

10 Pesquisa

Interrupção e Exceções

Rafael Corsi
rafael.corsi@insper.edu.br

20 de março de 2017

Entregar em formato PDF via github até 27/3

1 Introdução

Em computação é comum a necessidade de realizar ações com base em eventos. Eventos podem ser classificados como internos e externos ao processador/microcontrolador. O término de um cálculo realizado por um dos núcleos de um processador multicore ou a detecção de um overflow de memória são exemplos eventos interno ao CORE (processador). Já a notificação de um novo pacote oriundo da comunicação Ethernet é um exemplo de um evento externo ao CORE.

A estruturação de um programa orientada a eventos¹ dá uma série de vantagens ao programador :

1. independência entre as diferentes partes do programador
2. facilmente modificável e escalável
3. definição de prioridades
4. facilita a correlação entre o código e a documentação

Nesse paradigma de programação define-se funções para determinados eventos e essas funções são acionadas quando o evento é detectado. As funções/eventos podem possuir

¹https://en.wikipedia.org/wiki/Event-driven_programming

diferentes níveis de prioridades, o que possibilita ao programador definir o que deve ser executado caso dois eventos ocorram simultaneamente.

Por exemplo, podemos definir uma função que é acionada toda vez que chega um dado pela porta Ethernet, e outra função que é acionada toda vez que um botão for pressionado, podemos também definir eventos periódicos, tais como : execute uma função a cada X[s].

1.1 Embarcados

Em sistemas computacionais os eventos são em geral tratados pelo sistema operacional (OS) (linux/ windows, ...) porém em sistemas embarcados nem sempre possuímos um sistema operacional ou não podemos tolerar a latência entre a troca de contexto do SO. Existe para isso as interrupções de hardware, que são chamadas de funções (eventos) realizados pelo uC para eventos detectados pelos periféricos.

Podemos configurar o uC para que toda vez que um botão seja pressionado (no nosso caso, mudança de 1 para 0) uma função (chamada de handler) seja chamada. Evitando a necessidade de checarmos pela mudança de estado no while(1). Isso abre portas para uma série de otimizações sendo uma das principais a questão energética.

O estilo de programação que fica checando por uma mudança é chamado de *polling*, o mesmo utilizado nos exemplos realizados até agora :

```
while(1){
    /**
     * @Brief Verifica constantemente o status do botao
     * 1 : nao apertado
     * 0 : apertado
     */
    if (BUT_PIO->PIO_PDSR & (BUT_PIN_MASK)){
        LED_PIO->PIO_CODR = LED_PIN_MASK;
    }
    else{
        LED_PIO->PIO_SODR = LED_PIN_MASK;
    }
};
```

Nesse exemplo de código fica-se constantemente checando por alterações no registrador do PIO responsável pelo botão a fim de decidirmos se o LED ficará acesso ou apagado. O CORE está constantemente trabalhando a fim de executar essas operações, o que ele faz constantemente é :

1. busca o valor do registrador **PIO_PDSR**
2. aplica a máscara ao valor
3. checa se o resultado da máscara é verdadeiro ou falso
4. executa uma das duas ações diferentes

O CORE Cortex M7 com ponto flutuante operando a 300MHz fica realizando uma simples ação de comparar o valor de um registrador com uma máscara para detectarmos

uma mudança no botão. E se, o código fosse alertado dessa alteração e uma função específica chamada para tratar essa mudança ? O CORE poderia estar em um modo de baixo consumo energético (sleep mode) e configurado para acordar dado um determinado evento (exe. mudança de estado do botão).

Deve-se ponderar a utilização do modo de baixo consumo energético já que esse tipo de ação (sleep mode -> wakeup) implica em um atraso entre o evento e a retomada plena do CORE e início da execução do código. Esse atraso (pode variar no caso do SAME70 entre 10us e 2ms dependendo do modo de powerdown) pode ser crítico para sistemas que devem agir de forma ágil a uma determinada ação.

O trecho de código a seguir ilustra a possível solução utilizando interrupção para executar uma ação quando o botão é alterado. No while(1) o processador entra em modo sleep (função bloqueante) e só é “acordado” dado uma mudança no valor digital do pino que o botão está conectado.

```
/**
 * Funcao responsavel por tratar a mudanca de
 * estado do botao.
 * E' chamada sempre que houver uma transicao
 * de High -> Low (falling_egde).
 */
void but_Handler(void){
    if (BUT_PIO->PIO_PDSR & (BUT_PIN_MASK)){
        LED_PIO->PIO_CODR = LED_PIN_MASK;
    }
    else{
        LED_PIO->PIO_SODR = LED_PIN_MASK;
    }
}

void main(){
    /* inicializacoes */
    ...

    /**
     * Superloop em modo sleep
     */
    while(1){
        pmc_sleep(SLEEP_MGR_SLEEP_WFI);
    };
}
```

2 Exceções

Exceções² são eventos que causam uma mudança no fluxo de execução do programa, que quando ocorridas levam a unidade de processamento a executar uma parte específica

²<https://www.ece.umd.edu/class/enee447.S2016/ARM-Docmentation/ARM-Interrupts-1.pdf>

do código chamada de : *exception handler*. Depois do término da execução da exceção o programa principal volta a ser executado normalmente.

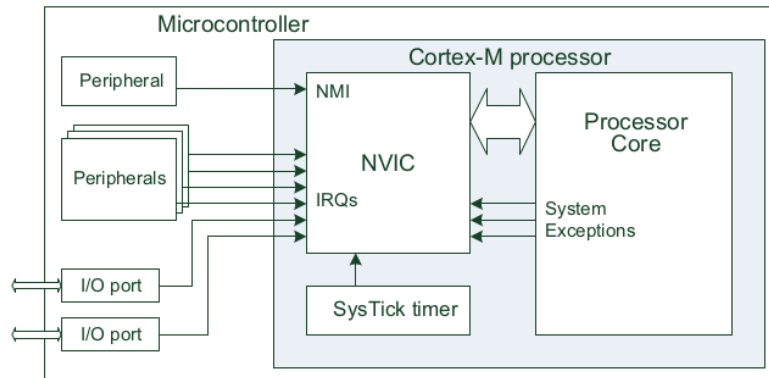


Figura 1: Fontes de exceções

Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors, The - Yiu, Joseph

O hardware responsável por gerenciar as exceções no ARM é chamado de *Nested vectored interrupt controller* (NVIC). O NVIC pode suportar de 1 à 240 diferentes exceções, sendo elas classificadas basicamente em quatro grupos :

- System Exceptions
- Fault Detection
- Non-Maskable Interrupt (NMI)
- Interrupt Requests (IRQ)

Questão. 2.1: NMI vs IRQ

Qual a diferença entre as exceções NMI e IRQ ?

Exceções numeradas de 1-15 são consideradas exceções do sistema (reset, overflow, bus fault, ...), exceções de número superior a 15 são consideradas interrupções. No CortexM não existe exceção 0.

2.1 Exemplos

- O PIO pode gerar uma interrupção quando acontecer uma mudança de nível em uma entrada;
- O periférico do USB pode gerar uma interrupção quando um dado novo chegar; ou quando a transmissão de um dado finalizar;
- O *timer* pode gerar uma interrupção quando atingido um determinado valor;

3 Interrupção

No ARM interrupções são um tipo de exceção, normalmente geradas pelos periféricos do microcontrolador.

Quando um periférico impõem um sinal de interrupção ao NVIC, o seguinte acontece :

1. uma interrupção é acionada (IRQ);
2. O processador suspende a execução do código;
3. O processador executa o serviço de rotina da interrupção (*Interrupt Service Routine* - ISR);
4. O processador retoma a execução do código para o estado anterior da interrupção acontecer.

Questão. 3.1: IRQ vs ISR

Qual a diferença entre as exceções IRQ e ISR ?

Devemos notar que o processador deve salvar os contextos (registradores do core) na primeira passagem (1 \rightarrow 2) e após executar o ISR, recarregar os valores na passagem (2 \rightarrow 3).

3.1 Prioridades

No ARM, podemos classificar as interrupções por prioridade sendo a de número menor considerada de MAIOR prioridade e de número maior de MENOR prioridade. O ARM permite que tenhamos uma gama de 256 níveis de prioridades distintas porém fica a cargo do fabricante decidir a quantidade de níveis.

Questão. 3.2: SAME70

No ARM que utilizamos no curso, quantas são as interrupções suportadas e qual a sua menor prioridade ?

Quando duas interrupções acontecem (não necessariamente simultaneamente) o NVIC verificará qual é a de maior prioridade e a executará primeiro, após sua execução é chamada o ISR da interrupção de menor prioridade.

A Fig. 2 ilustra o que acontece quando uma interrupção é ativada quando um sistema operacional está em uso, nesse caso existem dois tipos distintos de interrupção : IRQ e FIQ (*Fast Interrupt Routine*).

Questão. 3.3: FIQ

Descreva o uso do FIQ.

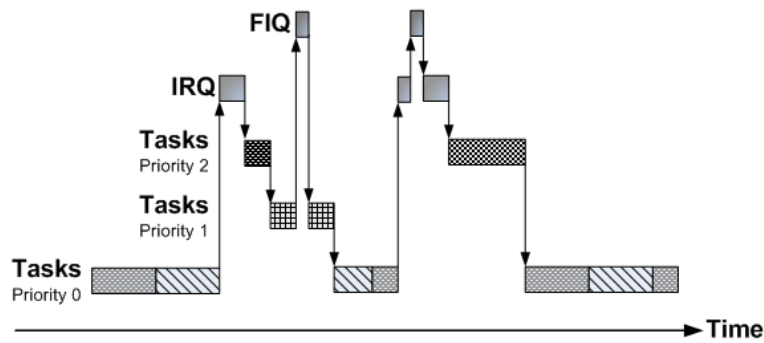


Figura 2: Ilustração do fluxo de interrupção

http://www.keil.com/support/man/docs/rlarm/rlarm_ar_inter_func.htm

Questão. 3.4: IRQ vs FIQ

No diagrama anterior, quem possui maior prioridade IRQ ou FIQ ?

3.2 Interrupt Requests - IRQ

As interrupções do tipo IRQs, geradas pelos periféricos são "mascaradas", ou seja, devemos ativar em um registrador (`NVIC_ISERx`) quais serão as interrupções que estarão ativas.

Questão. 3.5: SAME70 identificador (ID) da interrupção dos periféricos

No datasheet, seção 13.1 informa o ID do periférico que está associado com a sua interrupção. Busque a informação e liste o ID dos seguintes periféricos :

- PIOA
- PIOC
- TC0

Além de ativarmos a interrupção do periférico específico, precisamos definir sua prioridade. Na inicialização do uC o ARM configura todas as prioridades para o nível 0 (mais alto). Esse controle é realizado via acesso aos registradores especiais do NVIC, especificamente o `NVIC_IPRx`.

3.2.1 Sinais de interrupção vindo dos periféricos

Os periféricos geram um sinal de interrupção para o NVIC, esse sinal fica ativo até ser limpo manualmente pelo CORE e é utilizado pelo NVIC a fim de gerar a interrupção no CORE.

É de responsabilidade do programador (código) em dizer ao periférico que a interrupção foi resolvida, isso é feito acessando um registrador específico do periférico.

O NVIC trata as interrupções de maior prioridade antes das de menor prioridade, nesse meio termo os periféricos de menor prioridade devem manter sua requisição de interrupção ao NVIC. Os periféricos não possuem uma maneira direta de saber que a interrupção já foi tratada, por isso mantém em alto a requisição até receberem uma mensagem dizendo que podem baixar o sinal da interrupção. Isso é feito via acesso do CORE a um registrador do periférico, todos os periféricos que geram interrupções possuem um registrador específico para isso.

Podemos tomar por exemplo o PIO :

31.5.10 Input Edge/Level Interrupt

When the software reads PIO_ISR, all the interrupts are automatically cleared. This signifies that all the interrupts that are pending when PIO_ISR is read must be handled. When an Interrupt is enabled on a “level”, the interrupt is generated as long as the interrupt source is not cleared, even if some read accesses in PIO_ISR are performed.

Questão. 3.6: Limpando interrupção

O que aconteceria caso não limpemos a interrupção ?

3.3 Interrupt Service Routine - ISR

Após uma interrupção ser detectada pelo NVIC, o CORE salva os contextos e aponta a execução do código para uma região específica. Uma função especial para cada periférico chamada de handler é utilizado a fim de tratar as interrupções em nível de software.

Questão. 3.7: Latência da interrupção.

O que é latência na resolução de uma interrupção, o que é feito nesse tempo ? (*Interrupt latency*).

Uma interrupção no uC pode estar nos seguintes estados :

- Cada interrupção pode estar desativada (padrão) ou ativada;
- Cada interrupção pode estar pendente (esperando para ser executada) ou não pendente;

- Cada interrupção pode estar ativada (em execução) ou inativada.

Podemos fazer diferentes combinações dos atributos listados anteriormente, por exemplo, enquanto estivermos lidando com uma interrupção (ativada) podemos desativar lá para que a mesma interrupção não seja chamada novamente quando a interrupção acabar de ser executada.

Para uma interrupção ser aceita, devemos ter o seguinte cenário :

- A interrupção está em pendência,
- A interrupção está ativada, e,
- A prioridade da interrupção é maior (menor valor) do que o nível atual.

4 Software - CMSIS

Utilizaremos as funções definidas no *Cortex Microcontroller Software Interface Standard* (CMSIS) ³ para configurar o NVIC e o CORE, essas funções são de uso geral do ARM Cortex e são independentes do fabricante (Atmel, Texas, ...).

As funções utilizadas serão :

```
//Set the priority grouping
void NVIC_SetPriorityGrouping(uint32_t priority_grouping)

//Enable IRQn
void NVIC_EnableIRQ(IRQn_t IRQn)

// Disable IRQn
void NVIC_DisableIRQ(IRQn_t IRQn)

// Set priority for IRQn
void NVIC_SetPriority (IRQn_t IRQn, uint32_t priority)
```

Essas funções apenas configura o NVIC + CORE, devemos também configurar o periférico que será responsável por gerar a interrupção.

! O parâmetro IRQn das funções de configuração do NVIC é o ID do periférico em questão (o mesmo utilizado no PMC).

5 PIO - Interrupção

A interrupção no PIO é gerenciada por meio de registradores e pode ser configurada para detectar :

- Rising edge detection

³<http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-microcontroller-software-interface-standard.php>

- Falling edge detection
- Low-level detection
- High-level detection

Questão. 5.1: PIO - Interrupção Botão

Qual deve ser a configuração para operarmos com interrupção no botão do kit SAME70-EK2 ?

Uma visão geral do hardware responsável por gerenciar as interrupções é demonstrado na Fig. 3.

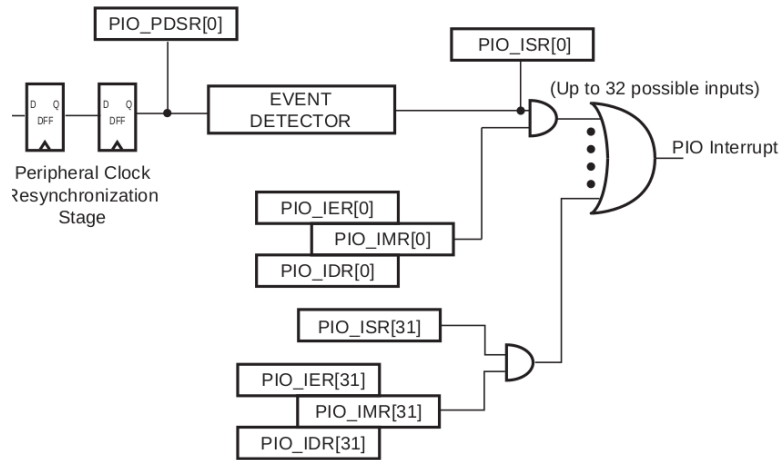


Figura 3: PIO interrupção
SAME70 Datasheet

O texto a seguir foi extraído do datasheet do SAME70 e descreve a operação dessa parte do PIO :

31.5.10 Input Edge/Level Interrupt

The PIO Controller can be programmed to generate an interrupt when it detects an edge or a level on an I/O line. The Input Edge/Level interrupt is controlled by writing the Interrupt Enable Register (PIO_IER) and the Interrupt Disable Register (PIO_IDR), which enable and disable the input change interrupt respectively by setting and clearing the corresponding bit in the Interrupt Mask Register (PIO_IMR). As input change detection is possible only by comparing two successive samplings of the input of the I/O line, the peripheral clock must be enabled. The Input Change interrupt is available regardless of the configuration of the I/O line, i.e., configured as an input only, controlled by the PIO Controller or assigned to a peripheral function.

By default, the interrupt can be generated at any time an edge is detected on the input.

Some additional interrupt modes can be enabled/disabled by writing in the Additional Interrupt Modes Enable Register (PIO_AIMER) and Additional Interrupt Modes Disable Register (PIO_AIMDR). The current state of this selection can be read through the Additional Interrupt Modes Mask Register (PIO_AIMMR).

These additional modes are:

- Rising edge detection
- Falling edge detection
- Low-level detection
- High-level detection

In order to select an additional interrupt mode:

- The type of event detection (edge or level) must be selected by writing in the Edge Select Register (PIO_ESR) and Level Select Register (PIO_LSR) which select, respectively, the edge and level detection.
- The current status of this selection is accessible through the Edge/Level Status Register (PIO_ELSR).

The polarity of the event detection (rising/falling edge or high/low-level) must be selected by writing in the Falling Edge/Low-Level Select Register (PIO_FELLSR) and Rising Edge/High-Level Select Register (PIO_REHLSR) which allow to select falling or rising edge (if edge is selected in PIO_ELSR) edge or high- or low-level detection (if level is selected in PIO_ELSR). The current status of this selection is accessible through the Fall/Rise - Low/High Status Register (PIO_FRLHSR).

When an input edge or level is detected on an I/O line, the corresponding bit in the Interrupt Status Register (PIO_ISR) is set. If the corresponding bit in PIO_IMR is set, the PIO Controller interrupt line is asserted. The interrupt signals of the 32 channels are ORed-wired together to generate a single interrupt signal to the interrupt controller.

When the software reads PIO_ISR, all the interrupts are automatically cleared. This signifies that all the interrupts that are pending when PIO_ISR is read must be handled. When an Interrupt is enabled on a “level”, the interrupt is generated as long as the interrupt source is not cleared, even if some read accesses in PIO_ISR are performed.

Questão. 5.2: PIO - Interrupção

Com base no texto anterior e nos diagramas de blocos descreva o uso da interrupção e suas opções.

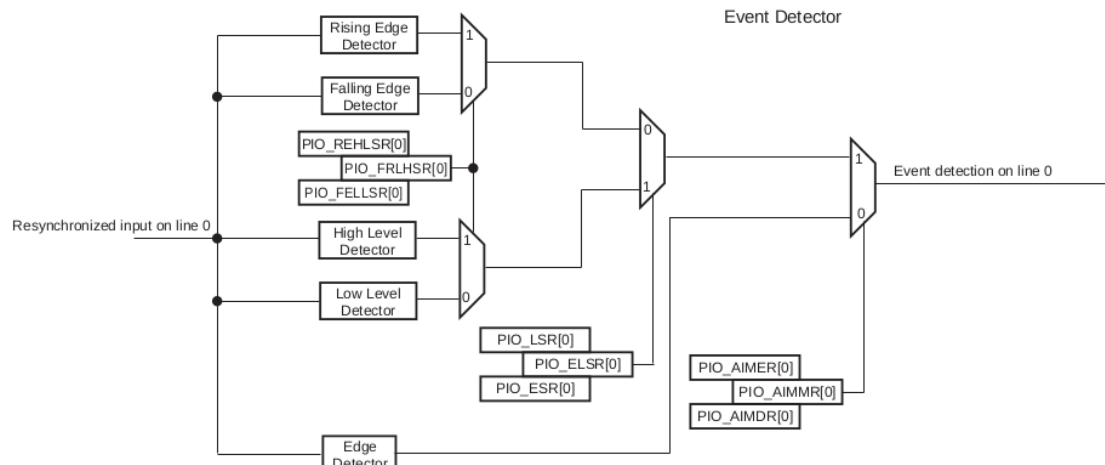


Figura 4: Detecção de eventos
SAME70 Datasheet

Questão. 5.3: Registradores Interrupção

Descreva as funções dos registradores :

- PIO_IER / PIO_IDR
- PIO_AIMER / PIO_AIMDR
- PIO_ELSR
- PIO_FRLHSR