

ریزپردازنده (میکروکنترلرهای AVR) مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC)

محسن راجی

دانشگاه شیراز
بخش مهندسی و علوم کامپیوتر



مقدمه

- اغلب کمیت های موجود در دنیای پیرامون ما، کمیت های پیوسته یا آنالوگ هستند
- دما، فشار، حرارت، سرعت و دیگر کمیت های فیزیکی قابل اندازه گیری اطراف
- تغییرات این کمیت های به صورت کاملاً پیوسته رخ می دهد
- در چنین شرایطی، در صورت نیاز به اندازه گیری این کمیت ها، باید سیستم ها تمام مقادیر را به طور پیوسته اندازه گیری کرده و روی آن ها پردازش انجام دهد

مقدمه

- سیستم های موجود **دیجیتال** هستند و در نتیجه نمی توانیم یک کمیت پیوسته یا آنالوگ را مستقیماً به یک سیستم پردازشی دیجیتال اعمال کنیم
- راه حل این است که باید کمیت آنالوگ را به دیجیتال تبدیل کنیم و سپس آن را پردازش کنیم
- راه حل: استفاده از **مبدل های آنالوگ به دیجیتال**

3

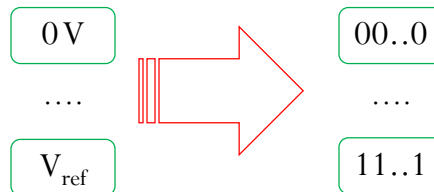
مقدمه

- فرض کنید یک سنسور LM35 خریداری می کنید که می توانید با آن دمای محیط را اندازه گیری کنید
- خروجی این سنسور ولتاژ است و به ازای هر درجه تغییر دما ۱۰ میلی ولت تغییر می کند
- می خواهید با یک میکروکنترلر AVR این تغییرات دما را اندازه گیری کرده و ثبت کنید
- اما برای AVR، فقط دو ولتاژ ۰ و ۵ ولت (معادل منطق صفر و یک) معنا دارند.
- نیاز به ترجمه مقادیر پیوسته به مقادیر صفر و یکی (دیجیتال) برای کار با سنسور دارید

4

مقدمه

- شمای کاری یک مبدل آنالوگ به دیجیتال



5

مقدمه

- رابطه مقدار دیجیتال خروجی متناسب با ولتاژ ورودی را می توان به صورت فرمول زیر نشان داد

$$\frac{V_{in}}{V_{ref}} = \frac{\text{مقدار دیجیتال}}{2^n - 1}$$

6

مفاهیم اولیه ADC

• اندازه گام

- هر ADC از یک مقدار کمتر تغییر در ورودی را نمی تواند اندازه گیری کند
- اندازه گام کوچکترین تغییری هست که یک مبدل آنالوگ به دیجیتال می تواند اندازه بگیرد.
- مثلا اگر اندازه گام برای یک ADC برابر با ۲۰ میلی ولت باشد، به این معناست که این ADC تغییرات ۵ میلی ولتی را متوجه نمی شود و هرگاه ولتاژ نسبت به مقدار قبلی ۲۰ میلی ولت بیشتر یا کمتر شود می تواند تغییرات را تشخیص دهد.

7

مفاهیم اولیه ADC

• زمان تبدیل

- زمان بین این که ورودی آنالوگ توسط ADC به **خروجی دیجیتال** تبدیل شود
- این زمان به منبع کلاک متصل به ADC، روشی که برای تبدیل استفاده می شود و تکنولوژی ساخت مبدل آنالوگ به دیجیتال بستگی دارد.

• رزولوشن

- رزولوشن یا وضوح یا درجه تفکیک
- **تعداد بیت** هایی که برای نمایش مقدار تبدیل شده استفاده می شود
- مثلا ADC در AVR ده بیتی است. این بدین معناست که خروجی دیجیتال در قالب ۱۰ بیت ارائه خواهد شد

8

مفاهیم اولیه ADC

• ولتاژ مرجع

- یک ولتاژ ورودی است که به عنوان مرجع استفاده شده و بازه تبدیل را مشخص می کند
- ولتاژ ورودی ADC می تواند بین صفر تا ولتاژ مرجع تغییر کند
- این ولتاژ به همراه رزولوشن اندازه گام را معلوم می کند
- اگر از ADC ده بیتی استفاده می کنید، اندازه گام به صورت روبه رو محاسبه می شود:

$$\frac{v_{ref}}{2^{10}}$$

9

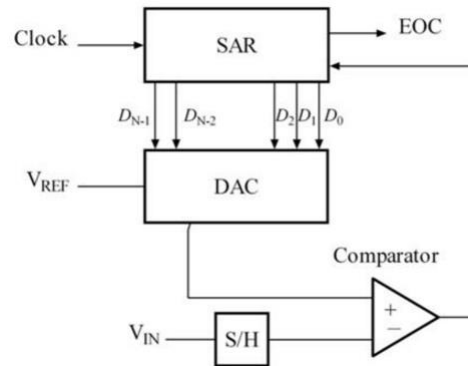
روش های تبدیل آنالوگ به دیجیتال

- به طور کلی ۶ روش برای تبدیل سیگنال های آنالوگ به دیجیتال وجود دارد
- روش موازی یا همزمان
- روش پله ای
- روش تقریب متوالی
- روش تبدیل ولتاژ به زمان (تک شیب)
- روش دو شیب
- روش تبدیل ولتاژ به فرکانس
- در میکروکنترلر های AVR از روش تقریب های متوالی برای تبدیل سیگنال های آنالوگ به دیجیتال استفاده می شود

10

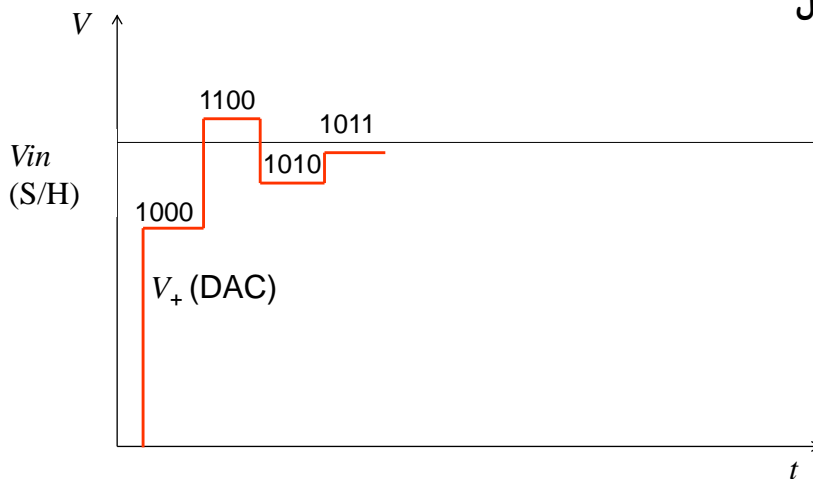
ADC

- تبدیل به روش تقریب های متوالی



11

- مثال



12

بررسی واحد ADC در میکروکنترلر AVR

- مبدل ADC در AVR ها بسته به نوع AVR از کانال های ورودی متعددی بهره می برد.
- ADC داخلی دارای دقت ۱۰ بیت است
- سرعت نمونه برداری آن حداکثر ۱۵ هزار نمونه در ثانیه است
- در این حالت زمان تبدیل بین ۶۵ تا ۲۵۰ میکرو ثانیه طول خواهد کشید.

(XCK/T0) PB0	1	40	PA0 (ADC0)
(T1) PB1	2	39	PA1 (ADC1)
INT2/AIN0 PB2	3	38	PA2 (ADC2)
OC0/AIN1 PB3	4	37	PA3 (ADC3)
(SS) PB4	5	36	PA4 (ADC4)
(MOSI) PB5	6	35	PA5 (ADC5)
(MISO) PB6	7	34	PA6 (ADC6)
(SCK) PB7	8	33	PA7 (ADC7)
RESET	9	32	AREF
VCC	10	31	GND
GND	11	30	AVCC
XTAL2	12	29	PC7 (TOSC2)
XTAL1	13	28	PC6 (TOSC1)
(RXD) PD0	14	27	PC5 (TDI)
(TXD) PD1	15	26	PC4 (TDO)
(INT0) PD2	16	25	PC3 (TMS)
(INT1) PD3	17	24	PC2 (TCK)
(OC1B) PD4	18	23	PC1 (SDA)
(OC1A) PD5	19	22	PC0 (SCL)
(ICP) PD6	20	21	PD7 (OC2)

13

ADC

- کانال ورودی
- Single-Ended: یک ورودی وجود دارد که ممکن است بین 0 تا Vcc (Vref) تغییر می کند
- Differential: دو ورودی از دو پایه با هم مقایسه می شوند و تفاضل این دو ورودی را شکل می دهد
- بعضی از ورودی های دیفرانسیلی بهره قابل برنامه ریزی دارند و قبل از انجام تبدیل ، ابتدا تقویتی روی ورودی انجام می شود.
- بهره ها 1X, 10X, 200X انجام می شود

14

ADC

- ولتاژ مرجع (V_{ref}) برای ADC از سه طریق تامین می شود
- ولتاژ مرجع داخلی $2.56v$
- ولتاژ روی پایه A_{ref} همراه با یک خازن و از طریق ورودی از خارج از میکرو
- ولتاژ روی پایه A_{vcc} در محدوده $\pm 0.3v$ از V_{cc} از طریق پایه ورودی از خارج از میکرو

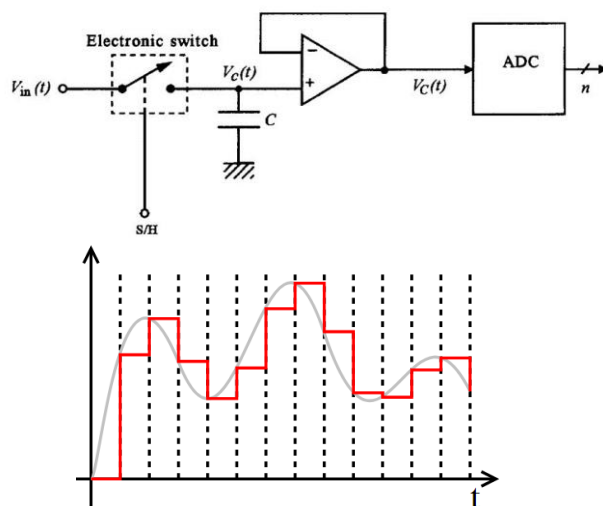
15

ADC

- ADC دارای یک مدار $sample \& hold$ است که باعث می شود ولتاژ ورودی ADC در حین تبدیل در سطح ثابتی نگه داشته شوند
- یک مدار آنالوگ که از ورودی (که مدام در حال تغییر است) نمونه بر می دارد (به صورت یک ولتاژ) و مقدار آن را برای یک محدوده زمانی مشخصی در یک سطح ولتاژ ثابت نگه می دارد.

16

مدار sample & hold و عملکرد آن



17

رجیستر های ADC

• رجیستر ADC Multiplexer Selection) ADMUX (Register

• MUX4:0

• ترکیب اتصال ورودی های آنالوگ متصل به ADC ورودی از کدام پایه دریافت می شود ADC0, ADC1 یا ...

• بهره تقویت کانال ها

• 10X (بهره تقویت) ADC0 (سر منفی)

• ADC1 (سر مثبت) 0001 (ورودی دیفرانسیلی)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	REFS1	REFS0	ADLAR	MUX4	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0	ADMUX
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

18

انتخاب بهره و کانال ورودی

Table 83. Input Channel and Gain Selections

MUX4..0	Single Ended Input	Positive Differential Input	Negative Differential Input	Gain
00000	ADC0	N/A		
00001	ADC1			
00010	ADC2			
00011	ADC3			
00100	ADC4			
00101	ADC5			
00110	ADC6			
00111	ADC7			
01000		ADC0	ADC0	10x
01001		ADC1	ADC0	10x
01010 ⁽¹⁾		ADC0	ADC0	200x
01011 ⁽¹⁾		ADC1	ADC0	200x
01100		ADC2	ADC2	10x
01101		ADC3	ADC2	10x
01110 ⁽¹⁾		ADC2	ADC2	200x
01111 ⁽¹⁾		ADC3	ADC2	200x
10000		ADC0	ADC1	1x
10001		ADC1	ADC1	1x
10010		ADC2	ADC1	1x
10011		ADC3	ADC1	1x

19

رجیستر های ADC

• ADLAR (Left Adjust Result)

- نحوه نمایش نتیجه تبدیل ADC در یک رجیستر داده ADC
- نتیجه تبدیل ADC در یک رجیستر ۱۶ بیتی (ADCH, ADCL) ذخیره می شود
- اگر $ADLAR = 0$ ← ۸ بیت کم ارزش تبدیل در ADCL و بقیه در ADCH
- اگر $ADLAR = 1$ ← از سمت چپ تنظیم می شود ۸ بیت پر ارزش در ADCH و بقیه در ADCL

20

رجیستر های ADC

- رجیستر های ADCH , ADCL (ADC Data Register)
- دو رجیستر ۸ بیتی
- اسلاید بعد نشان می دهد که اگر ADLAR برابر صفر باشد (بالا) و یا این که یک باشد (پایین) نتیجه چطور در رجیستر داده ذخیره خواهد شد

21

ADC رجیستر های

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	
	-	-	-	-	-	-	ADC9	ADC8	ADCH
	ADC7	ADC6	ADC5	ADC4	ADC3	ADC2	ADC1	ADC0	ADCL
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R	R	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	
	ADC9	ADC8	ADC7	ADC6	ADC5	ADC4	ADC3	ADC2	ADCH
	ADC1	ADC0	-	-	-	-	-	-	ADCL
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R	R	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	

22

رجیستر های ADC

- وقتی نتیجه تبدیل آنالوگ به دیجیتال کامل شود
- نتیجه در این دو رجیستر قرار می گیرد
- اگر از کانالهای دیفرانسیلی باشد نتیجه به صورت مکمل دو می باشد
- اگر از ADCL خوانده شود ، تا وقتی ADCH خوانده نشود ، این دو رجیستر بازنویسی نمی شوند

23

رجیستر های ADC

- اگر نتیجه از سمت چپ منظم شده باشد و تنها ۸ بیت دقت کافی باشد خواندن ADCH کافی است در غیر این صورت ابتدا باید ADCL خوانده شود

24

شروع عمل تبدیل در ADC

- برای انجام تبدیل باید بیت ADEN (ADC Enable) یک باشد

- عملیات تبدیل به روش های مختلفی ممکن است شروع شود:

- با یک کردن بیت ADSC در رجیستر ADCSRA

- این بیت تا زمانی که عمل تبدیل در حال انجام است ۱ باقی می ماند و با اتمام توسط سخت افزار پاک می شود

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	ADCSRA
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

25

شروع عمل تبدیل در ADC

- عملیات تبدیل به روش های مختلفی ممکن است شروع شود:

- تحریک خودکار

- در این حالت رخدادهای مختلفی موجب شروع شدن عمل تبدیل می شود (تحریک و تریگر شدن)

- به این منظور برای فعال کردن این قابلیت ، باید بیت ADATE در رجیستر ADCSRA را یک کرد

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	ADCSRA
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

26

شروع عمل تبدیل در ADC

- عملیات تبدیل به روش های مختلفی ممکن است شروع شود:

- تحریک خودکار

- منابع مختلف تحریک، با تنظیم بیت های ADTS واقع در رجیستر SFIOR مشخص می شوند.

ADTS2	ADTS1	ADTS0	ADHSM	ACME	PUD	PSR2	PSR10	SFIOR
-------	-------	-------	-------	------	-----	------	-------	-------

Table 85. ADC Auto Trigger Source Selections

ADTS2	ADTS1	ADTS0	Trigger Source
0	0	0	Free Running mode
0	0	1	Analog Comparator
0	1	0	External Interrupt Request 0
0	1	1	Timer/Counter0 Compare Match
1	0	0	Timer/Counter0 Overflow
1	0	1	Timer/Counter Compare Match B
1	1	0	Timer/Counter1 Overflow
1	1	1	Timer/Counter1 Capture Event

27

شروع عمل تبدیل در ADC

- عملیات تبدیل به روش های مختلفی ممکن است شروع شود:

- نکات تحریک خودکار

- تبدیل با یک لبه بالا رونده رخداد تعیین شده، تریگر می شود
- اگر پس از اتمام تبدیل، منبع تحریک همچنان یک باشد تبدیل بعدی انجام نمی شود حتی اگر حین تبدیل یک لبه بالارونده بیاید و اصطلاحاً تحریک انجام نشود، بدون تاثیر است و تبدیل انجام نمی شود

28

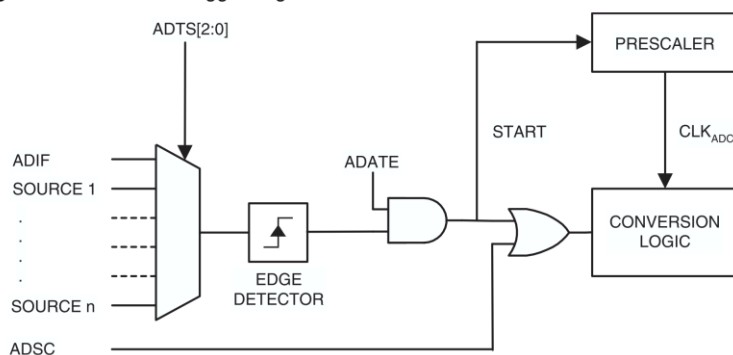
شروع عمل تبدیل در ADC

- ادامه...
- یک حالت خاص
- ADC به محض اتمام یک تبدیل، تبدیل جدیدی را آغاز می کند.
- مد Free Running ($ADTS = 000$)
- یعنی با نرخ ثابتی به طور مداوم نمونه برداری می کند و رجیستر های داده خودش را بازنویسی می کند
- در این حالت، پرچم وقفه ADC (یعنی ADIF) به عنوان منبع تریگر استفاده می شود
- نکته: برای شروع اولین تبدیل بیت ADSC باید یک شود و در ادامه، تبدیل به طور مداوم انجام می شود

29

دیاگرام شروع عملیات تبدیل

Figure 99. ADC Auto Trigger Logic



30

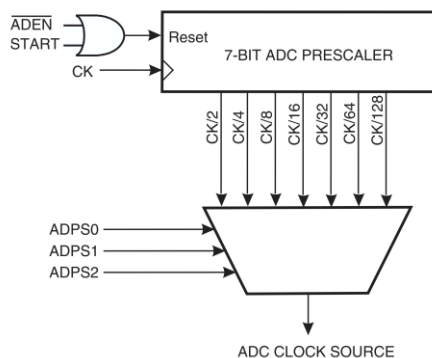
تقسیم فرکانس و چگونگی زمانبندی تبدیل ADC

- فرکانس پالس ساعت شمارنده ۱۰ بیتی ADC از تقسیم فرکانسی پالس ساعت میکرو به دست می آید
- کلاک کاری بایستی بین 50 تا 200 KHz باشد
- بیت های ADPS2:0 از رجیستر ADCSRA را باید برای تقسیم فرکانس تنظیم نمود
- این تقسیم فرکانسی با فعال شدن بیت ADEN فعال شده و با صفر شدن ADEN در حالت Reset باقی می ماند و غیر فعال می شود

31

تقسیم فرکانس و چگونگی زمانبندی تبدیل ADC

Figure 100. ADC Prescaler



32

رجیستر های ADC

• رجیستر ADCSRA (ADC Control & Status) (Register A)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	ADCSRA
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

33

رجیستر های ADC

- **ADEN** : با یک کردن این بیت مبدل ADC فعال می شود
- در صورتی که ADC در حال تبدیل باشد با صفر کردن این بیت ADC غیر فعال شده و تبدیل نیمه کاره رها خواهد شد
- **ADSC** : در مد عملکرد single با نوشتن یک در این بیت ، تبدیل شروع شده و پس از پایان تبدیل به صورت خودکار صفر می شود در مد free یک کردن این بیت برای شروع الزامی است

34

رجیستر های ADC

ADATE

- با یک کردن این بیت Auto Trigger و با لبه بالا رونده منبع تحریک کننده شروع به تبدیل می کند.
- منبع تحریک کننده ADC توسط بیت های ADTS از رجیستر SFIOR انتخاب می شود.

35

رجیستر های ADC

ADIF

- با اتمام تبدیل ADC و تغییر محتویات رجیستر داده ADC این بیت یک خواهد شد در این صورت اگر قبلا وقفه ADC فعال شده باشد ، روتین وقفه مربوطه اجرا می شود

ADIE

- در صورت فعال کردن این بیت هنگام اتمام تبدیل ، وقفه اتمام تبدیل رخ خواهد داد البته اگر I در SREG نیز فعال باشد

36

رجیستر های ADC

ADPS2:0 •

- این بیت ها تعیین کننده پالس ساعت اعمالی به ورودی پالس ساعت ADC می باشند و با توجه به مقدار این بیت ها تقسیمی از کلاک ADC (CLK_{ADC}) به آن اعمال خواهد شد

37

رجیستر های ADC

بیت های ADTS2:0 در SFIOR •

- مقدار این بیت ها منبع تریگر تبدیل آنالوگ به دیجیتال را مشخص می کند در این صورت تبدیل با لبه بالا رونده سیگنال تریگر می شود

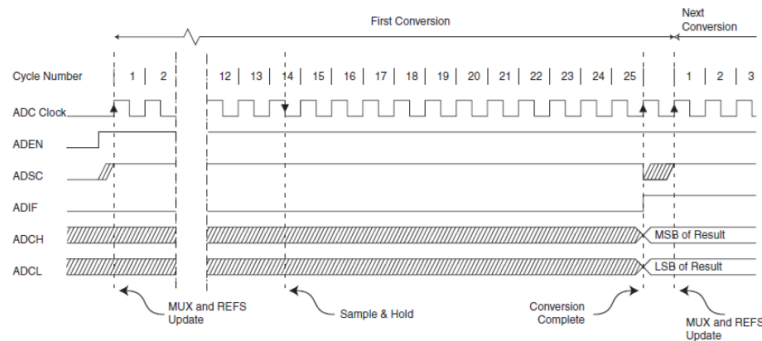
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADTS2	ADTS1	ADTS0	ADHSM	ACME	PUD	PSR2	PSR10	SFIO
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

38

زمانبندی تبدیل ADC

• زمانبندی ADC در مد Single conversion

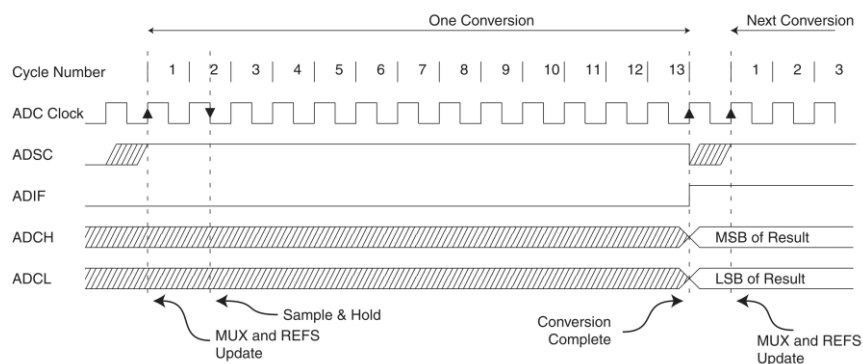
Figure 101. ADC Timing Diagram, First Conversion (Single Conversion Mode)



39

زمانبندی تبدیل ADC

Figure 102. ADC Timing Diagram, Single Conversion

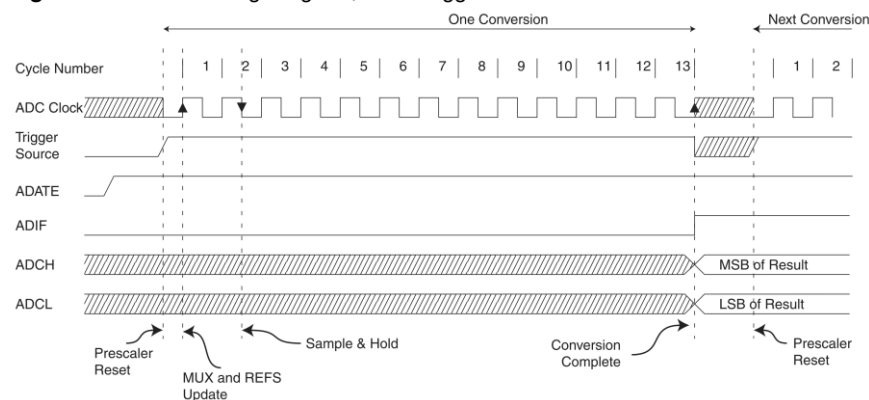


40

زمانبندی تبدیل ADC

• زمانبندی ADC در مد تحریک خودکار

Figure 103. ADC Timing Diagram, Auto Triggered Conversion

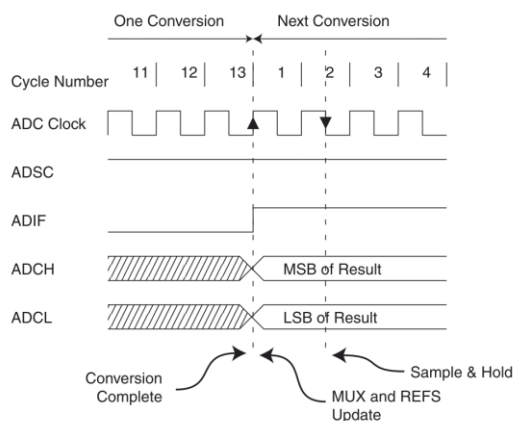


41

زمانبندی تبدیل ADC

• زمانبندی ADC در مد Free Running

Figure 104. ADC Timing Diagram, Free Running Conversion



42

زمانبندی تبدیل ADC

Table 80. ADC Conversion Time

Condition	Sample & Hold (Cycles from Start of Conversion)	Conversion Time (Cycles)
First conversion	14.5	25
Normal conversions, single ended	1.5	13
Auto Triggered conversions	2	13.5
Normal conversions, differential	1.5/2.5	13/14

43

کانال‌های تفاضلی

- در ورودی تفاضلی، تفاوت (ولتاژ/جریان/مقدار) بین دو ورودی که در یک محدوده هستند به عنوان ورودی در نظر گرفته می شود
- در حالی که در ورودی Single-Ended مقدار یک ورودی نسبت به یک مقدار مرجع (زمین) به عنوان ورودی در نظر گرفته می شود
- مزیت ورودی تفاضلی : تحمل پذیری بیشتر در برابر نویز
- زیرا اگر نویز رخ دهد هر دو ورودی را تحت تاثیر قرار می دهد و چون به یک میزان کم یا زیاد می شوند اثر نویز خنثی می شود

44

ADC

- نتیجه تبدیل ADC برای n بیت
- در حالت ورودی single-ended

$$\frac{V_{in}}{V_{ref}} = \frac{\text{مقدار دیجیتال}}{2^n - 1}$$

- در حالت ورودی تفاضلی

$$ADC \text{ مقدار دیجیتال} = 2^{n-1} * \frac{(V^+ - V^-) * Gain}{V_{ref}}$$

- V^+ ولتاژ روی پایه مثبت و V^- آن روی پایه منفی ورودی تفاضلی
- Gain: بهره انتخابی برای تقویت کانال تفاضلی
- V_{ref} : ولتاژ مرجع
- باید توجه داشت در حالت تفاضلی نتیجه به صورت مکمل ۲ از (-512) تا (1FFh) تغییر می کند