



## MSP430F2 系列 16 位超低功耗单片机模块原理

### 第 17 章 SD16\_A 16 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 模数转换器

版本: 1.3

日期: 2007.5.

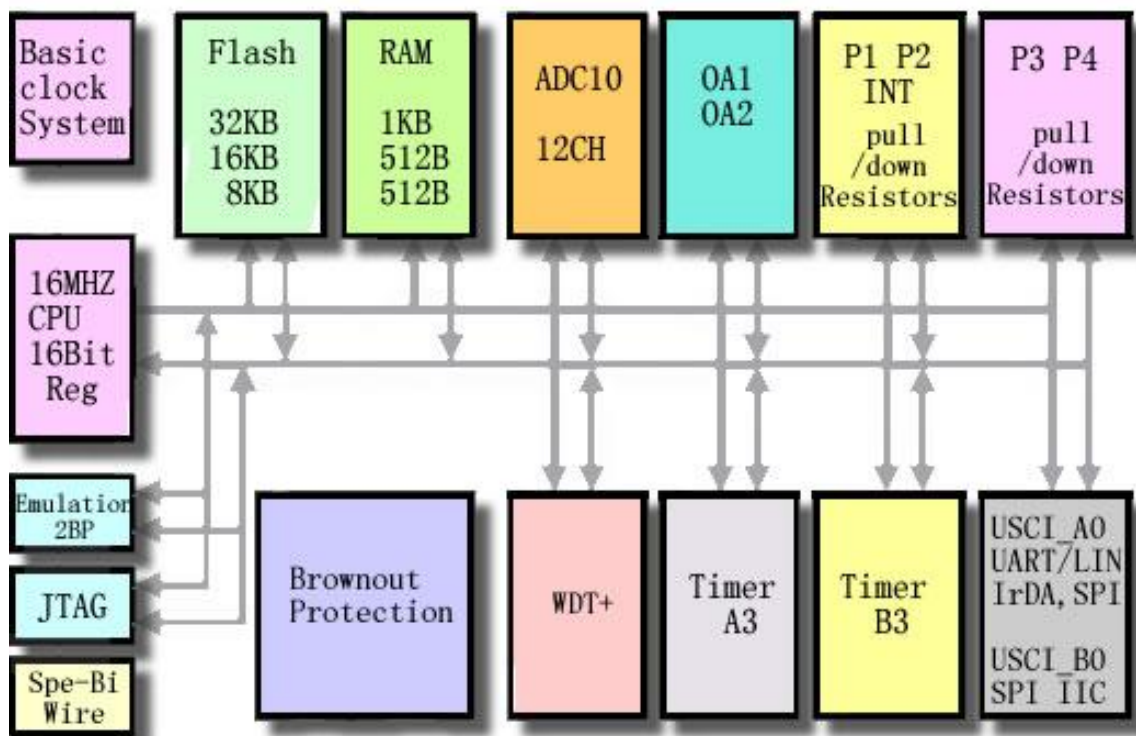
原文: TI MSP430x2xxfamily.pdf

翻译: 李璘 中国计量学院

编辑: DC 微控技术论坛版主

注: 以下文章是翻译 TI MSP430x2xxfamily.pdf 文件中的部分内容。由于我们翻译水平有限, 有整理过程中难免有所不足或错误; 所以以下内容只供参考. 一切以原文为准。

详情请密切留意微控技术论坛。



## 第十七章 SD16\_A

SD16\_A是一个16位的 $\Sigma - \Delta$ 模数转换器,它具有高阻抗的输入缓冲。本章介绍了SD16\_A模块,它在MSP430x20x3中才有。

本章内容

17.1 SD16\_A 介绍

17-2

17.2 SD16\_A 操作

17-4

17.3 SD16\_A 寄存器

17-15

### 17.1 SD16\_A 介绍

MSP430x20x3模块由一个 $\Sigma - \Delta$ 模数转换器组成,带有高阻抗输入缓冲和内部参考电压功能。它拥有多达8个的差分式复合输入,并包含一个内置的温度传感器。该ADC是基于二阶过采样的 $\Sigma - \Delta$ 调节器和数字抽取滤波器。这种抽取滤波器是一种梳状滤波器,它的过采样率是可选择的,最高可以达到1024。如果要进行额外的滤波,可以用软件实现。

MSP430x20x3不包含高阻抗输入功能。

SD16\_A的特点包括:

- | 16位的 $\Sigma - \Delta$ 结构
- | 每通道高达8个复用的差分信号输入
- | 可用软件选择的片内参考电压发生器 (1.2V)
- | 可用软件选择的内部或外部参考电压
- | 内置温度传感器
- | 高达1.1MHZ的调节器输入频率
- | 高阻抗输入缓冲
- | 可用软件选择的第功耗转换模式

SD16A的模块结构图如图17-1

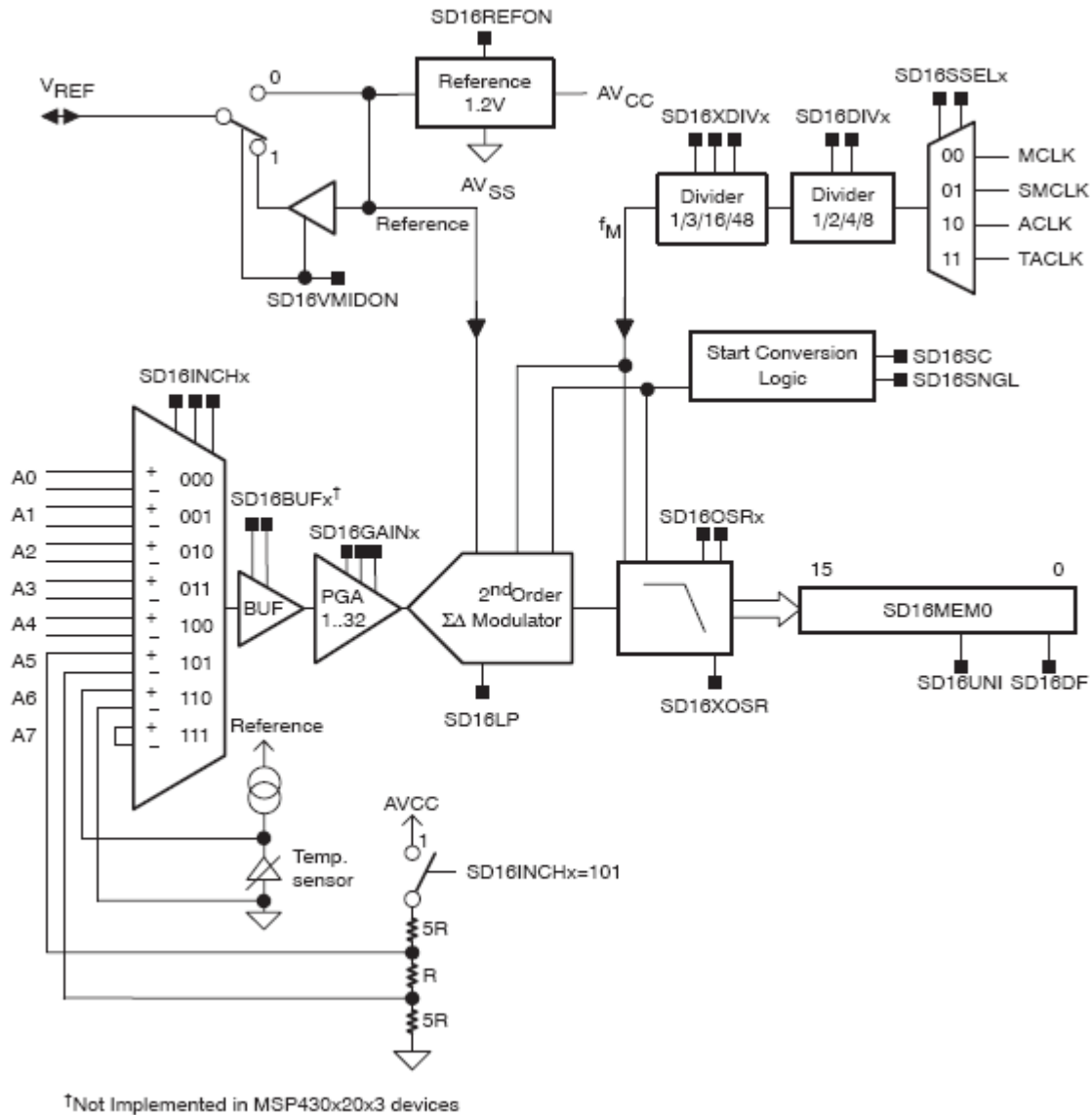


图17-1 SD16\_A结构图

## 17.2 SD16\_A 操作

SD16\_A 模块可以用软件进行配置。SD16\_A 的设置以下章节详细阐述

### 17.2.1 ADC 内核

模数转换是由一个1位、2次的sigma-delta调节器实现的。调节器中的一个位比较器通过调节器频率 $f_M$ 量化输入信号，所产生的1位数据流由数字滤波器平均分配作为转化结果。

### 17.2.2 模拟输入范围和PGA

各模拟通道的全程输入电压范围由各通道的可编程放大器增益来决定。全程最大范围是 $V_{FSR}$ ，这里  $V_{FSR}$ 由以下公式决定：

$$V_{FSR} = \frac{V_{REF} / 2}{GAIN_{PGA}}$$

对于1.2V的参考电压，在增益为1时，最大全程输入范围为

$$\pm V_{FSR} = \frac{1.2V / 2}{1} = \pm 0.6V$$

具体各器件的全程电压范围见器件手册

### 17.2.3 参考电压发生器

SD16\_A 模块有一个1.2v的内置参考电压，可以通过SD16REFON 位来启动它的使用。当使用内部参考电压，并用一个100nF的电容外接在V<sub>REF</sub> to AV<sub>SS</sub>之间时，可以抑制噪声。当SD16VMIDON = 1时，内部参考电压可以脱离芯片接到外面来用，缓冲输出可以达到1mA。当将内部参考电压脱离芯片时，需要在V<sub>REF</sub> to AV<sub>SS</sub>之间接一个470nF的电容，详细参数见器件手册。

当SD16REFON 和 SD16VMIDON都复位时，外部电压可以作为V<sub>REF</sub>的输入。

### 17.2.4 自动关闭电源功能

SD16\_A 是为低功耗应用而设计的，当它不进行转换时，就会自动关闭，而当转换开始时又自动启动。参考电压不会自动禁止，但是可以将SD16REFON = 0来关闭。当SD16\_A或参考电压禁止时，就可以减少电流消耗。

### 17.2.5 通道选择

SD16\_A 最多可以将8个复用差分输入转换到PGA。器件上最多有5个输入通道，A5通过通道复用可以作为一个抗性隔离器用于检测供电电压，A6为内部的温度传感器，A7为输入“+”和“-”之间的短路连接，可以用于校准SD16A的输入级补偿。

#### 模拟输入设置

模拟输入由SD16INCTL0和SD16AE寄存器来配置。SD16INCHx位选择8个不同差分输入中的一个作为输入。PGA的增益由SD16GAINx来决定，一共有6个增益可供用户选择。SD16AEx位用于禁止或允许模拟输入引脚。对SD16AEx位的设置可以禁止相应脚的复用数字电路，具体参数见芯片手册。

在转换过程中，对SD16INCHx 和 SD16GAINx位的任何修改都会在下一个数字滤波器的采样周期生效。由于数字滤波器的延迟，在这些位被修改之后的3次转换可能会无效，这由SD16INTDLYx 位来决定。如果SD16INTDLY = 00h，在转换开始条件后，转换中断请求在第4次转换时才响应。高阻抗输入缓冲可以通过SD16BUFx位来配置。设置的速度由SD16A调节器的频率来决定，如表17-1

表 17-1. 高输入阻抗缓冲器

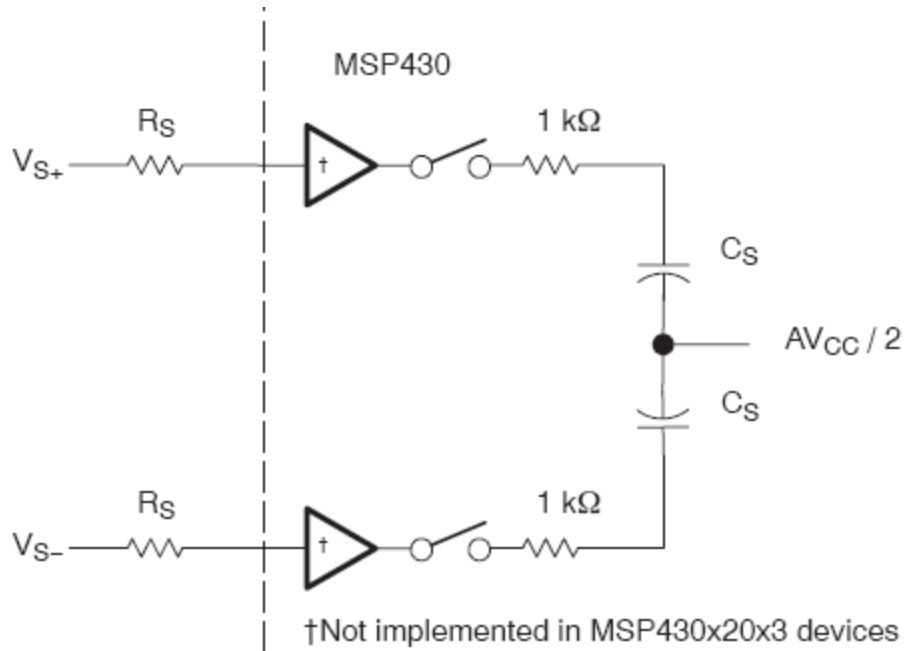
SD16BUFx	缓冲器	SD16频率f <sub>M</sub>
00	缓冲器禁止/	
01	低速/电流	f <sub>M</sub> < 200kHz
10	中速/电流	200kHz < f <sub>M</sub> < 700kHz
11	高速/电流	700kHz < f <sub>M</sub> < 1.1MHz

电路上需要加RC反锯齿滤波器来防止输入信号失真。调制器时钟1MHz且OSR=256时，截止频率应该< 10 kHz。在带宽要求较低的应用中，截止频率可以配置为低频。

### 17.2.6 模拟输入特性

SD16\_A 使用开关电容输入级，对外部电路就像一个阻抗，如图17-2

图 17-2. 模拟输入等效电路



$V_{S+}$ =正外部电源电压

$V_{S-}$ =负外部电源电压

$R_S$ =外部源阻抗

$C_S$ =采样电容器

当使用缓冲器时， $R_S$ 不影响采样频率。但当不使用缓冲器时，或片内没有缓冲器时，最大采样频率可以由采样电路的最小建立时间来计算：

$$t_s \leq (R_S + 1K\Omega) \times C_S \times \ln\left(\frac{V_{REF}}{GAIN \times 2^{17} \times V_{Ax}}\right)$$

$$\text{这里 } f_s = \frac{1}{2 \times t_s}, V_{Ax} = \left| \frac{AV_{CC}}{2} - V_S \right|$$

CS 对增益的设置如表17-2

表 17-2. 采样电容

PGA增益	CS
1	1.25 pF
2, 4	2.5 pF
8	5 pF
16, 32	10 pF

### 17.2.7 数字滤波器

数字滤波器用SINC<sup>3</sup>梳状滤波器来处理调制器的1位的数据流。传递函数的Z变换为：

$$H(z) = \left( \frac{1}{OSR} \times \frac{1 - z^{-OSR}}{1 - z^{-1}} \right)^3$$

频域传递函数为：

$$H(f) = \left[ \frac{\sin c(OSR p \frac{f}{f_M})}{\sin c(p \frac{f}{f_M})} \right]^3 = \left[ \frac{1}{OSR} \times \frac{\sin(OSR \times p \times \frac{f}{f_M})}{\sin(p \times \frac{f}{f_M})} \right]^3$$

这里过采样频率OSR是调制器频率 $f_M$ 与采样频率 $f_s$ 的比。图17-3表示OSR为32时的滤波器频率响应。第一个滤波器缺口是在 $f_s = f_M/OSR$ 处。缺口频率可以通过位SD16SSELx 和 SD16DIVx改变调制器频率 $f_M$ 来调节，过采样率用SD16OSRx和 SD16XOSR位来改变。每个使能的ADC通道的数字滤波器以采样频率 $f_s$ 完成数字位流的采样，并输出新的转换结果到SD16MEM0寄存器

图 17-3. 梳状滤波器的频率响应， with OSR = 32

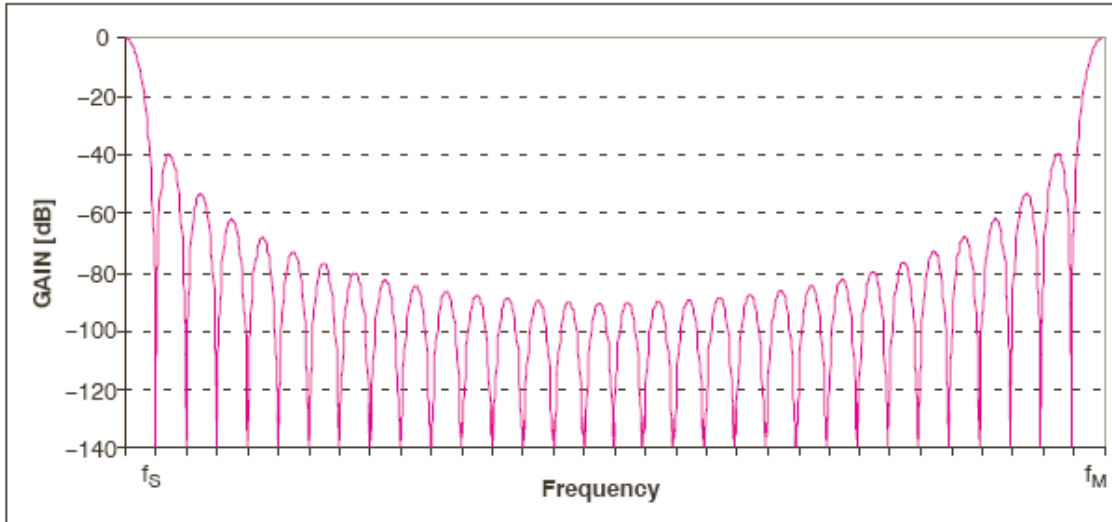


图17-4表示滤波器的阶跃响应和转换点。在开始转换后，对于输入的步进变化，必须在获得一个有效的转换结果之前允许一段建立时间。SD16INTDLYx位可以为ADC的输入全程范围提供足够的滤波建立时间。如果步进和数字滤波器的采样同时进行，数据会在第3次转换时有效。异步步进会在数据有效之前多一次转换。

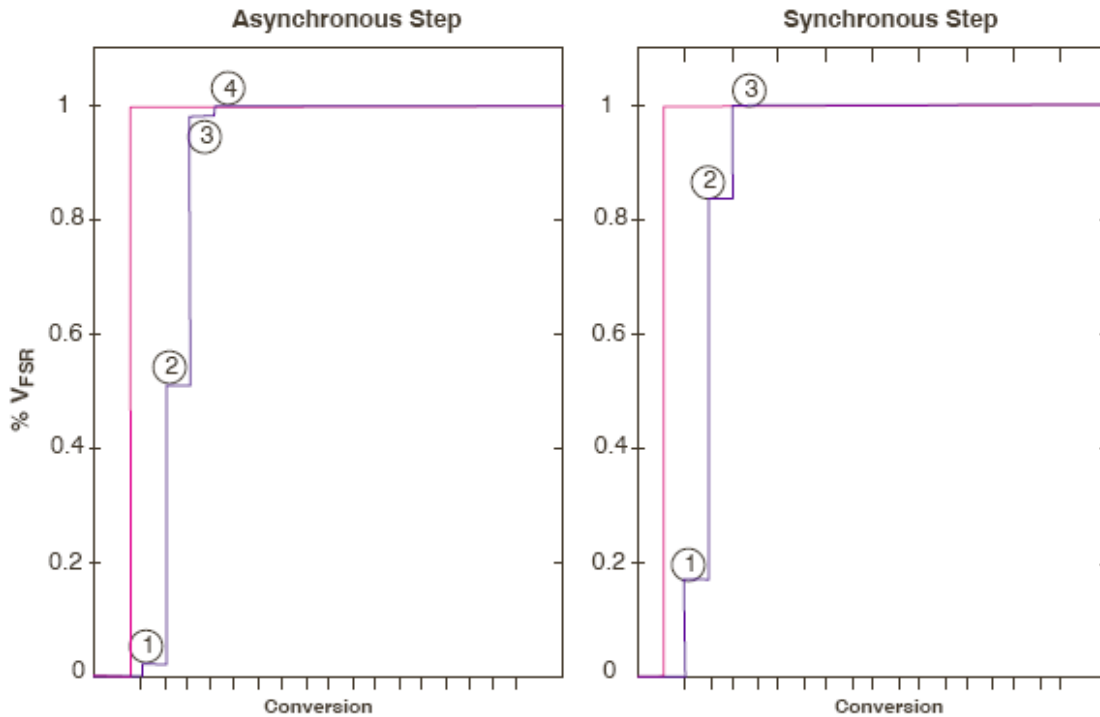
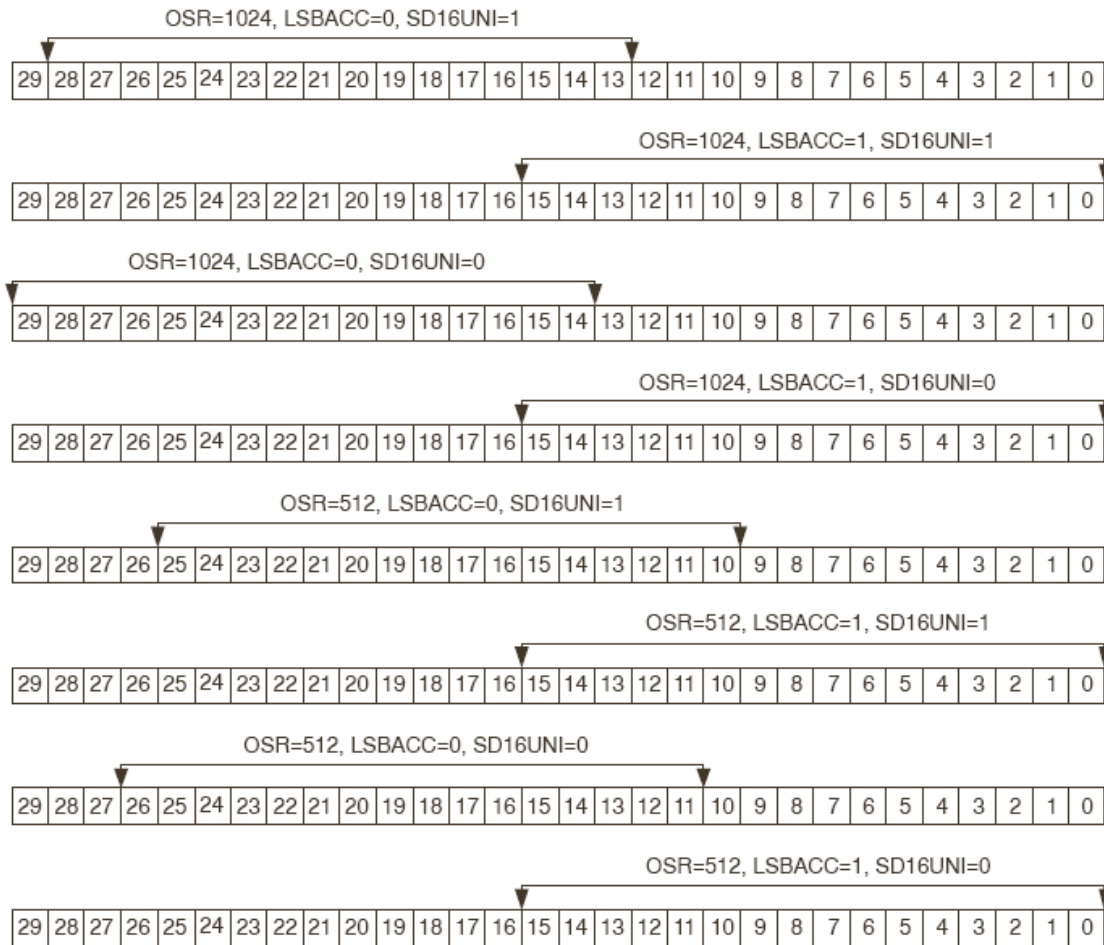


图 17-4. 数字滤波器阶跃响应和转换点

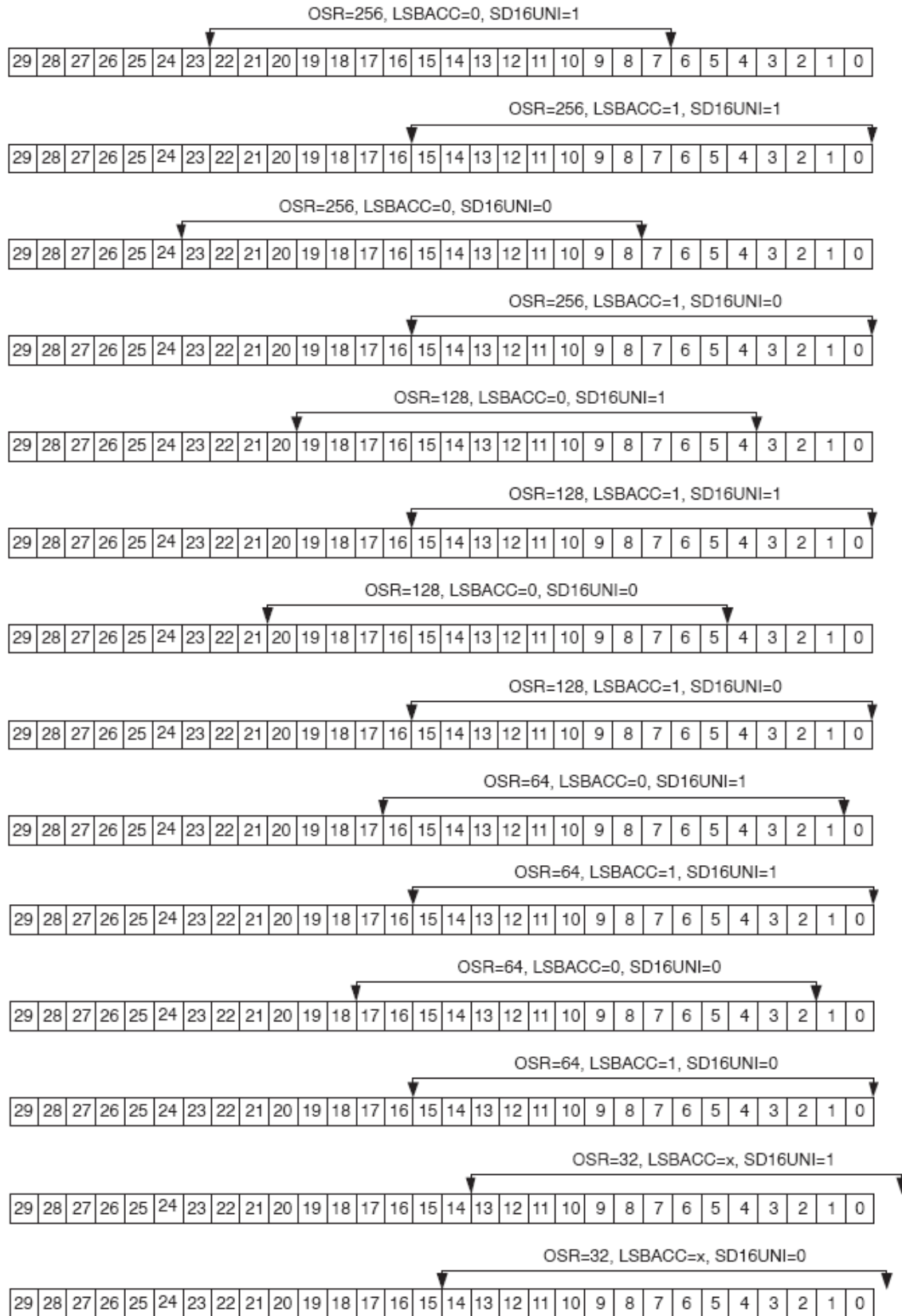
### 数字滤波器输出

数字滤波器输出的位数由过采样率决定，范围为15-30位。图17-5表示数字滤波器输出和在每个OSR, LSBACC, 和 SD16UNI下，他们与SD16MEM0的关系。例如，对于OSR=1024, LSBACC = 0, 和 SD16UNI = 1, SD16MEM0寄存器包含了数字滤波器输出的第28-13位。OSR= 32, 1个 (SD16UNI = 0) 或2个 (SD16UNI=1)LSB一般为0。SD16LSBACC 和 SD16LSBT0G位允许访问数字滤波器的LSB。当SD16LSBACC = 1时，数字滤波器的低16位可以用字指令从SD16MEM0读出。SD16MEM0寄存器也可以通过字节指令访问，但是只返回数字滤波器的低8位。当SD16LSBT0G = 1时，SD16LSBACC位在SD16MEM0被读取后自动翻转，这就让数字滤波器的输出结果可以通过2次读取SD16MEM0来完成。在下次SD16MEM0访问前，SD16LSBT0G的置位或复位并不改变SD16LSBACC的值。

图 17-5. 数字滤波器的输出使用位







### 17.2.8 转换存储寄存器：SD16MEM0

SD16MEM0寄存器和SD16A的通道相关联。转换结果随着每个数字滤波器的采样步进转移到SD16MEM0。当新数据写入SD16MEM0时，SD16IFG位置位。当SD16MEM0被CPU读取或被软件清除时，SD16IFG自动清0。

#### 输出数据格式

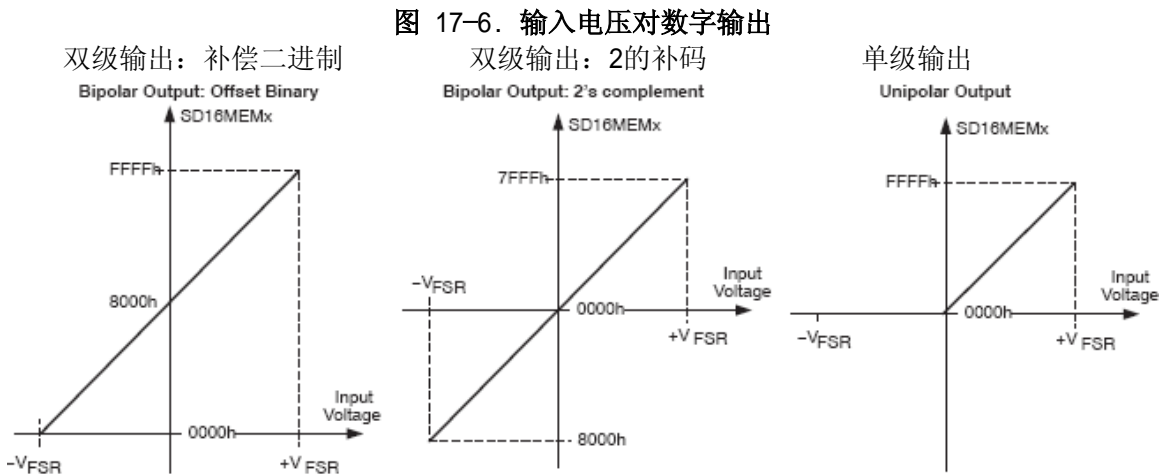
输出的数据格式可配置为2的补码、补偿二进制或单级模式，如表17-1。数据格式由SD16DF和SD16UNI位来选择。

表17-3. 数据格式

SD16UNI	SD16DF	格式	模拟输入	SD16MEM0†	数字滤波器输出（OSR=256）
0	0	双级补偿二进制	+FSR	FFFF	FFFFFF
			ZERO	8000	800000
			-FSR	0000	000000
0	1	双级二进制补码	+FSR	7FFF	7FFFFFFF
			ZERO	0000	000000
			-FSR	8000	800000
1	0	单级模式	+FSR	FFFF	FFFFFF
			ZERO	0000	800000
			-FSR	0000	000000

† 不受SD16OSRx 和SD16XOSR 设置的影响；SD16LSBACC = 0。

图 17-6 表示全程输入电压范围（-VFSR 到 +VFSR）和转换结果之间的关系。数据形式如图所示。



### 17.2.9 转换模式

SD16\_A 模块可以配置为2个操作模式，如表17-4所列，SD16SNGL 位可以选择转换模式。

表17-4. 转换模式摘要

SD16SNGL	模式	操作
1	单次转换	该通道只进行一次转换
0	连续转换	该通道进行连续转换

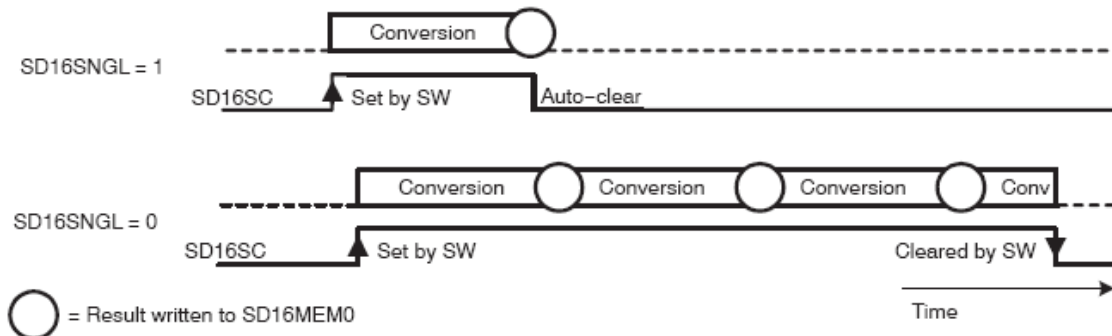
### 单次转换

当SD16SNGL = 1时，设置某通道的SD16SC位会初始化为单次转换。SD16SC位在转换结束后会自动清零。在转换完成之前清除SD16SC会立即停止该通道的转换，且该通道会关闭并相应的数字滤波器也会关闭。SD16MEM0的值在SD16SC清除时会改变。因此建议在SD16MEM0在清除SD16SC前读取，以避免读到一个无效的结果。

### 连续转换

当SD16SNGL = 0时，选择连续转换模式。当SD16SC置位时，该通道的转换开始，并连续执行直到SD16SC位由软件清除。清除SD16SC会立刻停止所选通道的转换，且该通道会关闭并相应的数字滤波器也会关闭。SD16MEM0的值在SD16SC清除时会改变。因此建议在SD16MEM0在清除SD16SC前读取，以避免读到一个无效的结果。图17-7 表示转换操作模式

图 17-7. 单通道操作模式



### 17.2.10 使用集成温度传感器

选择模拟输入通道SD16INCHx=110和SD16REFON = 1，就可以使用片内温度传感器了。任何其他配置和选择外部通道的配置操作都一样，包括SD16INTDLYx 和SD16GAINx的设置。因为内部参考电压在使用温度传感器时必须打开，因此不能使用外部参考电压作为温度传感器的电压转换。并且，内部参考电压会和外部参考电压产生竞争。在这种情况下，SD16VMIDON位可以设置为在转换中最小化竞争的影响。

典型的温度传感器传递函数如图17-8，当SD16A的一个通道选择为温度传感器时，必须使用SD16INTDLYx做适当的延时，以允许数字滤波器的建立和保证转换结果的正确性。温度传感器误差补偿可以被放大，并可以在大多数应用中被校准。详细参数见器件手册

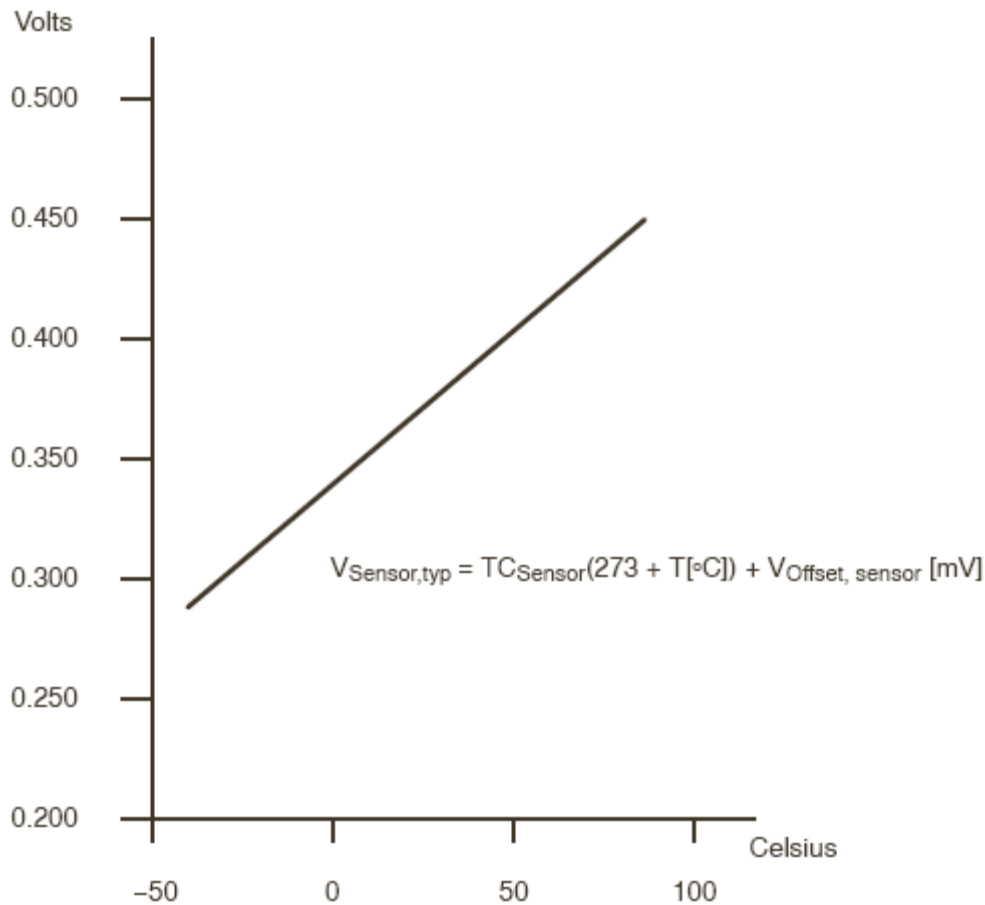


图 17-8. 典型的温度传感器传递函数

#### 17.2.11 中断操作

SD16\_A有2个中断源:

- I SD16IFG
- I SD16OVIFG

当SD16MEM0寄存器写入转换结果时, SD16IFG=1。如果相应的SD16IE位和GIE都为1时, 就会产生一个中断请求。如果前一个结果没有被读取, 而此时新的转换结果写入SD16MEM0时, SD16A就产生一个溢出条件。

#### SD16IV, 中断向量发生器

所有的SD16\_A 中断源是有优先级的, 并共用一个中断向量。SD16IV用于确定是SD16A的哪一个中断被允许了。SD16A的最高优先级中断请求在SD16IV中产生一个数字(见寄存器描述), 这个数字是一个可以被估计的数字, 或可以和程序计数器相加以实现软件子程序的自动进入。禁止SD16A的中断并不影响SD16IV的值。对SD16IV的读写不会影响SD16OVIFG 或 SD16IFG的值。SD16IFG在SD16MEM0被读取或软件清除后立即复位。SD16OVIFG只能由软件复位。如果在一个中断的服务子程序进入后, 另一个中断挂起, 就会产生另外一个中断。例如, 如果当中断服务子程序访问SD16IV时, SD16OVIFG和一个或多个SD16IFG中断被挂起, 首先响应SD16OVIFG中断, 并且相应的标志位必须用软件清除。在中断子程序的RETI指令执行完后, 执行挂起的SD16IFG中最高优先级的中断请求。

中断延时操作

SD16INTDLYx 位控制相应通道的第一次中断服务请求的时序。在一次完整的转换中，最多有4个转换周期来实现中断请求的延时，以便数字滤波器建立优先级来产生一次中断请求。延时在每次SD16SC置位或当SD16GAINx 或 SD16INCHx位被修改时发生。SD16INTDLYx所选择的延时周期数会禁止溢出中断的产生。被延时的转换的中断请求在延时期间不会产生中断。

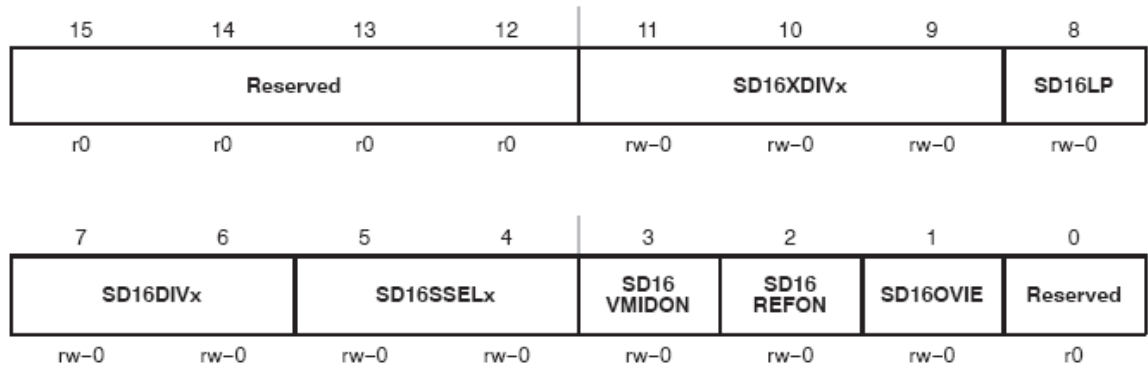
17.3 SD16\_A 寄存器

SD16\_A 寄存器列表如表17-5:

表 17-5.SD16\_A 寄存器

寄存器	简写	寄存器类型	地址	初始化状态
SD16_A控制寄存器	SD16CTL	读写	0100h	PUC复位
SD16_A中断向量寄存器	SD16IV	读写	0110h	PUC复位
SD16_A通道0控制寄存器	SD16CCTL0	读写	0102h	PUC复位
SD16_A转换存储器	SD16MEM0	读写	0112h	PUC复位
SD16_A输入控制寄存器	SD16INCTL0	读写	0B0h	PUC复位
SD16_A模拟允许寄存器	SD16AE	读写	0B7h	PUC复位

SD16CTL, SD16\_A 控制寄存器



保留位	15-12	保留位
SD16XDIVx	11-9	SD16_A时钟分频 000 /1 001 /3 010 /16 011 /48 1xx 保留
SD16LP	8	低功耗模式，该位选择一个低速，低功耗模式。 0 低功耗模式禁止 1 低功耗模式允许，SD16_A的最大时钟频率降低。
SD16DIVx	7-6	SD16A分频器 00 /1 01 /2 10 /4 11 /8

SD16SSEL	5-4	SD16_A时钟源选择 00 MCLK 01 SMCLK 10 ACLK 11 外部的 TACLK
SD16VMIDON	Bit 3	VMID缓冲打开 0 关闭 1 打开
SD16REFON	Bit 2	参考电压控制 0 参考电压打开 1 参考电压关闭
SD16OVIE	1	SD16_A溢出中断允许，GIE如果为1，可以允许该中断 0 溢出中断允许 1 溢出中断禁止
Reserved	0	保留位

## SD16CCTL0, SD16\_A 控制寄存器 0

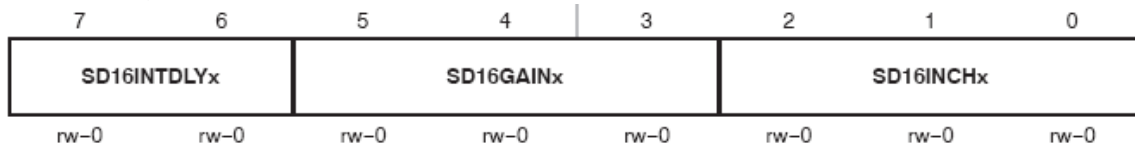
15	14	13	12	11	10	9	8
Reserved	SD16BUFx <sup>†</sup>		SD16UNI	SD16XOSR	SD16SNGL	SD16SRx	
r0	rw-0		rw-0	rw-0	rw-0	rw-0	
7	6	5	4	3	2	1	0
SD16LSBTOG	SD16LSBACC	SD16OVIFG	SD16DF	SD16IE	SD16IFG	SD16SC	Reserved
rw-0	rw-0	rw-0	rw-0	rw-0	rw-0	rw-0	r-0

<sup>†</sup>在MSP430x20x3 devices中不存在

Reserved	15	保留位
SD16BUFx	14-13	高阻抗输入缓冲模式 00 缓冲允许 01 低速/电流 10 中速/电流 11 高速/电流
SD16UNI	12	单级模式选择 0 双级模式 1 单级模式
SD16XOSR	11	扩展过采样率，该位和SD16SRx一起选择过采样率，见SD16SRx位的设置描述
SD16SNGL	10	单次转换模式选择 0 连续转换模式 1 单次转换模式
SD16SRx	9-8	过采样率位 SD16XOSR = 0                      SD16XOSR = 1

		00 256	00 512
		01 128	01 1024
		10 64	10 Reserved
		11 32	11 Reserved
SD16LSBT0G	7	LSB翻转，该位为1时，使SD16LSBACC在每次SD16MEM0读取时翻转	
		0 SD16LSBACC在每次SD16MEM0读取时不翻转	
		1 SD16LSBACC在每次SD16MEM0读取时翻转	
SD16LSBACC	6	LSB访问。该位允许访问SD16_A的高或低16位结果	
		0 SD16MEMx的内容是转换结果的MSB	
		1 SD16MEMx的内容是转换结果的LSB	
SD16OVIFG	5	SD16_A溢出中断标志	
		0 没有溢出中断挂起	
		1 有溢出中断挂起	
SD16DF	4	SD16_A数据格式	
		0 补偿二进制	
		1 2的补码	
SD16IE	3	SD16_A中断允许	
		0 禁止	
		1 使能	
SD16IFG	2	SD16_A中断标志。当新的转换结果有效时SD16IFG置位。当相应的SD16MEMx寄存器被读取或被软件清零时，SD16IFG自动复位。	
		0 没有中断挂起	
		1 有中断挂起	
SD16SC	1	SD16_A开始转换	
		0 没有转换开始	
		1 开始转换	
Reserved	0	保留	

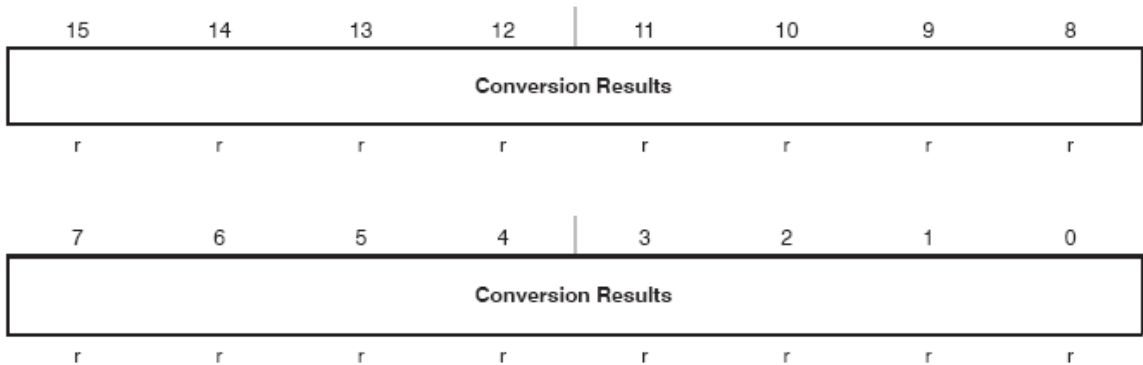
## SD16INCTL0, SD16\_A输入控制寄存器



SD16INTDLYx	7-6	在转换开始时，产生中断延迟。这些位选择在转换开始时，第一次中断的延迟	
		00 第4次采样发生中断	
		01 第3次采样发生中断	
		10 第2次采样发生中断	
		11 第1次采样发生中断	
SD16GAINx	5-3	SD16_A预放大增益	
		000 x1	
		001 x2	
		010 x4	
		011 x8	
		100 x16	
		101 x32	

		110	保留
		111	保留
SD16INCHx	2-0	SD16_A通道差分输入	
		000	A0
		001	A1
		010	A2
		011	A3
		100	A4
		101	A5- (AVCC – AVSS) / 11
		110	A6- 温度传感器
		111	A7- PGA短路补偿测量

SD16MEM0, SD16\_A 转换存储寄存器



Conversion Result 15-0  
转换结果。SD16MEMx寄存器保持数字滤波器输出的高或低16位结果，这由SD16LSBACC位来决定。

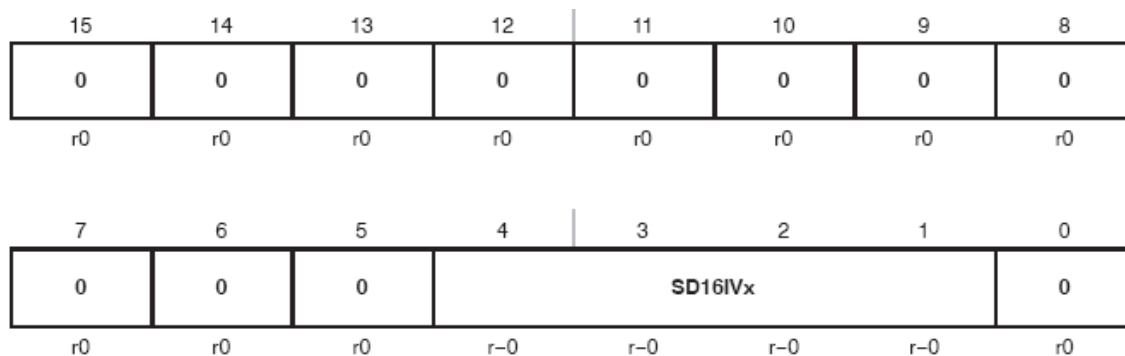
SD16AE, SD16\_A 模拟输入允许寄存器



SD16AEx 7-0 SD16\_A 模拟输入允许  
0 外部输入禁止。反向输入在内部接到VSS.  
1 外部输入使能

SD16IV, SD16\_A 中断向量寄存器





SD16IVx 15-0 SD16\_A 中断向量值

SD16IV的内容	中断源	中断标志	中断优先级
000h	没有中断挂起		
002h	SD16MEMx溢出	SD16CCTLx SD16OVIFG	最高
004h	SD16A中断	SD16CCTL0 SD16IFG	
006h	保留	-	
008h	保留	-	
00Ah	保留	-	
00Ch	保留	-	
00Eh	保留	-	
010h	保留	-	最低



MSP430F224x4 评估板

专业提供 **MSP430** 单片机开发工具