Прерывания от внешних устройств в системе x86. Часть 2. Опции загрузки ядра Linux

- Настройка Linux,
- Системное программирование

В предыдущей части мы рассмотрели эволюцию доставки прерываний от устройств в x86 системах (PIC → APIC → MSI), общую теорию и все необходимые термины.

В этой практической части мы рассмотрим как откатиться к использованию устаревших методов доставки прерываний в Linux, а именно рассмотрим опции загрузки ядра:

- pci=nomsi
- noapic
- nolapic

Также мы посмотрим на порядок, в котором ОС смотрит таблицы роутинга прерываний (ACPI/MPtable/$PIR) и какое влияние на него окажет добавление опций загрузки:

- pci=noacpi
- acpi=noirq
- acpi=off

Возможно вы пробовали комбинации из всех этих опций, когда какое-либо устройство не работало из-за проблемы с прерываниями. Разберём, что именно они делают и как они меняют вывод /proc/interrupts.

Загрузка без дополнительных опций

Смотреть прерывания в данной статье мы будем на кастомной плате с Intel Haswell i7 с чипсетом lynxPoint-LP на которой запущен coreboot.

Информацию о прерываниях мы будем выводить через команду

```
cat /proc/interrupts
```

Вывод при загрузке без дополнительных опций:

```
           CPU0       CPU1       CPU2       CPU3
```

```
 0:        15          0          0          0   IO-APIC-edge      timer
 1:         0          1          0          1   IO-APIC-edge      i8042
 8:         0          0          0          1   IO-APIC-edge      rtc0
 9:         0          0          0          0   IO-APIC-fasteoi   acpi
12:         0          0          0          1   IO-APIC-edge
23:        16        247          7         10   IO-APIC-fasteoi   ehci_hcd:usb1
56:         0          0          0          0   PCI-MSI-edge      aerdrv,PCIe PME
57:         0          0          0          0   PCI-MSI-edge      aerdrv,PCIe PME
58:         0          0          0          0   PCI-MSI-edge      aerdrv,PCIe PME
59:         0          0          0          0   PCI-MSI-edge      aerdrv,PCIe PME
60:         0          0          0          0   PCI-MSI-edge      aerdrv,PCIe PME
61:         0          0          0          0   PCI-MSI-edge      aerdrv,PCIe PME
62:      3118       1984        972       3454   PCI-MSI-edge      ahci
63:         1          0          0          0   PCI-MSI-edge      eth59
64:      2095         57          4        832   PCI-MSI-edge      eth59-rx-0
65:         6         18          1       1309   PCI-MSI-edge      eth59-rx-1
66:        13        512          2          1   PCI-MSI-edge      eth59-rx-2
67:        10         61        232          2   PCI-MSI-edge      eth59-rx-3
68:       169          0          0          0   PCI-MSI-edge      eth59-tx-0
```

```
 69:         14         14          4        205   PCI-MSI-edge      eth59-tx-1
 70:         11        491          3          0   PCI-MSI-edge      eth59-tx-2
 71:         20         19        134         50   PCI-MSI-edge      eth59-tx-3
 72:          0          0          0          0   PCI-MSI-edge      eth58
 73:          2          1          0        152   PCI-MSI-edge      eth58-rx-0
 74:          3        150          2          0   PCI-MSI-edge      eth58-rx-1
 75:          2         34        117          2   PCI-MSI-edge      eth58-rx-2
 76:        153          0          2          0   PCI-MSI-edge      eth58-rx-3
 77:          4          0          2        149   PCI-MSI-edge      eth58-tx-0
 78:          4        149          2          0   PCI-MSI-edge      eth58-tx-1
 79:          4          0        117         34   PCI-MSI-edge      eth58-tx-2
 80:        153          0          2          0   PCI-MSI-edge      eth58-tx-3
 81:         66        106          2        101   PCI-MSI-edge      snd_hda_intel
 82:        928       5657        262        224   PCI-MSI-edge      i915
 83:        545         56         32         15   PCI-MSI-edge      snd_hda_intel
NMI:          0          0          0          0   Non-maskable interrupts
LOC:       4193       3644       3326       3499   Local timer interrupts
SPU:          0          0          0          0   Spurious interrupts
PMI:          0          0          0          0   Performance monitoring interrupts
```

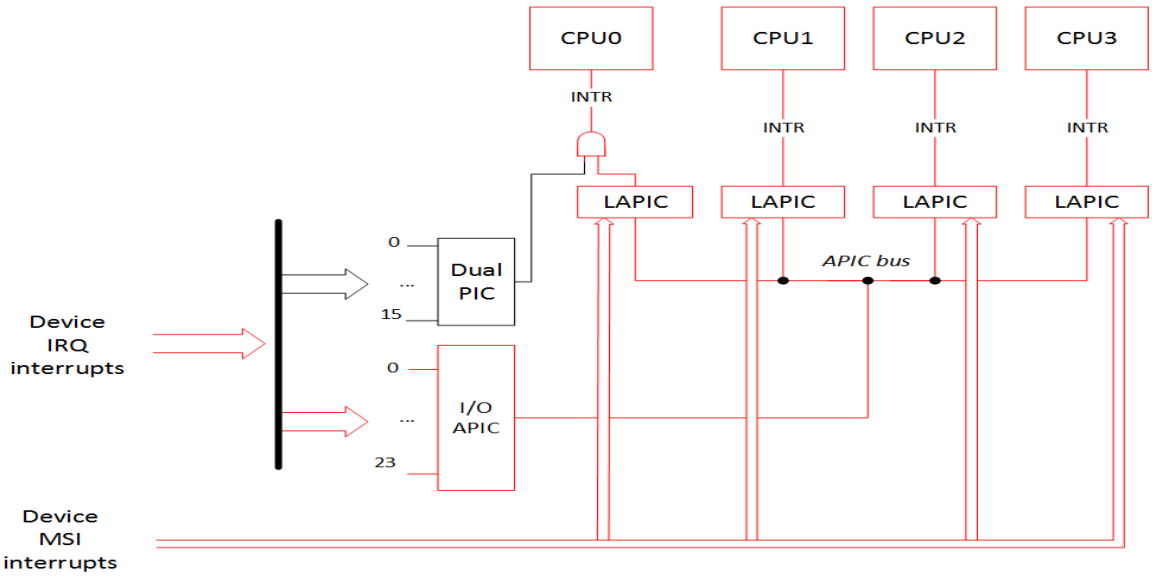
```
IWI:        290        233        590        111   IRQ work interrupts
RTR:          3          0          0          0   APIC ICR read retries
RES:       1339       2163       2404       1946   Rescheduling interrupts
CAL:        607        537        475        559   Function call interrupts
TLB:        163        202        164        251   TLB shootdowns
TRM:         48         48         48         48   Thermal event interrupts
THR:          0          0          0          0   Threshold APIC interrupts
MCE:          0          0          0          0   Machine check exceptions
MCP:          3          3          3          3   Machine check polls
ERR:          0
MIS:          0
```

Файл /proc/interrupts предоставляет таблицу о количестве прерываний на каждом из процессоров в следующем виде:

- Первая колонка: номер прерывания
- Колонки CPUx: счётчики прерываний на каждом из процессоров
- Следующая колонка: вид прерывания:
  - IO-APIC-edge — прерывание по фронту на контроллер I/O APIC
  - IO-APIC-fasteoi — прерывание по уровню на контроллер I/O APIC
  - PCI-MSI-edge — MSI прерывание
  - XT-PIC-XT-PIC — прерывание на PIC контроллер (увидим позже)
- Последняя колонка: устройство, ассоциированное с данным прерыванием

Так вот, как и положено в современной системе, для устройств и драйверов, поддерживающих прерывания MSI/MSI-X, используются именно они. Остальные прерывания роутятся через I/O APIC.

Упрощённо схему роутинга прерываний можно нарисовать так (красным помечены активные пути, чёрным неиспользуемые).



Поддержка MSI/MSI-X устройством должна быть обозначена как соответствующая Capability в его конфигурационном пространстве PCI.

В подтверждении приведём небольшой фрагмент вывода lspci для устройств, для которых обозначено, что они используют MSI/MSI-X. В нашем случае это SATA контроллер (прерывание ahci), 2 ethernet контроллера (прерывания eth58* и eth59*), графический контроллер (i915) и 2 контроллера HD Audio (snd_hda_intel).

```
lspci -v
```

```
00:02.0 VGA compatible controller: Intel Corporation Haswell-ULT Integrated Graphics Contro
ller (rev 09) (prog-if 00 [VGA controller])
        ...
        Capabilities: [90] MSI: Enable+ Count=1/1 Maskable- 64bit-
        Capabilities: [d0] Power Management version 2
        Capabilities: [a4] PCI Advanced Features
        Kernel driver in use: i915

00:03.0 Audio device: Intel Corporation Haswell-ULT HD Audio Controller (rev 09
        ...
        Capabilities: [60] MSI: Enable+ Count=1/1 Maskable- 64bit-
        Capabilities: [70] Express Root Complex Integrated Endpoint, MSI 00
```

```
        Kernel driver in use: snd_hda_intel
```

```
00:1b.0 Audio device: Intel Corporation 8 Series HD Audio Controller (rev 04)
```

```
        ...
        Capabilities: [60] MSI: Enable+ Count=1/1 Maskable- 64bit+
        Capabilities: [70] Express Root Complex Integrated Endpoint, MSI 00
        Capabilities: [100] Virtual Channel
        Kernel driver in use: snd_hda_intel
```

```
00:1f.2 SATA controller: Intel Corporation 8 Series SATA Controller 1 [AHCI mode] (rev 04)
```

```
(prog-if 01 [AHCI 1.0])
        ...
        Capabilities: [80] MSI: Enable+ Count=1/1 Maskable- 64bit-
        Capabilities: [70] Power Management version 3
        Capabilities: [a8] SATA HBA v1.0
        Kernel driver in use: ahci
```

```
05:00.0 Ethernet controller: Intel Corporation I350 Gigabit Network Connection (rev 01)
```

```
        ...
        Capabilities: [50] MSI: Enable- Count=1/1 Maskable+ 64bit+
        Capabilities: [70] MSI-X: Enable+ Count=10 Masked-
        Capabilities: [a0] Express Endpoint, MSI 00
        Kernel driver in use: igb
```

```
05:00.1 Ethernet controller: Intel Corporation I350 Gigabit Network Connection (rev 01)
```

```
        ...
        Capabilities: [50] MSI: Enable- Count=1/1 Maskable+ 64bit+
        Capabilities: [70] MSI-X: Enable+ Count=10 Masked-
        Capabilities: [a0] Express Endpoint, MSI 00
```

```
        Kernel driver in use: igb
```

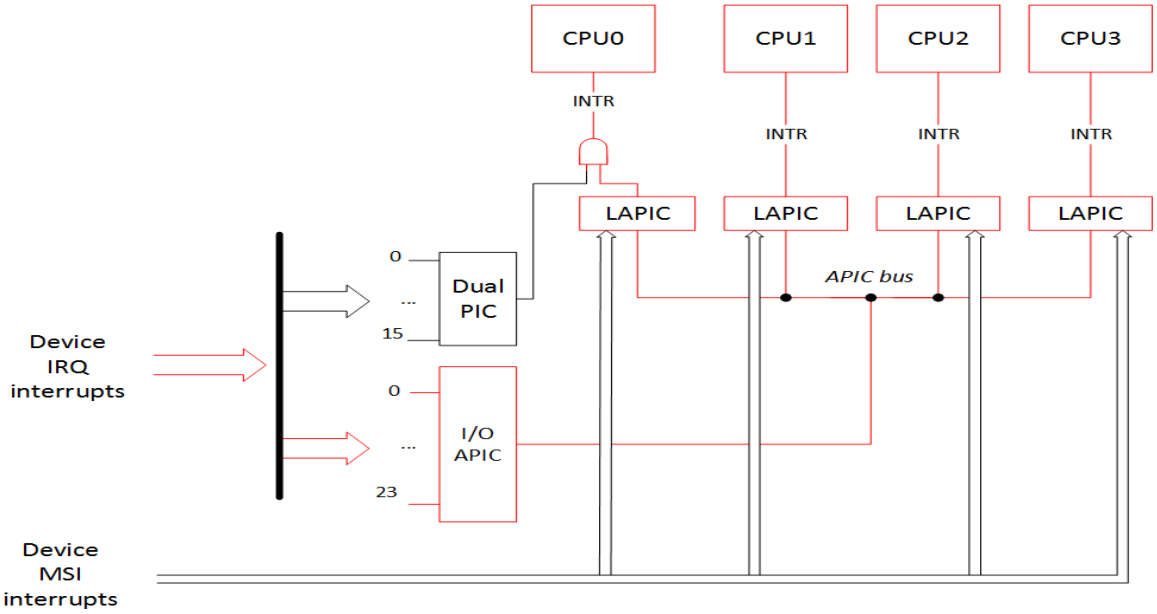
Как мы видим, у этих устройств присутствует строка либо «MSI: Enable+», либо «MSI-X: Enable+»

Начнём деградировать систему. Для начала загрузимся с опцией pci=nomsi.

pci=nomsi

Благодаря этой опции MSI прерывания станут IO-APIC/XT-PIC в зависимости от используемого контроллера прерываний

В данном случае у нас всё ещё приоритетный контроллер прерываний APIC, так что картина будет такая:



Вывод /proc/interrupts:

```
           CPU0       CPU1       CPU2       CPU3
  0:         15          0          0          0   IO-APIC-edge      timer
  1:          0          1          0          1   IO-APIC-edge      i8042
  8:          0          0          1          0   IO-APIC-edge      rtc0
  9:          0          0          0          0   IO-APIC-fasteoi   acpi
```

```
 12:          0          0          0          1   IO-APIC-edge
 16:       1314       5625        342        555   IO-APIC-fasteoi   i915, snd_hda_intel, e
th59
 17:          5          0          1         34   IO-APIC-fasteoi   eth58
 21:       2882       2558        963       2088   IO-APIC-fasteoi   ahci
 22:         26         81          2        170   IO-APIC-fasteoi   snd_hda_intel
 23:         23        369          8          8   IO-APIC-fasteoi   ehci_hcd:usb1
NMI:          0          0          0          0   Non-maskable interrupts
LOC:       3011       3331       2435       2617   Local timer interrupts
SPU:          0          0          0          0   Spurious interrupts
PMI:          0          0          0          0   Performance monitoring interrupts
IWI:        197        228        544         85   IRQ work interrupts
RTR:          3          0          0          0   APIC ICR read retries
RES:       1708       2349       1821       1569   Rescheduling interrupts
CAL:        520        554        509        555   Function call interrupts
TLB:        187        181        205        179   TLB shootdowns
TRM:        102        102        102        102   Thermal event interrupts
THR:          0          0          0          0   Threshold APIC interrupts
MCE:          0          0          0          0   Machine check exceptions
```

```
MCP:          2          2          2          2   Machine check polls
```

```
ERR:          0
```

```
MIS:          0
```

Все прерывания MSI/MSI-X ожидаемо исчезли. Вместо них устройства теперь используют прерывания вида IO-APIC-fasteoi.

Обратим внимание на то, что раньше до включения этой опции у eth58 и eth59 было по 9 прерываний! А сейчас только по одному. Ведь как мы помним, без MSI одной функции PCI доступно только одно прерывание!

Немного информации из dmesg по инициализации ethernet контроллеров:

— загрузка без опции pci=nomsi:

```
igb: Intel(R) Gigabit Ethernet Network Driver - version 5.0.5-k
```

```
igb: Copyright (c) 2007-2013 Intel Corporation.
```

```
acpi:acpi_pci_irq_enable: igb 0000:05:00.0: PCI INT A -> GSI 16 (level, low) -> IRQ 16
```

```
igb 0000:05:00.0: irq 63 for MSI/MSI-X
```

```
igb 0000:05:00.0: irq 64 for MSI/MSI-X
```

```
igb 0000:05:00.0: irq 65 for MSI/MSI-X
```

```
igb 0000:05:00.0: irq 66 for MSI/MSI-X
```

```
igb 0000:05:00.0: irq 67 for MSI/MSI-X
```

```
igb 0000:05:00.0: irq 68 for MSI/MSI-X
```

```
igb 0000:05:00.0: irq 69 for MSI/MSI-X
```

```
igb 0000:05:00.0: irq 70 for MSI/MSI-X
```

```
igb 0000:05:00.0: irq 71 for MSI/MSI-X
```

```
igb 0000:05:00.0: irq 63 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.0: irq 64 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.0: irq 65 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.0: irq 66 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.0: irq 67 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.0: irq 68 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.0: irq 69 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.0: irq 70 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.0: irq 71 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.0: added PHC on eth0
igb 0000:05:00.0: Intel(R) Gigabit Ethernet Network Connection
igb 0000:05:00.0: eth0: (PCIe:5.0Gb/s:Width x1) 00:15:d5:03:00:2a
igb 0000:05:00.0: eth0: PBA No: 106300-000
igb 0000:05:00.0: Using MSI-X interrupts. 4 rx queue(s), 4 tx queue(s)
acpi:acpi_pci_irq_enable: igb 0000:05:00.1: PCI INT B -> GSI 17 (level, low) -> IRQ 17
igb 0000:05:00.1: irq 72 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 73 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 74 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 75 for MSI/MSI-X
```

```
igb 0000:05:00.1: irq 76 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 77 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 78 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 79 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 80 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 72 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 73 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 74 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 75 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 76 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 77 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 78 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 79 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: irq 80 for MSI/MSI-X
igb 0000:05:00.1: added PHC on eth1
igb 0000:05:00.1: Intel(R) Gigabit Ethernet Network Connection
igb 0000:05:00.1: eth1: (PCIe:5.0Gb/s:Width x1) 00:15:d5:03:00:2b
igb 0000:05:00.1: eth1: PBA No: 106300-000
igb 0000:05:00.1: Using MSI-X interrupts. 4 rx queue(s), 4 tx queue(s)
```

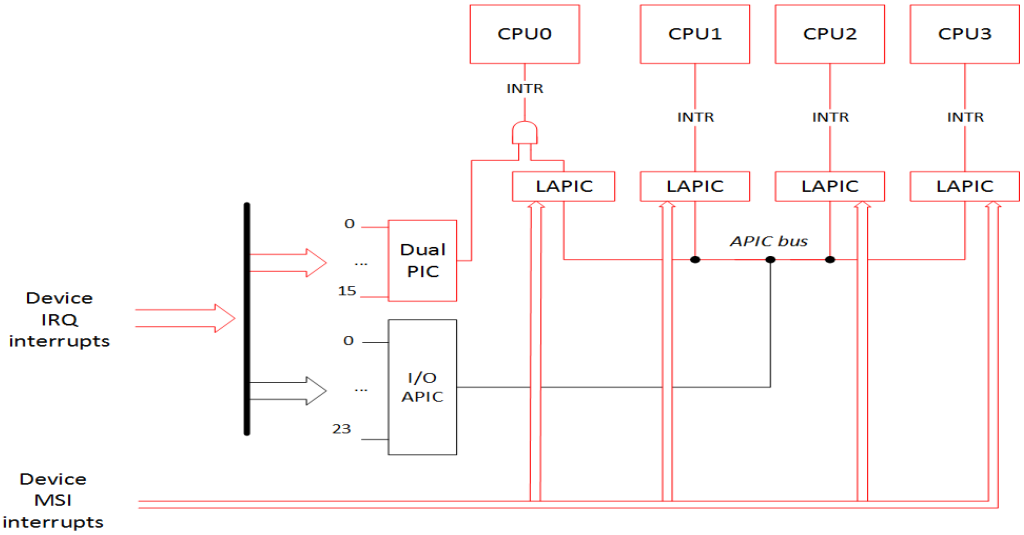
— загрузка с опцией pci=nomsi

```
igb: Intel(R) Gigabit Ethernet Network Driver - version 5.0.5-k
igb: Copyright (c) 2007-2013 Intel Corporation.
acpi:acpi_pci_irq_enable: igb 0000:05:00.0: PCI INT A -> GSI 16 (level, low) -> IRQ 16
igb 0000:05:00.0: added PHC on eth0
igb 0000:05:00.0: Intel(R) Gigabit Ethernet Network Connection
igb 0000:05:00.0: eth0: (PCIe:5.0Gb/s:Width x1) 00:15:d5:03:00:2a
igb 0000:05:00.0: eth0: PBA No: 106300-000
igb 0000:05:00.0: Using legacy interrupts. 1 rx queue(s), 1 tx queue(s)
acpi:acpi_pci_irq_enable: igb 0000:05:00.1: PCI INT B -> GSI 17 (level, low) -> IRQ 17
igb 0000:05:00.1: added PHC on eth1
igb 0000:05:00.1: Intel(R) Gigabit Ethernet Network Connection
igb 0000:05:00.1: eth1: (PCIe:5.0Gb/s:Width x1) 00:15:d5:03:00:2b
igb 0000:05:00.1: eth1: PBA No: 106300-000
igb 0000:05:00.1: Using legacy interrupts. 1 rx queue(s), 1 tx queue(s)
```

Из-за уменьшения количества прерываний на устройство, включение данной опции может приводить к существенному ограничению производительности работы драйвера (это без учёта того, что согласно исследованию Intel Reducing Interrupt Latency Through the Use of Message Signaled Interruptsпрерывания через MSI в 3 раза быстрее чем через IO-APIC и в 5 раз быстрее чем через PIC).

noapic

Данная опция отключает I/O APIC. MSI прерывания всё ещё могут идти на все CPU, но прерывания от устройств смогут идти только на CPU0, так как PIC связан только с CPU0. Но LAPIC работает и другие CPU могут работать и обрабатывать прерывания.



	CPU0	CPU1	CPU2	CPU3		
0:	5	0	0	0	XT-PIC-XT-PIC	timer
1:	2	0	0	0	XT-PIC-XT-PIC	i8042
2:	0	0	0	0	XT-PIC-XT-PIC	cascade
8:	1	0	0	0	XT-PIC-XT-PIC	rtc0
9:	0	0	0	0	XT-PIC-XT-PIC	acpi
12:	172	0	0	0	XT-PIC-XT-PIC	ehci_hcd:usb1
56:	0	0	0	0	PCI-MSI-edge	aerdrv, PCIe PME
57:	0	0	0	0	PCI-MSI-edge	aerdrv, PCIe PME
58:	0	0	0	0	PCI-MSI-edge	aerdrv, PCIe PME
59:	0	0	0	0	PCI-MSI-edge	aerdrv, PCIe PME
60:	0	0	0	0	PCI-MSI-edge	aerdrv, PCIe PME
61:	0	0	0	0	PCI-MSI-edge	aerdrv, PCIe PME

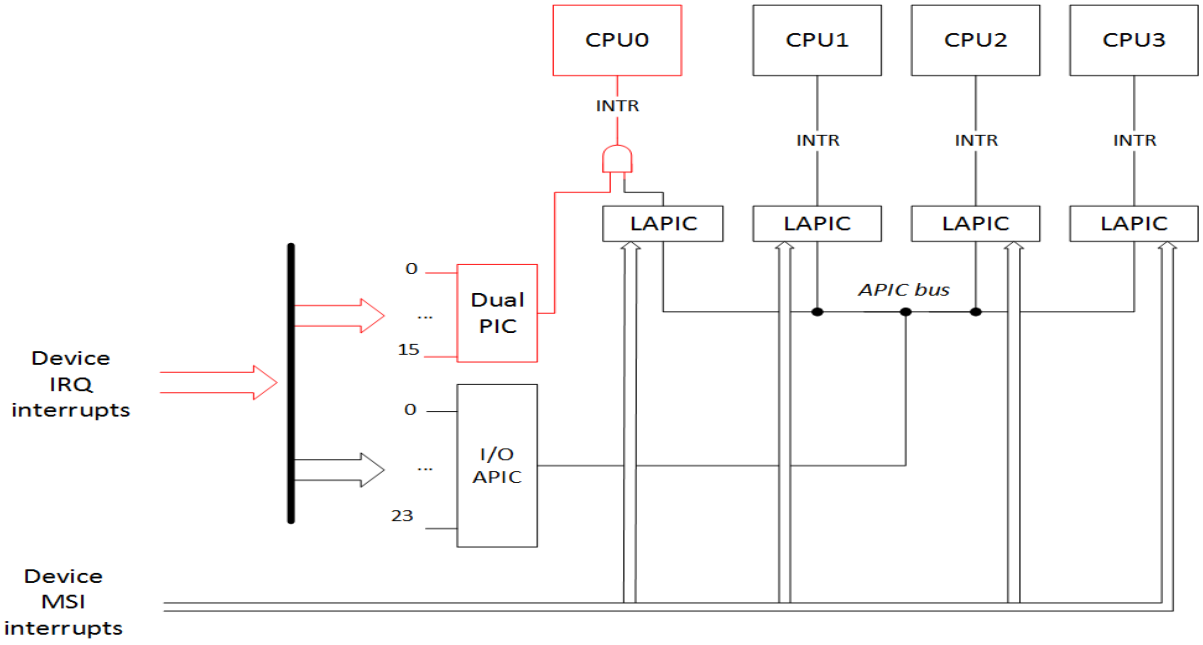
```
 62:       2833       2989       1021        811  PCI-MSI-edge      ahci
 63:          0          1          0          0  PCI-MSI-edge      eth59
 64:        301         52          9          3  PCI-MSI-edge      eth59-rx-0
 65:         12         24          3        178  PCI-MSI-edge      eth59-rx-1
 66:         14         85          6          2  PCI-MSI-edge      eth59-rx-2
 67:         17         24        307          1  PCI-MSI-edge      eth59-rx-3
 68:         70         18          8         10  PCI-MSI-edge      eth59-tx-0
 69:          7          0          0         23  PCI-MSI-edge      eth59-tx-1
 70:         15        227          2          2  PCI-MSI-edge      eth59-tx-2
 71:         18          6         27          2  PCI-MSI-edge      eth59-tx-3
 72:          0          0          0          0  PCI-MSI-edge      eth58
 73:          1          0          0         27  PCI-MSI-edge      eth58-rx-0
 74:          1         22          0          5  PCI-MSI-edge      eth58-rx-1
 75:          1          0         22          5  PCI-MSI-edge      eth58-rx-2
 76:         23          0          0          5  PCI-MSI-edge      eth58-rx-3
 77:          1          0          0         27  PCI-MSI-edge      eth58-tx-0
 78:          1         22          0          5  PCI-MSI-edge      eth58-tx-1
 79:          1          0         22          5  PCI-MSI-edge      eth58-tx-2
 80:         23          0          0          5  PCI-MSI-edge      eth58-tx-3
```

```
 81:        187         17         70          7   PCI-MSI-edge      snd_hda_intel
 82:        698       1647        247        129   PCI-MSI-edge      i915
 83:        438        135         16         59   PCI-MSI-edge      snd_hda_intel
NMI:          0          0          0          0   Non-maskable interrupts
LOC:       1975       2499       2245       1474   Local timer interrupts
SPU:          0          0          0          0   Spurious interrupts
PMI:          0          0          0          0   Performance monitoring interrupts
IWI:        132         67        429         91   IRQ work interrupts
RTR:          3          0          0          0   APIC ICR read retries
RES:       1697       2178       1903       1541   Rescheduling interrupts
CAL:        561        496        534        567   Function call interrupts
TLB:        229        254        170        137   TLB shootdowns
TRM:         78         78         78         78   Thermal event interrupts
THR:          0          0          0          0   Threshold APIC interrupts
MCE:          0          0          0          0   Machine check exceptions
MCP:          2          2          2          2   Machine check polls
ERR:          0
MIS:          0
```

Как видим, все прерывания IO-APIC-* превратились в XT-PIC-XT-PIC, причём эти прерывания роутятся только на CPU0. Прерывания MSI остались без изменений и идут на все CPU0-3.

nolapic

Отключает LAPIC. MSI прерывания не могут работать без LAPIC, I/O APIC не может работать без LAPIC. Поэтому все прерывания от устройств будут идти на PIC, а он работает только с CPU0. И без LAPIC остальные CPU даже работать в системе не будут.



Вывод /proc/interrupts:

```
           CPU0
  0:       6416   XT-PIC-XT-PIC    timer
  1:          2   XT-PIC-XT-PIC    i8042
  2:          0   XT-PIC-XT-PIC    cascade
  3:       5067   XT-PIC-XT-PIC    aerdrv, aerdrv, PCIe PME, PCIe PME, i915, snd_hda_intel
, eth59
  4:         32   XT-PIC-XT-PIC    aerdrv, aerdrv, PCIe PME, PCIe PME, eth58
  5:          0   XT-PIC-XT-PIC    aerdrv, PCIe PME
  6:          0   XT-PIC-XT-PIC    aerdrv, PCIe PME
```

```
 8:          1    XT-PIC-XT-PIC    rtc0
 9:          0    XT-PIC-XT-PIC    acpi
11:        274    XT-PIC-XT-PIC    snd_hda_intel
12:        202    XT-PIC-XT-PIC    ehci_hcd:usb1
15:       7903    XT-PIC-XT-PIC    ahci
NMI:          0   Non-maskable interrupts
LOC:          0   Local timer interrupts
SPU:          0   Spurious interrupts
PMI:          0   Performance monitoring interrupts
IWI:          0   IRQ work interrupts
RTR:          0   APIC ICR read retries
RES:          0   Rescheduling interrupts
CAL:          0   Function call interrupts
TLB:          0   TLB shootdowns
TRM:          0   Thermal event interrupts
THR:          0   Threshold APIC interrupts
MCE:          0   Machine check exceptions
MCP:          1   Machine check polls
ERR:          0
```

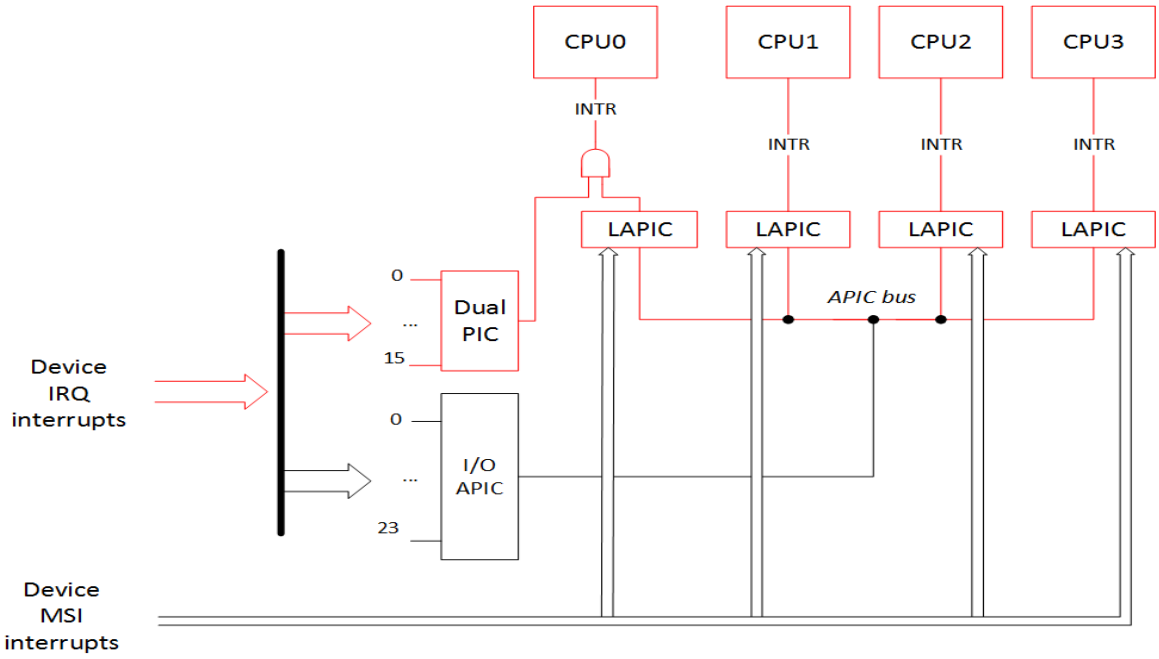
```
MIS:          0
```

Комбинации:

На самом деле всего одна для нового варианта: «noapic pci=nomsi». Все прерывания от устройств смогут идти только на CPU0 через PIC. Но LAPIC работает и другие CPU могут работать и обрабатывать прерывания.

Одна, потому что с «nolapic» можно ничего не комбинировать, т.к. эта опция и так сделает недоступным I/O APIC и MSI. Так что если вы когда-то прописывали опции загрузки «noapic nolapic» (или самый распространённый вариант «acpi=off noapic nolapic»), то судя по всему вы набирали лишние буквы.

Итак, что будет от опций «noapic pci=nomsi»:



Вывод /proc/interrupts:

```
           CPU0       CPU1       CPU2       CPU3
  0:          5          0          0          0   XT-PIC-XT-PIC    timer
  1:          2          0          0          0   XT-PIC-XT-PIC    i8042
  2:          0          0          0          0   XT-PIC-XT-PIC    cascade
```

```
  3:       5072          0          0          0   XT-PIC-XT-PIC    i915, snd_hda_intel, eth
59
  4:         32          0          0          0   XT-PIC-XT-PIC    eth58
  8:          1          0          0          0   XT-PIC-XT-PIC    rtc0
  9:          0          0          0          0   XT-PIC-XT-PIC    acpi
 11:        281          0          0          0   XT-PIC-XT-PIC    snd_hda_intel
 12:        200          0          0          0   XT-PIC-XT-PIC    ehci_hcd:usb1
 15:       7930          0          0          0   XT-PIC-XT-PIC    ahci
NMI:          0          0          0          0   Non-maskable interrupts
LOC:       2595       2387       2129       1697   Local timer interrupts
SPU:          0          0          0          0   Spurious interrupts
PMI:          0          0          0          0   Performance monitoring interrupts
IWI:        159         90        482        135   IRQ work interrupts
RTR:          3          0          0          0   APIC ICR read retries
RES:       1568       1666       1810       1833   Rescheduling interrupts
CAL:        431        556        549        558   Function call interrupts
TLB:        124        184        156        274   TLB shootdowns
TRM:        116        116        116        116   Thermal event interrupts
THR:          0          0          0          0   Threshold APIC interrupts
```

```
MCE:          0          0          0          0   Machine check exceptions
MCP:          2          2          2          2   Machine check polls
ERR:          0
MIS:          0
```

Таблицы роутинга прерываний и опции «acpi=noirq», «pci=noacpi», «acpi=off»

Как операционная система получает информацию о роутинге прерываний от устройств? BIOS подготавливает информацию для ОС в виде:

- ACPI таблиц (методы _PIC/_PRT)
- _MP_ таблицы (MPtable)
- $PIR таблицы
- Регистров 0x3C/0x3D конфигурационного пространства PCI устройств

Следует отметить, что для обозначения прерываний MSI BIOSy не надо ничего дополнительно делать, вся вышеупомянутая информация нужна только для линий APIC/PIC прерываний.

Таблицы в списке выше обозначены в порядке приоритета. Рассмотрим это подробней.

Допустим BIOS предоставил все эти данные и мы грузимся без каких-либо дополнительных опций:

- ОС находит таблицы ACPI
- ОС выполняет метод ACPI "_PIC", передаёт ему аргумент, что нужно грузиться в режиме APIC. Тут код метода обычно сохраняет выбранный режим в переменной (допустим PICM=1)
- Для получения данных о прерываниях ОС вызывает метод ACPI "_PRT". Он внутри себя проверяет переменную PICM и возвращает роутинг для APIC случая
  В случае если мы грузимся с опцией **noapic**:

- ОС находит таблицы ACPI
- ОС выполняет метод ACPI "_PIC", передаёт ему аргумент, что нужно грузиться в режиме PIC. Тут код метода обычно сохраняет выбранный режим в переменной (допустим PICM=0)
- Для получения данных о прерываниях ОС вызывает метод ACPI "_PRT". Он внутри себя проверяет переменную PICM и возвращает роутинг для PIC случая

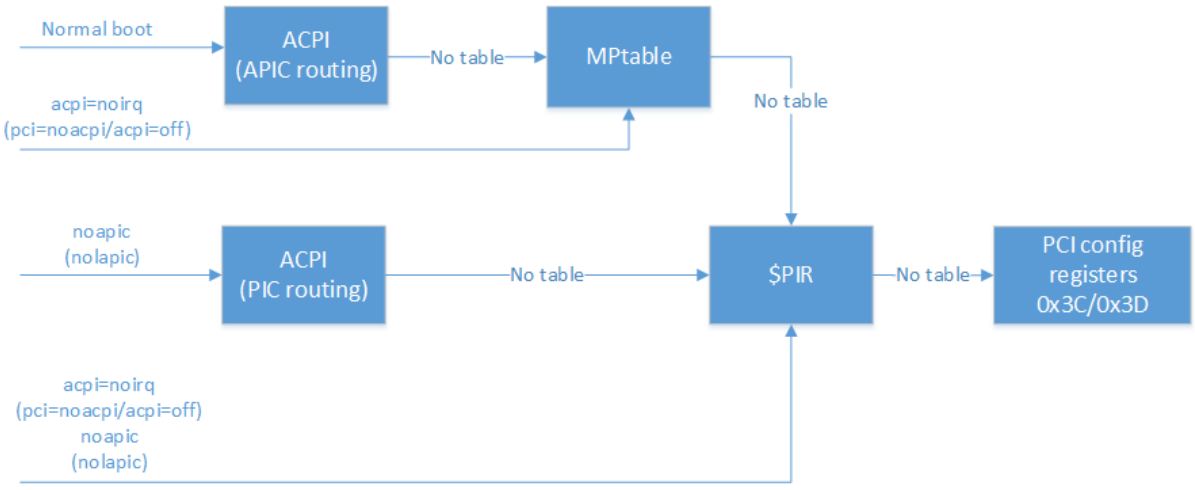
Если таблица ACPI отсутствует или функционал роутинга прерываний через ACPI отключен с помощью опций **acpi=noirq** или **pci=noacpi** (или ACPI полностью выключен с помощью **acpi=off**), то ОС смотрит для роутинга прерываний таблицу MPtable (_MP_):

- ОС не находит/не смотрит таблицы ACPI
- ОС находит таблицу MPtable (_MP_)

Если таблица ACPI отсутствует или функционал роутинга прерываний через ACPI отключен с помощью опций **acpi=noirq** или **pci=noacpi** (или ACPI полностью выключен с помощью **acpi=off**) и если таблица MPtable (_MP_) отсутствует (или передана опция загрузки **noapic** или **nolapic**):

- ОС не находит/не смотрит таблицу ACPI
- ОС не находит/не смотрит таблицу MPtable (_MP_)
- ОС находит таблицу $PIR
  Если и таблицы $PIR нет, или она не полна, то операционная система для угадывания прерываний будет смотреть значения регистров 0x3C/0x3D конфигурационного пространства PCI устройств.

  Суммируем всё вышеизложенное следующей картинкой:



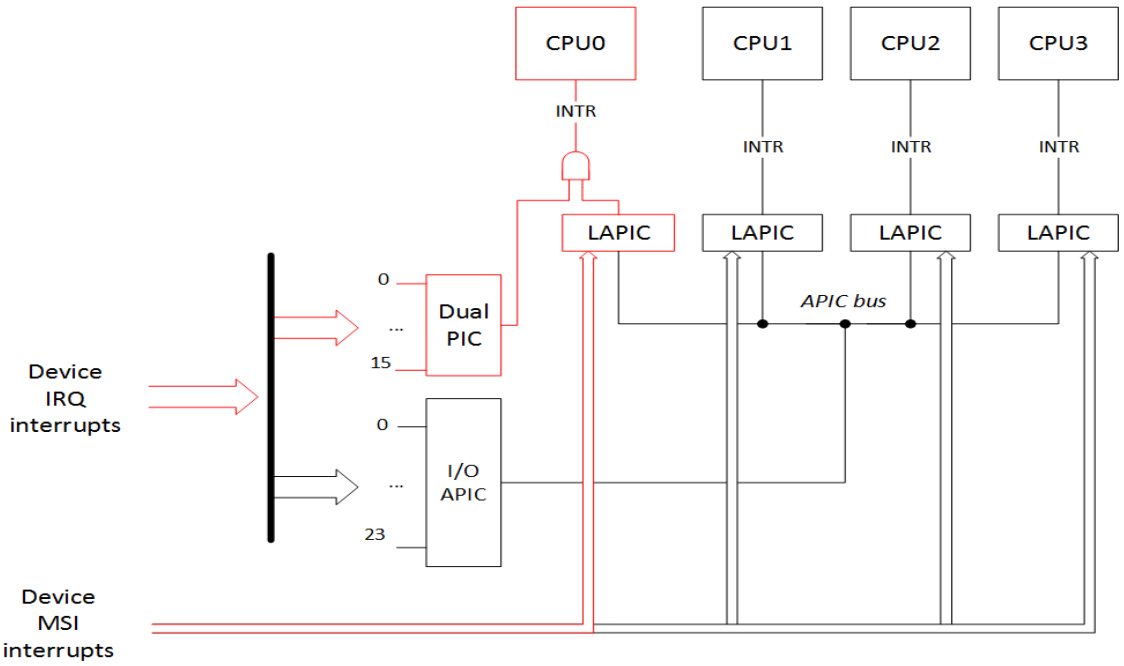
Следует помнить, что не каждый BIOS предоставляет все 3 таблицы (ACPI/MPtable/$PIR), так что если вы передали опцию загрузчику отказаться от использования ACPI или ACPI и MPtable для роутинга прерываний, далеко не факт, что ваша система загрузится.

Замечание 1: в случае если мы попытаемся загрузиться в режиме APIC с опцией acpi=noirq и без наличия MPtable, то картина прерываний будет как и в случае обычной загрузки с единственной опцией noapic. Операционная система сама перейдёт в режим PIC прерываний.
В случае если мы попытаемся загрузиться вообще без таблиц ACPI (acpi=off) и не предоставив MPtable, то картина будет такая:

```
           CPU0
  0:          6    XT-PIC-XT-PIC    timer
  1:          2    XT-PIC-XT-PIC    i8042
  2:          0    XT-PIC-XT-PIC    cascade
  8:          0    XT-PIC-XT-PIC    rtc0
 12:        373    XT-PIC-XT-PIC    ehci_hcd:usb1
 16:          0   PCI-MSI-edge      PCIe PME
 17:          0   PCI-MSI-edge      PCIe PME
 18:          0   PCI-MSI-edge      PCIe PME
 19:          0   PCI-MSI-edge      PCIe PME
 20:          0   PCI-MSI-edge      PCIe PME
 21:          0   PCI-MSI-edge      PCIe PME
 22:       8728   PCI-MSI-edge      ahci
 23:          1   PCI-MSI-edge      eth59
 24:       1301   PCI-MSI-edge      eth59-rx-0
 25:        113   PCI-MSI-edge      eth59-tx-0
 26:          0   PCI-MSI-edge      eth58
 27:         45   PCI-MSI-edge      eth58-rx-0
 28:         45   PCI-MSI-edge      eth58-tx-0
```

```
 29:       1280   PCI-MSI-edge      snd_hda_intel
NMI:          2   Non-maskable interrupts
LOC:      24076   Local timer interrupts
SPU:          0   Spurious interrupts
PMI:          2   Performance monitoring interrupts
IWI:       2856   IRQ work interrupts
RTR:          0   APIC ICR read retries
RES:          0   Rescheduling interrupts
CAL:          0   Function call interrupts
TLB:          0   TLB shootdowns
TRM:         34   Thermal event interrupts
THR:          0   Threshold APIC interrupts
MCE:          0   Machine check exceptions
MCP:          2   Machine check polls
ERR:          0
MIS:          0
```

Это происходит из-за того, что без ACPI таблицы MADT (Multiple APIC Description Table) и необходимой информации из MPtable, операционная система не знает APIC идентификаторы (APIC ID) для других процессоров и не может с ними работать, но LAPIC основного процессора работает, так как мы это не запрещали, и MSI прерывания могут на него приходить. То есть будет так:



Замечание 2: в целом роутинг прерываний при использовании ACPI в случае APIC совпадает с роутингом прерываний через MPtable. А роутинг прерываний через ACPI в случае использования PIC совпадает с роутингом прерываний через $PIR. Так что и выводы /proc/interrupts отличаться не должны. Однако в процессе исследований заметил одну странность. При роутинге через MPtable в выводе почему-то присутствует каскадное прерывание «XT-PIC-XT-PIC cascade».

```
           CPU0       CPU1       CPU2       CPU3
  0:         15          0          0          0   IO-APIC-edge      timer
  1:          2          0          0          0   IO-APIC-edge      i8042
  2:          0          0          0          0    XT-PIC-XT-PIC    cascade
  8:          0          1          0          0   IO-APIC-edge      rtc0
  9:          0          0          0          0   IO-APIC-edge      acpi
 ...
```

Немного странно, что так происходит, но в документации ядра вроде говорится, что это нормально.

Заключение:

В заключении ещё раз обозначим разобранные опции.

Опции выбора контроллера прерываний:

- **pci=nomsi** — MSI прерывания станут IO-APIC/XT-PIC в зависимости от используемого контроллера прерываний
- **noapic** — Отключает I/O APIC. MSI прерывания всё ещё могут идти на все CPU, остальные прерывания от устройств смогут идти только на PIC, а он работает только с CPU0. Но LAPIC работает и другие CPU могут работать и обрабатывать прерывания
- **noapic pci=nomsi** — Все прерывания от устройств могут идти только на PIC, а он работает только с CPU0. Но LAPIC работает и другие CPU могут работать и обрабатывать прерывания
- **nolapic** — Отключает LAPIC. MSI прерывания не могут работать без LAPIC, I/O APIC не может работать без LAPIC. Все прерывания от устройств будут идти на PIC, а он работает только с CPU0. И без LAPIC остальные CPU не будут работать.

Опции выбора приоритетной таблицы роутинга прерываний:

- **без опций** — роутинг через APIC с помощью таблиц ACPI
- **noapic** — роутинг через PIC с помощью таблиц ACPI
- **acpi=noirq** (**pci=noacpi/acpi=off**) — роутинг через APIC с помощью таблицы MPtable
- **acpi=noirq** (**pci=noacpi/acpi=off**) **noapic** (**nolapic**) — роутинг через PIC с помощью таблицы $PIR

В следующей части посмотрим как coreboot настраивает чипсет для роутинга прерываний.