ffast-math, -Ofast
  - ICC автоматически использует библиотеку векторизованных операций SVML

Автоматическая векторизация программ компилятором

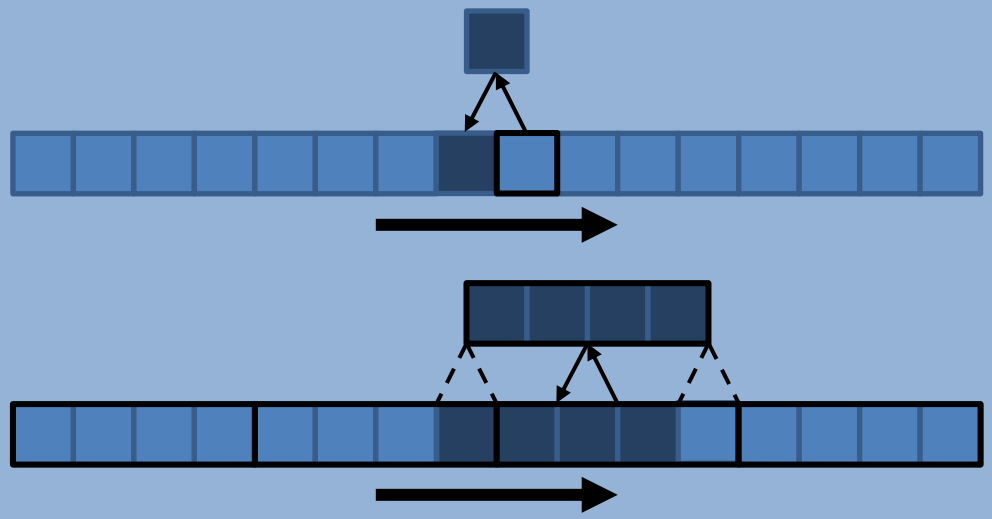
- Пример 3: функции в цикле
  - Нет векторных аналогов в GCC: sin(x)
  - Есть векторные, но не используются: sqrt(x)
  - Используются, если понизить требования к вещественной арифметике: ключи –ffast-math, -Ofast
  - ICC автоматически использует библиотеку векторизованных операций SVML
  - Пользовательские функции – векторизуются, если простые и подставленные вместо вызова (inline)

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 4: зависимости между итерациями
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i+1];

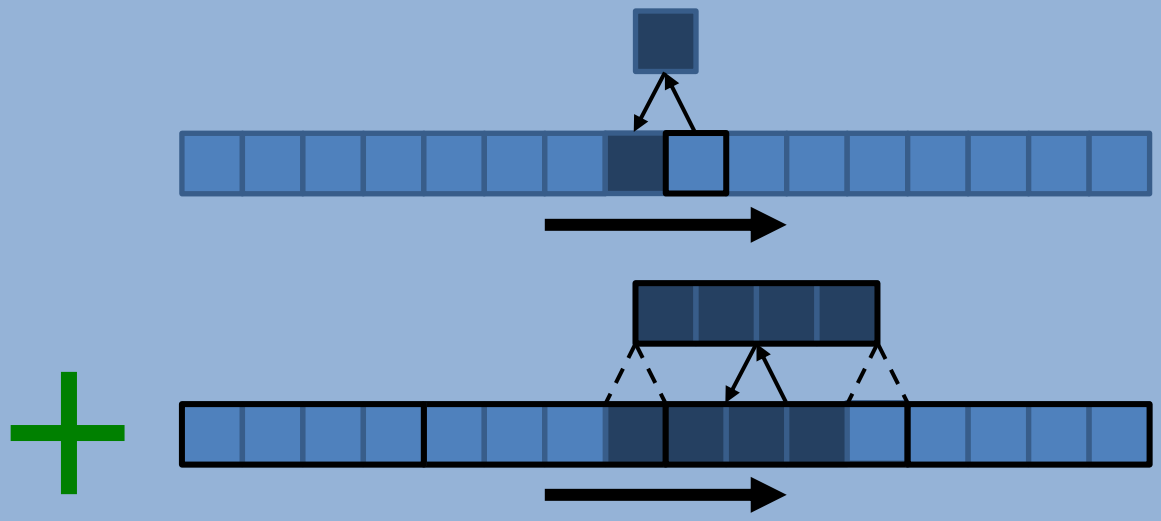
Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 4: зависимости между итерациями
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i+1];



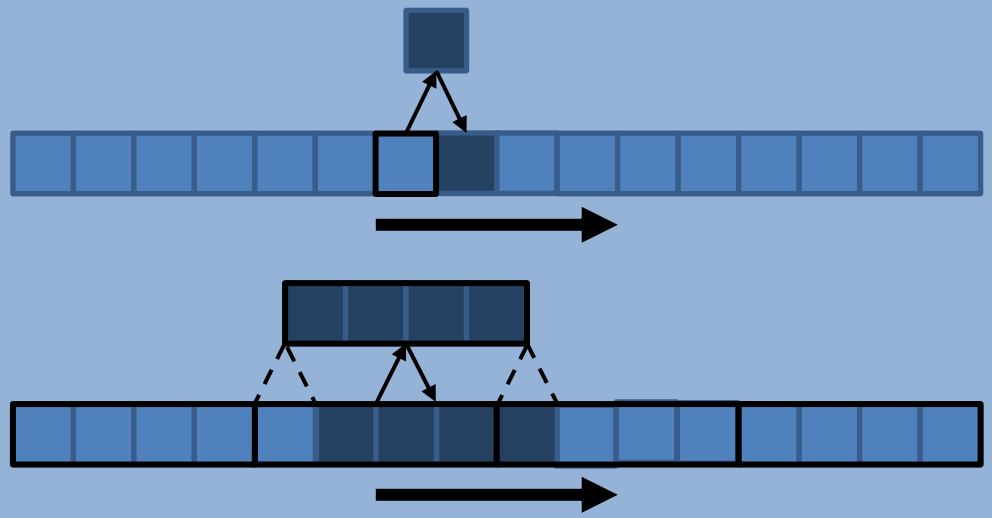
Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 4: зависимости между итерациями
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i+1]; // Нет зависимости



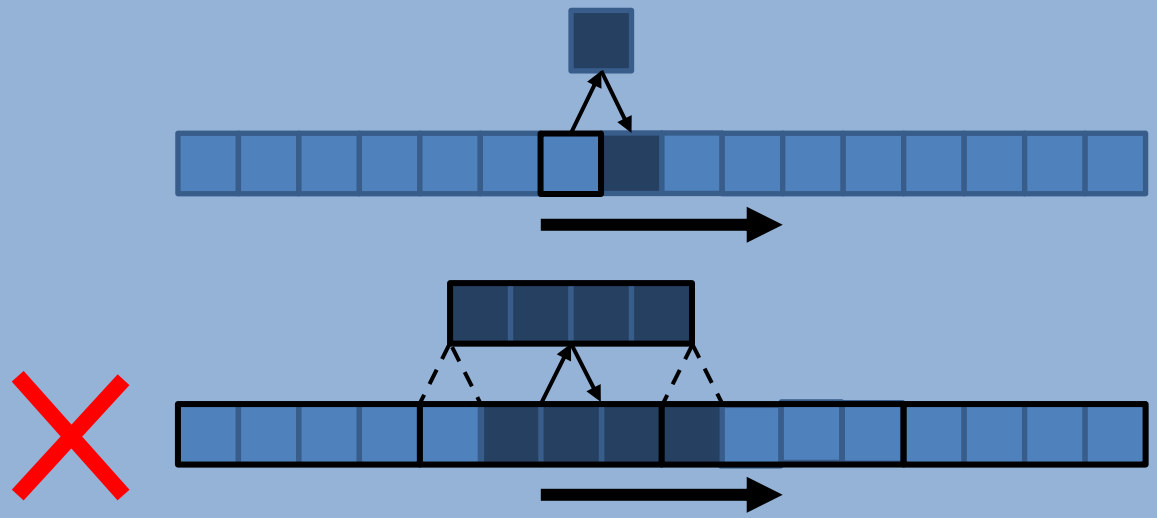
Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 4: зависимости между итерациями
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i+1]; // Нет зависимости
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-1];



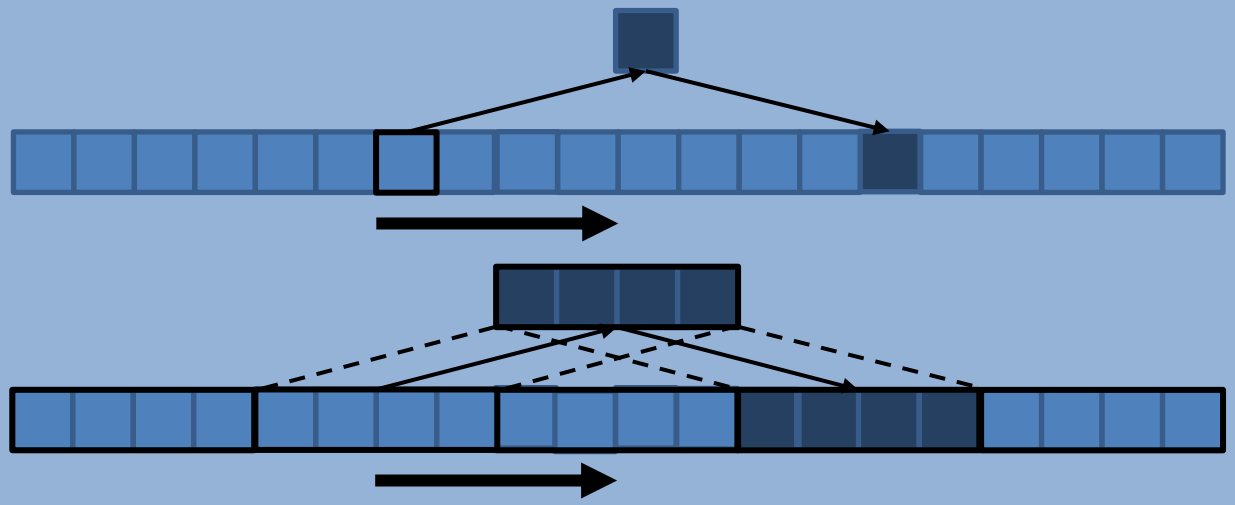
Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 4: зависимости между итерациями
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i+1]; // Нет зависимости
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-1]; // Есть зависимость



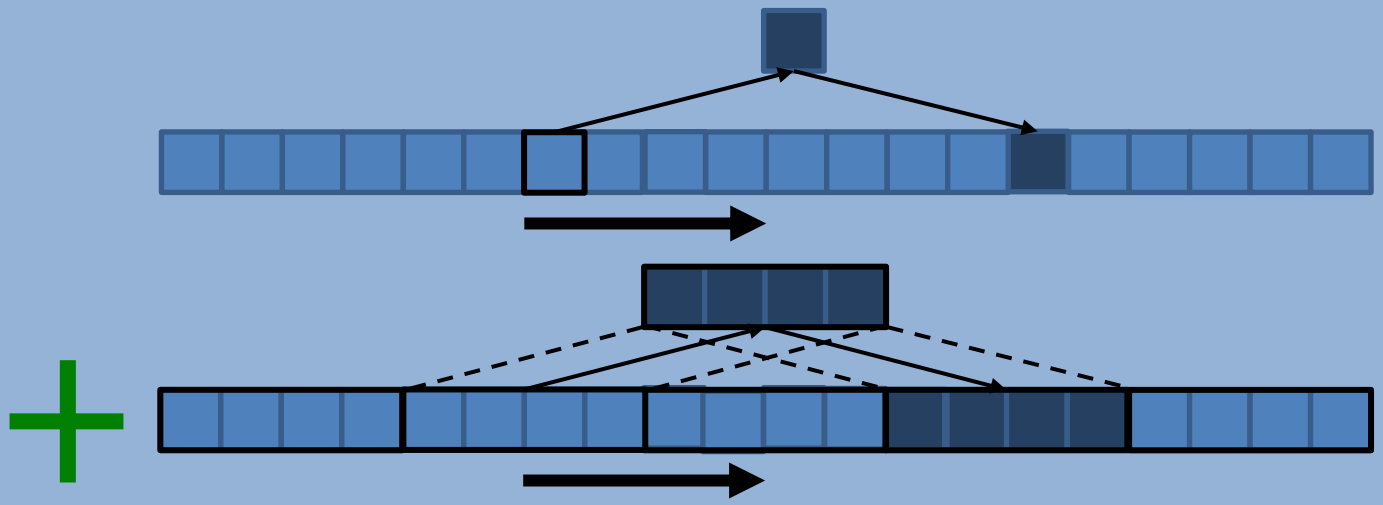
Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 4: зависимости между итерациями
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i+1]; // Нет зависимости
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-1]; // Есть зависимость
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-8];



Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 4: зависимости между итерациями
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i+1]; // Нет зависимости
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-1]; // Есть зависимость
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-8]; // Нет зависимости

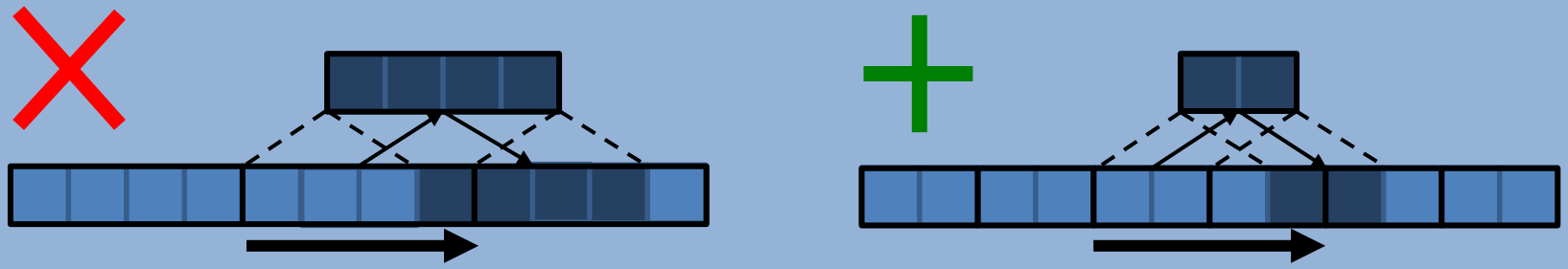


Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 4: зависимости между итерациями
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i+1]; // Нет зависимости
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-1]; // Есть зависимость
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-8]; // Нет зависимости
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-3];

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 4: зависимости между итерациями
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i+1]; // Нет зависимости
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-1]; // Есть зависимость
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-8]; // Нет зависимости
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-3]; // Зависит от длины вектора



Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 4: зависимости между итерациями
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i+1]; // Нет зависимости
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-1]; // Есть зависимость
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-8]; // Нет зависимости
  - y[i] = 2.5*x[i] + y[i-3]; // Зависит от длины вектора
  - Если у компилятора есть сомнения, то он может сделать несколько версий кода.

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 5: условие в цикле

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 5: условие в цикле
  - GCC не векторизует
  - ICC векторизует в случае простых конструкций

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 5: условие в цикле
  - GCC не векторизует
  - ICC векторизует в случае простых конструкций
- Пример 6: редукция

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Пример 5: условие в цикле
  - GCC не векторизует
  - ICC векторизует в случае простых конструкций
- Пример 6: редукция
  - GCC не распознаёт редукцию
  - ICC распознаёт редукцию

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Итого: что может ухудшить или не дать выполнить автоматическую векторизацию
  - Плохое выравнивание данных
  - Вызов функций в цикле
  - Наличие зависимостей
  - Наличие условных конструкций
  - Редукция

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Когда цикл векторизуется?
  1. Компилятор доказал отсутствие цикловых зависимостей, используя только доказанные факты о программе.
  2. Компилятор доказал отсутствие цикловых зависимостей, сделав худшие предположения там, где был недостаток доказанных фактов.
  3. Компилятор считает, что векторизация будет выгодной.

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Когда цикл векторизуется?
  1. Компилятор доказал отсутствие цикловых зависимостей, используя только доказанные факты о программе.
  2. Компилятор доказал отсутствие цикловых зависимостей, сделав худшие предположения там, где был недостаток доказанных фактов.
  3. ~~Компилятор считает, что векторизация будет выгодной.~~

Считать, что векторизация всегда выгодна:

ICC: `#pragma vector always`

GCC: ???

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Когда цикл векторизуется?
  1. Компилятор доказал отсутствие цикловых зависимостей, используя только доказанные факты о программе.
  2. ~~Компилятор доказал отсутствие цикловых зависимостей, сделав худшие предположения там, где был недостаток доказанных фактов.~~
  3. Компилятор считает, что векторизация будет выгодной.

Считать, что скрытых зависимостей нет:

ICC: `#pragma ivdep`

GCC: `#pragma GCC ivdep`

Автоматическая векторизация программ компилятором

- Когда цикл векторизуется?
  1. ~~Компилятор доказал отсутствие цикловых зависимостей, используя только доказанные факты о программе.~~
  2. ~~Компилятор доказал отсутствие цикловых зависимостей, сделав худшие предположения там, где был недостаток доказанных фактов.~~
  3. ~~Компилятор считает, что векторизация будет выгодной.~~

  Векторизовать в любом случае, даже если это испортит программу:

  ICC: `#pragma omp simd` / `#pragma simd`

  GCC: `#pragma omp simd`

План лекции

- Введение
- Обзор векторных расширений современных x86-микропроцессоров
- Проблемы векторизации
- Средства векторизации
- Автоматическая векторизация программ компилятором
- **Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0**

Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

- В стандарт OpenMP 4.0 включён набор директив по векторизации циклов
  - #pragma omp simd …
  - #pragma omp declare simd …

- OpenMP 4.0 поддерживают:
  - Intel C/C++ Compiler с версии 15.0
  - GCC с версии 4.9

Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

- Пример: Базовая директива simd
  - Есть сомнение, можно ли векторизовать:

```
for (i=1;i<N-1;i++)
  y[i] = 1.1*x[i-1] + 2.5*x[i] + 3.7*x[i+1];
```

Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

- Пример: Базовая директива simd
  - Есть сомнение, можно ли векторизовать:

```
for (i=1;i<N-1;i++)
  y[i] = 1.1*x[i-1] + 2.5*x[i] + 3.7*x[i+1];
```

  - Указание: векторизовать не смотря ни на что!

```
#pragma omp simd
for (i=1;i<N-1;i++)
  y[i] = 1.1*x[i-1] + 2.5*x[i] + 3.7*x[i+1];
```

Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

- Пример: Редукция
  - GCC автоматически не векторизует

```
s = 0.0;
for (i=1;i<N-1;i++) s += y[i] + 2.5*x[i];
```

Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

- Пример: Редукция
  - GCC автоматически не векторизует

```
s = 0.0;
for (i=1;i<N-1;i++) s += y[i] + 2.5*x[i];
```

  - Указание, как это векторизовать

```
s = 0.0;
#pragma omp simd reduction(+:s)
for (i=1;i<N-1;i++) s += y[i] + 2.5*x[i];
```

Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

- Пример: Пользовательские функции
  - Если неочевидно, как сделать векторный аналог:

```
double f(double u, double v, int k) { return 2.0*u + k*v; }
…
for (i=0;i<N;i++) y[i] = 2.5*x[i] + f(y[i], 4.0, i);
```

Полуавтоматическая векторизация с помощью OpenMP 4.0

- Пример: Пользовательские функции
  - Если неочевидно, как сделать векторный аналог:

```
double f(double u, double v, int k) { return 2.0*u + k*v; }
…
for (i=0;i<N;i++) y[i] = 2.5*x[i] + f(y[i], 4.0, i);
```

  - Указание, как сделать векторный аналог функции:

```
#pragma omp declare simd uniform(v) linear(k,1)
double f(double u, double v, int k) { return 2.0*u + k*v; }
…
#pragma omp simd
for (i=0;i<N;i++) y[i] = 2.5*x[i] + f(y[i], 4.0, i);
```


NEC
SX-9