Введение в архитектуру ЭВМ

Лекция 5. Типы данных. Плавающая точка. Команды SIMD. Переполнение. Директивы определения данных.

План лекции

- **Числа с плавающей точкой.**
- **Архитектура SIMD**
- **Аппаратные типы данных**
- **Логические типы данных**
- **Целочисленное переполнение**
- **Директивы ассемблера**
  - **Константы**
  - **Директивы определения данных**
- **Пример «Директивы определения данных и обнаружение переполнения»**

Целые числа и диапазоны их представления в ОП не подходят для многих задач, поэтому был введено представление с *«плавающей точкой»*, соответствующее записи числа вида:

$$Q = m \cdot e^{p},$$

где m — мантисса, e — основание, p — порядок.

Эта запись берет начало от широко распространенной т. н. научной или экспоненциальной записи. Пример — фундаментальная физическая константа число Авогадро $N_A = 6.0214076 \cdot 10^{23}$ моль-1.

Форматы чисел с плавающей точкой определены стандартами IEEE 754-1985, IEEE 754-2008 и IEEE 754-2019, которые

определяют набор базовых двоичных и десятичных форматов закодированных в 32, 64, 128 и других битовых представлениях.

Базовые двоичные форматы определяются формулой:

$$Q = (-1)^{s} \cdot 2^{(p-127)} \cdot (1+m/2^{23})$$

элементы которой в 32 битовом представлении распределены по битам как показано на рисунке.

Номера битов

31	30 - 23	22 - 0
s	p	m

Где s - бит знака числа — 0 — положительное, 1— отрицательное.

Примерный диапазон значений — от $1.2 \cdot 10^{-38}$ до $3.4 \cdot 10^{+38}$.

Числа с плавающей точкой являются моделью (неточной) множества действительных чисел, для работы с ними есть набор команд, реализуемый математическим сопроцессором (FPU - Floating Point Unit).

В работе И.С. Григорьев Числа с плавающей точкой, М., МГУ им. М. В. Ломоносова, 2024, [Электронный ресурс]

URL: http://mech.math.msu.su/~iliagri/sem2book.htm (13.07.2024) представлены особенности и приемы работы с этими числами.

Автор отмечает: «Вычисления с плавающей точкой и реализация вычислительных алгоритмов представляет собой важный и сложный раздел программирования; идеологически он принципиально отличается от обычного целочисленного программирования. Главная его особенность состоит в том, что вычисления с плавающей точкой

производятся не точно, вычислительная ошибка накапливается.»

Архитектура SIMD

В современных процессорах реализованы дополнительные наборы команд поддерживающие архитектуру SIMD (Single Instruction, Multiple Data — одиночный поток команд, множественный поток данных). Эта архитектура обеспечивает повышение быстродействия за счет параллельной обработки нескольких элементарных данных (например слов) одной командой. Работа в SIMD осуществляется с помощью следующих расширений системы команд:

- MMX (неофициально - MultiMedia eXtension);
- SSE (Streaming SIMD Extensions), SSE2, SSE3, SSSE3 and SSE4;
- AVX, (Advanced Vector Extensions) AVX2, AVX512, AMX.

Один из авторов расширения SSE, участник разработки Pentium III, д.т.н. Владимир Мстиславович Пентковский (1946 — 2012).

Типичные области применения SIMD это обработка изображений, аудио, трехмерная графика, видео, компьютерные игры, программы компьютерного зрения, цифровая обработка сигналов. Также есть работы по внедрение SIMD в веб браузеры (Chrome не будет работать без SSE2). Отметим, что есть и другие расширения системы команд процессоров, например криптографическое — AES (Advanced Encryption Standard instruction set). Описание системы команд и ее расширений можно найти в источнике:

x86 instruction listings [Электронный ресурс]. - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/X86_instruction_listings (18.01.24)

Проверить наличие в процессоре команд расширений можно в ОС Linux с помощью утилиты cpuid, в ОС Windows с помощью утилиты CPU-Z.

Пример вывода cpuid.

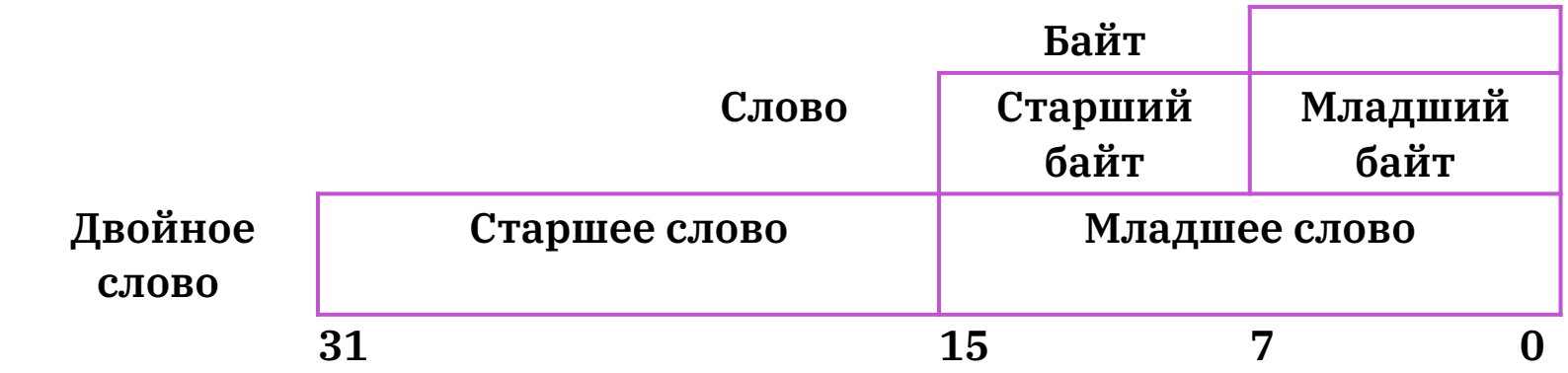
```
CPU 0:
   vendor_id = "GenuineIntel"
   version information (1/eax):
      processor type  = primary processor (0)
      family          = Intel Pentium Pro/II/III/Celeron/Core/Core 2/Atom,
AMD Athlon/Duron, Cyrix M2, VIA C3 (6)
      model           = 0xa (10)
      stepping id     = 0x7 (7)
      extended family = 0x0 (0)
      extended model  = 0x2 (2)
      (simple synth)  = Intel Core i3-2000 / Core i5-2000 / Core i7-2000 /
Mobile Core i7-2000 (Sandy Bridge D2/J1/Q0) / Pentium G500/G600/G800 /
Pentium B915C (Sandy Bridge Q0) / Celeron G400/G500/700/800/B800 (Sandy
Bridge J1/Q0) / Xeon E1-1100 / E3-1200 (Sandy Bridge D2/J1/Q0), 32nm
   feature information (1/edx):
      x87 FPU on chip                        = true
      VME: virtual-8086 mode enhancement     = true
. . .
      MMX Technology                         = true
. . .
      SSE extensions                         = true
      SSE2 extensions                        = true
   feature information (1/ecx):
      PNI/SSE3: Prescott New Instructions     = true
. . .
      SSSE3 extensions                        = true
. . .
      SSE4.1 extensions                       = true
      SSE4.2 extensions                       = true
. . .
      AES instruction                         = true

      AVX: advanced vector extensions         = true
. . .
      RDRAND instruction                      = false
. . .
   Thermal and Power Management Features (6):
      digital thermometer                     = true
   extended feature flags (7):
. . .
```

```
      AVX2: advanced vector extensions 2       = false
. . .
      AVX512PF: prefetch instructions          = false
      AVX512ER: exponent & reciprocal instrs   = false
      AVX512CD: conflict detection instrs      = false
. . .
      AVX512BW: byte & word instructions       = false
      AVX512VL: vector length                  = false
. . .
      AVX512VBMI: vector byte manipulation     = false
. . .
      AVX512_VBMI2                             = false
 . . .
      AVX512_VNNI                              = false
      AVX512_BITALG: bit count/shiffle         = false
      AVX512: VPOPCNTDQ instruction            = false
. . .
      AVX512_4VNNIW: neural network instrs     = false
      AVX512_4FMAPS: multiply acc single prec  = false
CPU 1:
```

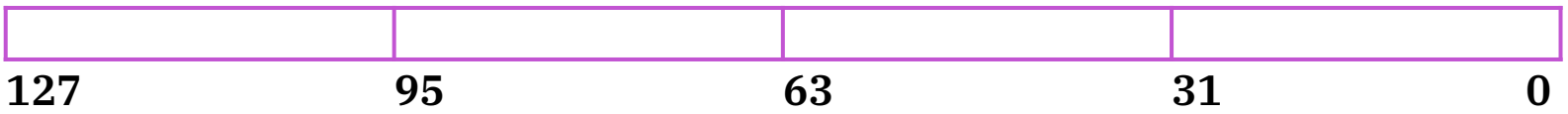
Аппаратные типы данных

Это представленные на рисунке единицы ОП к которым можно получить доступ при выполнении одной команды.



(в архитектуре Intel®64 есть и четверное 64 битное слово).

128-битный упакованный тип данных с плавающей точкой одинарной точности для SSE.



Адреса этих единиц доступа могут быть определены с помощью символических имен (прежде всего меток), которые затем можно

использовать в качестве операндов команд.

Говорят, что по отношению к ОП команда

```
mov{b|w|l} операнд1, операнд2
```

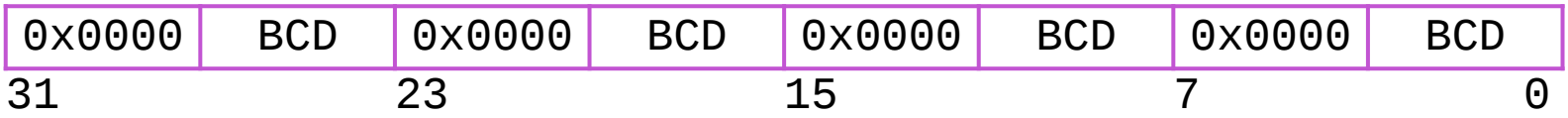
выполняет операцию ЧТЕНИЯ: ОП ⇨ ЦП, если операнд1 находится в ОП, а операнд2 в регистре ЦП и ЗАПИСИ: ЦП ⇨ ОП если операнд 1 находится в регистре ЦП а операнд2 в ОП. При чтении значение операнд1 не изменяется, при записи значение операнд2 заменяется на значение операнд1.

Упакованный тип данных предназначен для использования командами SIMD, в нем хранятся четыре 32 битовых слова в плавающей точкой.

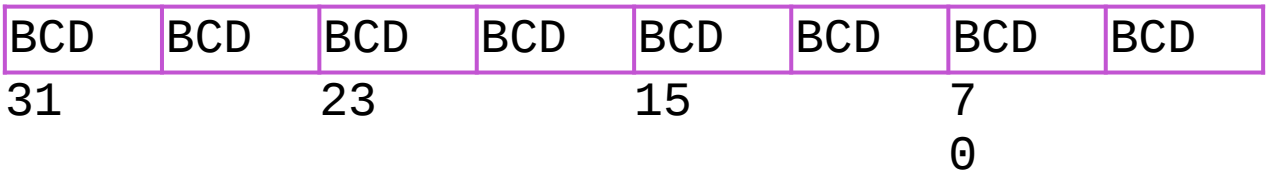
Логические типы данных

- Целые знаковые и беззнаковые числа в байте, слове, двойном и четверном словах рассмотрены в предыдущих лекциях.
- Байтовые строка — последовательность байтов произвольной длины, используется для хранения кодов символов — есть их примеры в текстах задач task3 и 2to10.
- Битовое поле — специальный тип для битовых операций.
- Упакованные и неупакованные BCD данные.
- Адрес — 32 байта.
- Данные математического сопроцессора.
- Данные MMX, SSE и других расширений системы команд.

Неупакованные BCD числа.



Упакованные BCD числа.



Упакованный и неупакованный двоично-десятичные BCD (Binary Coded Decimal) типы были введены для выполнения арифметических операций непосредственно в десятичной системе счисления без перевода из двоичной. Десятичная цифра кодируется в четырех битах (полубайте, nibble), значения полубайта от 0xA до 0xF не используются

BCD представления легко получить из кодов ASCII цифр, где для символов цифр 0-9 зафиксированы коды 0x30h -0x39h и их правый полубайт есть BCD код соответствующей цифры.

Для арифметических BCD-операций используются те же команды, что и для целых двоичных, но с применением до или после них специальных команд коррекции операндов или результатов.

Математические сопроцессоры имеют полный набор команд, позволяющих обрабатывать BCD числа.

Целочисленное переполнение

Определение.

Событие целочисленное переполнение возникает после выполнения арифметической операции если ее результат требует для записи в устройство хранения чисел больше разрядов, чем реализовано в этом устройстве.

Примеры.

1. Для двухразрядного десятичного калькулятора операция `+35 + 78 = 113` **приводит к переполнению через верхнюю границу, а** `-45 – 63 = - 108` **— через нижнюю.**

2. Операция сложения байтов, интерпретируемых как беззнаковые целые:

```
   1100 1111 = 0xCF
      +
   1111 1100 = 0xFC
   ----------------
  11100 1011= 0x1CB
```

приводит к переполнению через верхнюю границу.

Естественно, что арифметические операции над знаковыми целыми также могут инициировать событие переполнения.

Наступление переполнения процессор фиксирует в регистре флагов.

NBNB. При переполнении результата операции над беззнаковыми целыми получает значение `1` **флаг переноса** `CF (carry flag)` **— над знаковыми — флаг переполнения** `OF (overflow flag)`**. Проверка факта переполнения выполняется командами коротких условных переходов jcc.**

Флаг `CF` **расположен в бите регистра флагов с номером** `0` **— флаг**

OF — в бите с номером 11, как показано на рисунке.

OF	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	CF
11			8	7			4	3			0

Здесь представлены три младших полубайта регистра флагов, X — не интересующие нас биты. Легко видеть, что при беззнаковом переполнении значение правого полубайта будет нечетным, а при знаковом — значение левого полубайта будет больше или равно 0x8

Для проверки наступления переполнения после операций над беззнаковыми целыми нужно выполнить команду jc. Переход по адресу ее операнда выполнится если произошло переполнение. Переход по адресу операнда команды jnc выполнится, если переполнение не произошло.

Для проверки наступления переполнения после операций над знаковыми целыми нужно выполнить команду jo. Переход по адресу ее операнда выполнится если произошло переполнение. Переход по адресу операнда команды jno выполнится, если переполнение не произошло.

Директивы ассемблера

Директивы предназначены для управления ассемблированием и размещения в исходном файле различной информации, например о выделении необходимой памяти, определения и размещения в объектном файле данных и их значений, описания секций, внешних имен и др. См. список директив по адресу:

https://kappa.cs.petrsu.ru/~chistyak/architecture/docs/gas/gas-7.html

Формат директивы:

```
.<имя директивы> пробел/таб <список параметров>
```

NB. Параметры могут задаваться выражениями, в том числе адресными, т. е. адресное значение символьного имени, полученное при ассемблировании можно разместить как данное в секции данных. Имя директивы всегда начинается с символа точка.

Константы

Константы используются в командах, выражениях и как параметры директив.

Числовые целые константы в системе счисления с основанием:

- `10` — **не начинаются с цифры** `0`**, не содержат 16-ых цифр;**
- `8` — **начинаются с цифры** `0`**;**
- `16` — **начинаются с символов** `0x` **или** `0X`**;**
- `2` — **начинаются с символов** `0b` **или** `0B`**.**

Строковые константы это символы, находящиеся между символами "двойная кавычка".

См. детали по адресу:

https://kappa.cs.petrsu.ru/~chistyak/architecture/docs/gas/gas-3.html#ss3.6

Пример «Директивы определения данных и обнаружения переполнения»

```
GAS LISTING d-t-over.S                  page 1


   1                    #    Демонстрация директив определения данных.
```

```
 2              #    Переполнения для знакового и беззнакового сложения
 3
 4              #    Ассемблирование и редактирование связей - команда m
 5
 6                  .include "my-macro" # подключение файла с
                                        # макроопределениями
 1              // Макроопределение завершения работы
 2
 3              .macro Finish
 4                       movl $0, %ebx # first argument: exit code
 5                       movl $1, %eax # sys_exit index
 6                       int $0x80 # kernel interrupt
 7              .endm
 8
 7
 8              .data # секция данных, распределение памяти
 9
10              #                        Система счисления операнда
11
12 0000 41           Diff_bases: .byte  65   # 10
13 0001 41                       .byte  0101  # 8
14 0002 21                       .byte  041   # 8
15 0003 41                       .byte  0x41  # 16
16 0004 41                       .byte  0X41  # 16
17
18              #                   8      16     10
19 0005 E5040000                 .long  02345, 0x4E5, 1253
19      E5040000
19      E5040000
20
21              #                        Выражения в директивах
22
23              Arifm_Expression:
24
25 0011 4141                      .byte 35+30, 20+45
26 0013 4141                      .byte 70-5, 80-15
27
28 0015 61626320     Str:    .ascii  "abc ABC 123"
28      41424320
28      313233
29 0020 D094D0B2     Str1:   .ascii  "Две капли сверкнут, сверкнут"
29      D0B520D0
29      BAD0B0D0
29      BFD0BBD0
29      B820D181
29      D0B2D0B5
29      D180D0BA
29      D0BDD183
29      D1822C20
29      D181D0B2
29      D0B5D180
29      D0BAD0BD
29      D183D182
30 0054 D0BDD0B0     Str2:   .asciz  "на дне!"
30      20D0B4D0
30      BDD0B521
30      00
```

```
 31
 32 0061 FF          B1:      .byte   255
 33 0062 F0          B2:      .byte   240
 34 0063 FF          Bm1:         .byte   -1
 35 0064 01          Bp1:         .byte   +1
 36 0065 80          B_zn_min:    .byte   -128
 37 0066 7F          B_zn_max:.byte   +127
 38 0067 0F101F20    BBB:     .byte   15,16,31,32,63,64
 38      3F40
 39 006d FF00        S1:      .short  255
 40 006f F000        S2:      .short  240
 41 0071 FFFF        W_bzn_max:   .short  65535
 42 0073 0080        W_zn_min:        .short  -32768
 43 0075 FF7F        W_zn_max:        .short  +32767
 44 0077 0F001000    SSS:     .short  15,16,31,32,63,64
 44      1F002000
 44      3F004000
 45 0083 FFFFFFFF    L1:      .long   4294967295
 46 0087 FFFFFFFF    Il:      .int    4294967295
 47 008b 00000080    I1:      .int    -2147483648
 48 008f FFFFFF7F    I2:      .int    +2147483647
 49 0093 00000080    Q:       .quad   -2147483648
 49      FFFFFFFF
 50
 51                      .text # секция команд
 52
 53              .global _start # точка входа
 54
 55 0000 66A16D00    _start:         movw    S1, %ax # слово 255
 55      0000
 56 0006 6603056F                    addw    S2, %ax # + слово 240 = 495
 56      000000
 57                                          # НЕТ переполнения
 58
 59 000d 29C0                        sub     %eax,%eax
 60 000f A0610000                    movb    B1, %al # байт 255
 60      00
 61 0014 02056200                    addb    B2, %al # + 240
 61      0000
 62 001a 7202                        jc      UnsignedOverflowb
 63 001c 90                          nop
 64 001d 90                          nop
 65
 66              UnsignedOverflowb:
 67 001e 29C0                        sub     %eax,%eax
 68 0020 66A17100                    movw    W_bzn_max,%ax    # max
                                                 #беззнак слово
 68      0000
 69 0026 6683C001                    addw    $1,%ax       # +1 к нему
 70 002a 7202                        jc      UnsignedOverflow_w
 71 002c 90                          nop
 72 002d 90                          nop
 73
 74              UnsignedOverflow_w:
```

```
  75 002e 29C0                      sub     %eax,%eax
  76 0030 66A17500                  movw    W_zn_max, %ax    # max
знаковое                                            #слово
  76      0000
  77 0036 6683C001                  addw    $1, %ax      # +1 к нему
GAS LISTING d-t-over.S                page 3


  78 003a 7002                      jo      SignedOverflow
  79 003c 90                        nop
  80 003d 90                        nop
  81              SignedOverflow:
  82 003e 29C0                      sub     %eax, %eax
  83 0040 66A17300                  movw    W_zn_min, %ax    # min
знаковое                                            #слово
  83      0000
  84 0046 6683E801                  subw    $1, %ax      # -1 от него
  85 004a 7002                      jo      SignOver
  86 004c 90                        nop
  87 004d 90                        nop
  88              SignOver:
  89
  90                              Finish # конец работы, возврат в ОС
(макро из файл
  90 004e BB000000      >  movl $0,%ebx
  90      00
  90 0053 B8010000      >  movl $1,%eax
  90      00
  90 0058 CD80          >  int $0x80
  91                              .end   # последняя строка исходного
текста

GAS LISTING d-t-over.S                page 4


DEFINED SYMBOLS
          d-t-over.S:12      .data:0000000000000000 Diff_bases
          d-t-over.S:23      .data:0000000000000011 Arifm_Expression
          d-t-over.S:28      .data:0000000000000015 Str
          d-t-over.S:29      .data:0000000000000020 Str1
          d-t-over.S:30      .data:0000000000000054 Str2
          d-t-over.S:32      .data:0000000000000061 B1
          d-t-over.S:33      .data:0000000000000062 B2
          d-t-over.S:34      .data:0000000000000063 Bm1
          d-t-over.S:35      .data:0000000000000064 Bp1
          d-t-over.S:36      .data:0000000000000065 B_zn_min
          d-t-over.S:37      .data:0000000000000066 B_zn_max
          d-t-over.S:38      .data:0000000000000067 BBB
          d-t-over.S:39      .data:000000000000006d S1
          d-t-over.S:40      .data:000000000000006f S2
          d-t-over.S:41      .data:0000000000000071 W_bzn_max
          d-t-over.S:42      .data:0000000000000073 W_zn_min
          d-t-over.S:43      .data:0000000000000075 W_zn_max
          d-t-over.S:44      .data:0000000000000077 SSS
          d-t-over.S:45      .data:0000000000000083 L1
          d-t-over.S:46      .data:0000000000000087 Il
          d-t-over.S:47      .data:000000000000008b I1
```

```
d-t-over.S:48     .data:000000000000008f I2
d-t-over.S:49     .data:0000000000000093 Q
d-t-over.S:55     .text:0000000000000000 _start
d-t-over.S:66     .text:000000000000001e UnsignedOverflowb
d-t-over.S:74     .text:000000000000002e UnsignedOverflow_w
d-t-over.S:81     .text:000000000000003e SignedOverflow
d-t-over.S:88     .text:000000000000004e SignOver

NO UNDEFINED SYMBOLS
```