Operating Systems

Interrupts

Me

September 12, 2016

Внешние устройства

- Допустим у вас есть сетевая карта:
  - можно передать сетевой карте набор байт для отправки;
  - сетевая карта может получать данные, процессор должен скопировать эти данные в память, обработать и "показать" пользователю;
  - пакеты могут приходить в произвольные моменты времени.
- Как узнать, что данные пришли на сетевую карту?
  - можно спросить устройство (проверить какой-нибудь бит в каком-нибудь регистре устройства);
  - такой вариант называют *polling*;
  - пока код исполняемый процессором опрашивает устройство, процессор не делает ничего полезного.

Прерывания

- Прерывания - сигнал процессору, который "прерывает" текущий исполняемый код процессора
  - сетевая карта посылает сигнал при получении данных;
  - вместо исполняемого кода вызывается специальный обработчик прерывания;
  - обработчик прерывания обслуживает устройство, и возвращает управление прерванному коду.
- Следствия:
  - не нужно тратить ресурсы процессора на бесполезный опрос устройств;
  - прерванный код может быть не готов к тому, что его прервут - задача обработчика позаботится об этом.

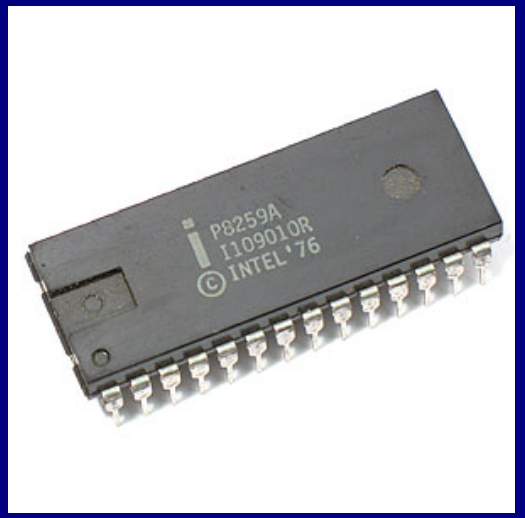
Контроллер прерываний

- А что если у нас много устройств требующих внимания процессора?
  - какое из устройств сгенерировало прерывание?
  - если сразу несколько устройств сгенерировали прерывания?
- Для разрешения этих проблем нужен посредник между устройствами и процессором
  - такого посрденика называют контроллером прерываний;
  - контроллер прерываний выполняет арбитраж.

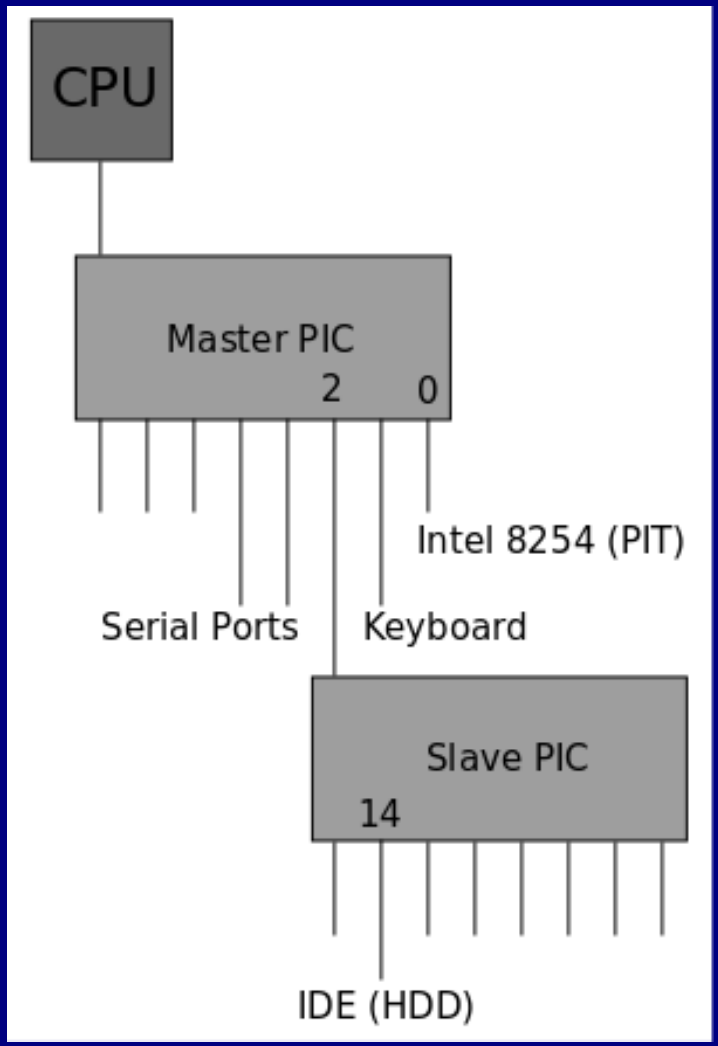
Intel 8259

Intel 8259 - *программируемый* контроллер прерываний (далее просто PIC)

- каскад из двух PIC использовался в IBM PC начиная с AT;
- сейчас он не используется, но его поведение эмулируется современными контроллерами прерываний.



Каскад intel 8259

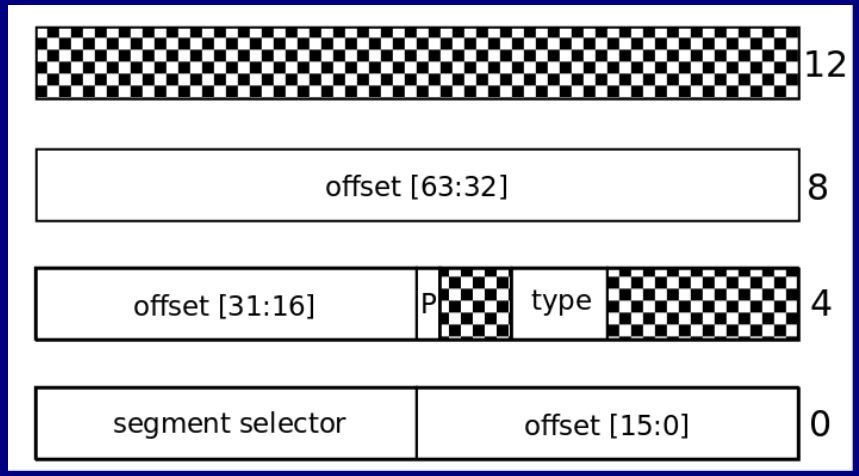


- 2 контроллера по 8 выходов - 1 выход = 15 внешних устройств;
- большинство из выходов в IBM PC заняты фиксировнными устройствами;
- вы тесно познакомитесь с PIT (programmable interval timer).

Обработка прерываний

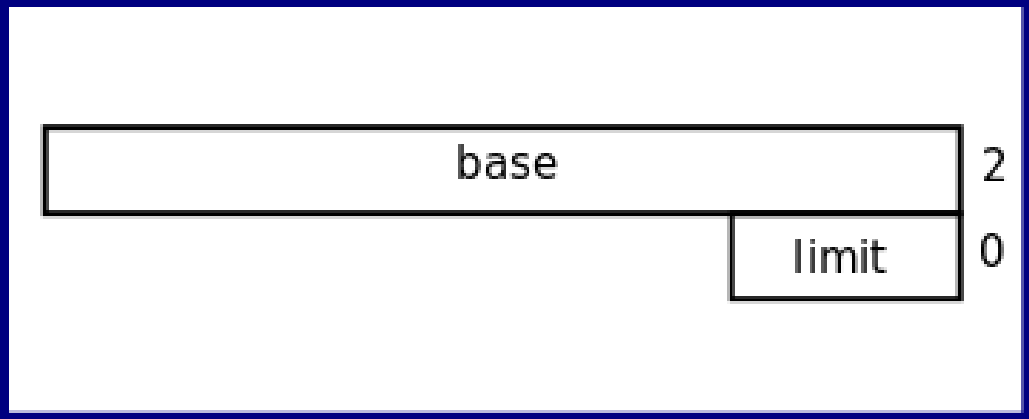
- Чтобы получать и обрабатывать прерывания необходимо:
  - запрограммировать контроллер прерываний (PIC);
  - указать процессору, где находятся обработчики прерываний;
- на x86 для указания на обработчики прерываний используется IDT
  - IDT (interrupt descriptor table) - таблица из максимум 256 дескрипторов, описывающих обработчики прерывания;
  - т. е. в x86 архитектуре можно задать не более 256 обработчиков прерываний;
  - из них первые 32 зарезервированы, т. е. остается 224 под наши нужды.

IDT



- *offset* - адрес обработчика;
- *segment selector* - селектор (регистр CS);
- *P* (Present) - должен быть равен 1;
- *type* - домашнее задание разобраться в разнице между Interrup Gate и Trap Gate;
- все остальное должно быть равно 0.

IDTR



- Информация о местоположении IDT хранится в специальном регистре (IDTR);
- загрузить значение в регистр можно с помощью специальной инструкции lidt;
  - параметром инструкции является специальный "дескриптор";
  - *base* - 64-битный адрес IDT в памяти;
  - *limit* - 16-битный размер IDT в байтах минус единица.

Программирование PIC

- Как выбирается какую запись IDT использовать при прерывании?
  - вам нужно записать в контроллер на какие записи IDT отображаются входы контроллера;
  - в случае PIC, вам нужно указать на какую запись IDT отображается самый первый вход каждого контроллера, все остальные идут по порядку.
- Кроме отображения контроллеру прерываний также нужно указать:
  - конфигурацию каскада (как Master и Slave соединены);
  - тип прерывания (edge/level);
  - и много другого не интересного.

Взаимодействие с PIC

- Для общения с PIC используются два 8-ми битных регистра: регистр команд и регистр данных;
  - в регистр команд записывается действие, которое нужно сделать;
  - затем в регистр данных записываются данные (сколько и какие именно зависит от команды).
- Для доступа к регистрам PIC-ов в x86 используется пространство ввода/вывода и специальные инструкции работы с ним:
  - инструкции называются *in* и *out*, а аргументы порт ввода/вывода и данные;
  - регистр команд Master PIC соответствует порту *0x20*, а регистр данных порту *0x21*;
  - Slave PIC использует порты *0xA0* и *0xA1*.

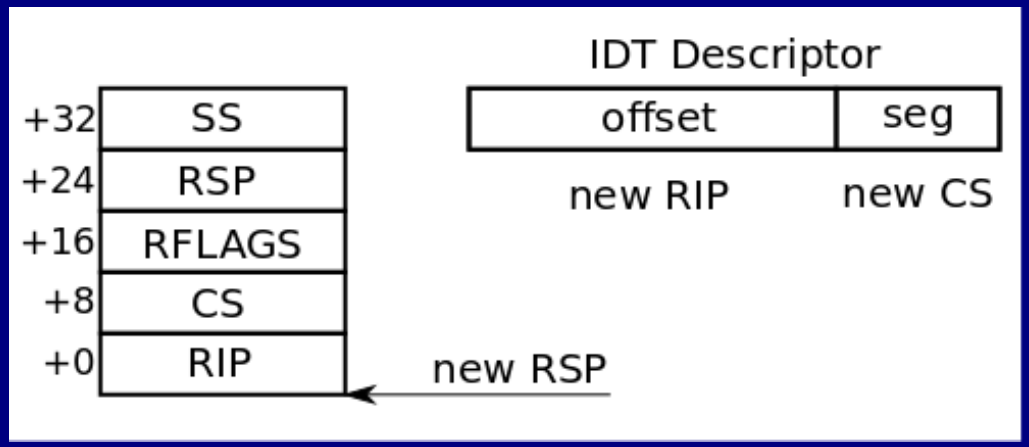
Отображение входов PIC

- Чтобы настроить отображение необходимо записать в командный регистр значение *0x11* - команда инициализации контроллера;
- команда инициализации ожидает три байта данных:
  - номер записи IDT, соответвующей самой первому входу контроллера;
  - параметры каскада:
    - для Master PIC - битовую маску входов, к котороым подключены Slave PIC-и (в нашем случае это просто *4* - 2-ой бит равен 1, остальные 0);
    - для Slave PIC - номер входа Master PIC, к которому он подключен (в нашем случае это 2);
  - прочие неинтересные параметры (в нашем случае нужно записать число *1*).

Маскировка прерываний

- Иногда полезно запретить доставку определенных прерываний (замаскировать)
  - до того как драйвер/ОС настроило устройство, прерывания от него лучше отключить;
  - т. е. пре инициализации PIC все прерывания лучше замаскировать.
- Для маскировки прерываний в случае PIC используется регистр данных:
  - запишите в регистр данных битовую маску прерываний (замаскированным соответсвуют 1-цы).
- Прерывания можно замаскировать на процессоре
  - на x86 это делается инструкцией *cli*, обратная к ней инструкция *sti*.

Вызов обработчика прерываний



- При прерывании процессор сохраняет минимум информации:
  - *CS* и *RIP* указывают какой код и с каким уровнем привелегий мы прервали;
  - *RFLAGS* - процессор может менять значение флагового регистра при вызове обработчика и сохраняет старое;
  - *SS* и *RSP* указывают на стек прерваного кода.

Обработчик прерывания

- Обработчик прерывания должен сохранить состояние прерванного кода
  - как минимум нужно сохрранить регистры общего назначения;
  - для x86: RAX, RBX, RCX, RDX, RBP, RDI, RSI, R9 - R15.
- Обработчик прерывания "должен" вернуть управдление прерванному коду;
  - в x86 для этого, *обычно*, используют инструкцию *iretq*, которая восстанавливает со стека сохраненные регистры CS, SS, RFLAGS, RIP и RSP;
  - т. е. перед исполнением *iretq* стек нужно вернуть в "исходное" состояние.

End Of Interrupt

- Обработчик прерывания должен нотифицировать контроллер прерывания о завершении обработки (послать EOI);
  - контроллер прерываний должен знать когда выдать следующий сигнал.
- Послать EOI PIC-у можно записав в регистр команд значение специального вида:
  - *0x60 + irq*, где *irq* - номер входа PIC (от 0 до 7), от которого было получено прерывание;
  - обратите внимание, т. к. PIC-и объединены в каскад, то если прерывание пришло на Slave PIC, то EOI нужно посылать сразу и Master и Slave PIC-ам.

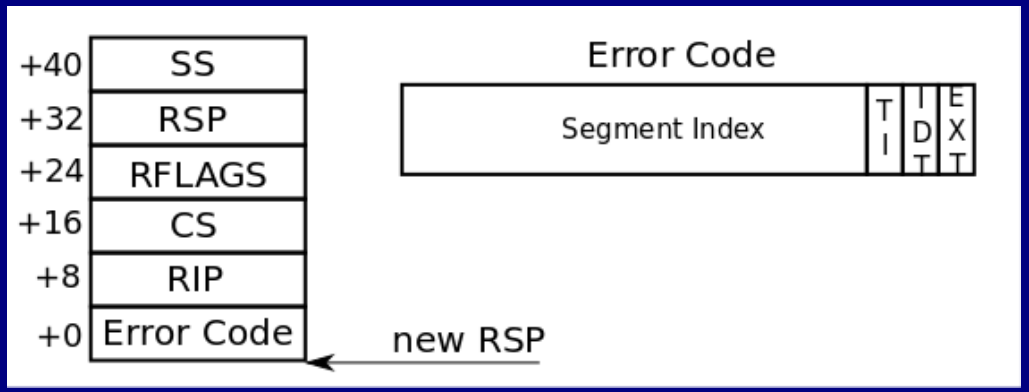
Исключения

- Во время исполнения команд процессор может обнаружить ошибку:
  - попытка исполнить некорректную инструкцию;
  - недостаточный уровень привелегий, для выполнения действия;
  - деление на 0;
  - многое другое...
- Такие ситуации называются исключительными и требуют обработки
  - x86 сообщает об исключениях в виде прерывания (одного из тех 32 зарезервированных);
  - эти прерывания не связаны с контроллерами прерываний и внешними устройствами, а являются внутренними для процессора.

Критические и некритические ошибки

- В x86 исключения делаться на три категории:
  - не критические ошибки (faults) - предполагается, что такие ошибки можно исправить и возабновить работу с инструкции приведшей к ошибке (т. е. RIP на стеке содержит адрес "плохой" инструкции);
  - ловушки (traps) - позволяют, условно, отслеживать выполнение некоторых инструкций, после обработки исключение управление передается следующей инструкции;
  - критические ошибки (aborts) - с такой ошибкой мало что можно сделать, остается только сообщить о ней и "упасть".

Особенности обработки исключений в x86



- Для некоторых исключений стек содержит код:
  - №8 Double Fault Exception - *Error Code* всегда равен 0;
  - №10 Invalid TSS Exception;
  - №11 Segment Not Present;
  - №12 Stack Fault Exception;
  - №13 General Protection Exception;
  - №14 Page-Fault Exception - *Error Code* имеет свой формат;
  - №17 Alignment Check Exception - *Error Code* 0 или 1.

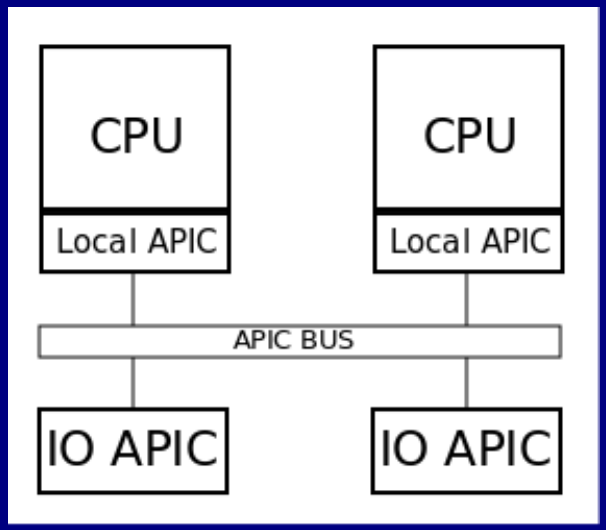
Программные исключения

- Кроме аппаратных прерываний и исключений, есть еще и программные прерывания:
  - такие прерывания генерируются специальной инструкцией (для x86 это *int*, т. е. по сути это trap);
  - под такие прерывания можно отвести любые незанятые дескрипторы IDT;
  - так же как и исключения, программные прерывания не связаны с контроллером прерываний;
- Зачем генерировать исключения программно?
  - для вызова привелигерованного кода из непривелигированного;

Многопроцессорные системы и прерывания

- Многопроцессорные системы поднимают ряд новых вопросов:
  - какой из процессоров должен обрабатывать прерывание?
  - все ли процессоры эквивалентны для обработки прерываний?
  - как идентифицировать нужный процессор?
- На замену старым PIC-ам в многопроцессорных системах пришли APIC-и
  - APIC - Advanced Programmable Interrupt Controller;
  - например, на ваших домашних компьютерах и ноутбуках используются, почти наверняка, используются именно они;

APIC



- IO APIC - контроллер, к которому подключаются устройства;
  - каждый вход настраивается независимо;
  - сообщение можно отправить любому Local APIC-у или группе Local APIC-ов;
- Local APIC - свой у кажого CPU;
  - каждый Local APIC имеет свой идентификатор;
  - Local APIC-и могут обмениваться сообщениями друг с другом;

Message Signaled Interrupts

- С обычными прерываниями каждое устройство занимает как минимум один вход контроллера прерываний
  - несколько устройств могут использовать одну линию, но это может создавать трудности;
  - входы контроллера прерываний нужно "развести" на схеме.
- Зачем нам IO APIC и его провода?
  - пусть устройства напрямую отправляют сообщения к Local APIC;
  - реализовать устройство поддерживающее MSI тяжелее, но нет необходимости "разделять" прерывания;
  - MSI обладают меньшими задержками чем обычные прерывания.

Intel 8254

- Intel 8254 (aka PIT) - интервальный таймер, т. е. устройство генерирующее сигналы с заданной частотой;
  - обычно PIT подключен к 0 входу Master PIC;
  - у PIT есть 3 выхода, из которых к Master PIC подключен только 0-ой.
- Частота работы PIT 1193180 Гц
  - задав "коэффициент деления" можно получить меньшую частоту генерации сигналов;
  - коэффциент деления k, значит, что на выход попадает только каждый k-ый сигнал.
- PIT имеет внутренний счетчик
  - мы можем задать начальное знаение для счетчика, и он будет уменьшаться на каждый сигнал пока не дойдет до 0;
  - что произойдет дальше зависит от режима работы.

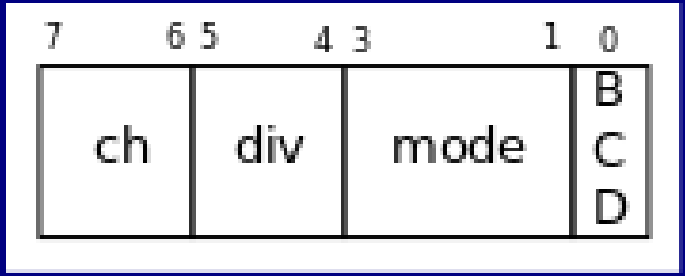
Режимы работы PIT

- One Shot (mode 0)
  - задаем начальное значение счетчика, по достижении 0 генерируется прерывание, на этом работа останавливается.
- Rate Generator (mode 2)
  - по достижении 0 генерируется прерывание, счтечик перезагружается и отсчет повторяется заново.
- Есть и другие режимы работы (но нам они не особо интересны):
  - Square Wave Generator (mode 3);
  - Softaware Triggered Strobe (mode 4);
  - и другие...

Программирование PIT

- Прогруммирование PIT осуществляется через два порта ввода/вывода:
  - Control Port *0x43* - "команда" и выбор канала (в нашем случае канал всегда 0);
  - Data Port *0x40* - данные команды (у кадого канала свой Data Port *0x40* используется для 0-ого).

Формат команды PIT



- BCD - формат представления чисел (вам точно не нужна 1 в этом бите);
- mode - режим работы;
- div - какие байты делителя вы хотите задать (делитель 16-битное число):
  - 1 - хотим записать только младший байт;
  - 2 - хотим записать только старший байт;
  - 3 - хотим записать оба байта;
- ch - канал, нам нужен 0.

Задание коэффициента деления

- Если в команде поле div не 0, то PIT будет ожидать записи коэффициента деления в Data Port;
  - если в поле div установлен только один бит, то нужно просто записать соответсвующий байт в Data Port;
  - если в поле div установлены оба бита, то сначала нужно записать младший байт, а затем старший байт.

Q&A