

基于 STM32 微控制器的过采样 技术研究与实践

吴家平, 沈建华

(华东师范大学 计算机科学与技术系, 上海 200241)

摘要:针对微控制器自带 ADC 精度较低而外部高精度 ADC 价格较高的情况,介绍了过采样技术提高微控制器 ADC 精度的基本原理,对其在基于 Cortex-M3 内核的 STM32 微控制器上的实现进行了可行性分析。经过初步数据分析,证明过采样技术可以在该微控制器上实现。结合微控制器特性,给出了具体的软件实现方法,并对其进行了测试。论文在最后还对过采样技术给处理器带来的负荷以及其本身的局限性进行了分析。实验证明,在 STM32 微控制器上使用过采样技术,能够减小处理器负荷,有效地提高其自带 ADC 的精度。

关键词:量化;过采样;抽取;DMA

中图分类号: TP335

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)02-0209-04

Study and Implementation of Oversampling Technology Based on STM32

WU Jia-ping, SHEN Jian-hua

(Department of Information Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Due to low resolution of ADC in the micro controller unit and increase of cost if external ADC of high resolution is used, the oversampling technology is introduced to improve the resolution of ADC. Introduce the theory of the oversampling technology and analyse the feasibility of the specific realizing on the Cortex-M3 Core-based STM32 micro controller unit. By analyzing the raw data, the technology is approved feasible on the micro controller unit. According to the specific characteristic of the micro controller unit, the concrete software realizing method is provided and tested. At last, the affect to processor by the technology and the limitation of the technology itself is analyzed. The practical experiment and the results approve that the oversampling technology can effectively improve the resolution of ADC in STM32 micro controller unit, while not increasing the load of processor.

Key words: quantization; oversampling; decimation; DMA

0 引言

由于数据采样的广泛需求,当前市场上的大多数微控制器都在内部集成了 ADC 用来采样数据。但是在很多情况下,这些自带的 ADC 往往达不到应用所需要的精度,而使用外部专用的 ADC 通常会使得成本有所增加。过采样技术无须添加额外的硬件,仅仅通过软件的方法就能够实现 ADC 精度的提高,从而使得片上自带的 ADC 能够实现昂贵的片外 ADC 的精度指标。

STM32 系列 32 位微控制器使用 ARM 公司的 Cortex-M3 处理器,该处理器专门设计于满足集高性能、低功耗、实时应用、具有竞争性价格于一体的嵌入式领域的要求。但是其自带的 ADC 只有 12 位精度,在某些场合满足不了要求,通过引入过采样技术,能够有效地增加数据采样精度,解决了使用外部专用 ADC 带来的成本问题。

能、低功耗、实时应用、具有竞争性价格于一体的嵌入式领域的要求。但是其自带的 ADC 只有 12 位精度,在某些场合满足不了要求,通过引入过采样技术,能够有效地增加数据采样精度,解决了使用外部专用 ADC 带来的成本问题。

1 过采样技术原理

1.1 量化噪声分析

ADC 采样过程其实是一个将连续的模拟信号量化成有限的数字的过程,每个数字代表一次采样所获得的信号。量化时,根据数据位把整个幅度划分为量化级,例如 12 位数据位则表示 2^{12} 个量化级,16 位数据则表示 2^{16} 个量化级,把落入同一级的样本值归为一类,并给定一个量化值。由于模拟信号是连续的,量化结果和被实际模拟量的之间会存在差值,该差值被称为

收稿日期:2009-05-25;修回日期:2009-08-30

作者简介:吴家平(1986-),男,江西鹰潭人,硕士研究生,研究方向为嵌入式系统;沈建华,副教授,研究方向为嵌入式系统。

作量化误差 (e_q), 也称量化噪声^[1]。

根据参考电压 (V_{ref}) 和量化的数字的位数 (N), 能够确定最小的分辨率^[2]:

$$\Delta = \frac{V_{ref}}{2^N} \quad (1)$$

N 越大, Δ 就越小, 量化误差也就越小。在没有其它能造成误差的因素例如热噪声、杂色噪声、参考电压变化的理想情况, 量化误差应该在 $\pm 0.5\Delta$ 之内, 即 $|e_q| \leq \pm 0.5\Delta$ 。假设输入信号的变化大于 Δ , 并且在 Δ 间是随机分布 (即量化误差随机, $P(e_q) = 1$) 的时候, 可以将量化噪声看成白噪声^[3], 其总功率为一个常数, 平均分布在 $0 \sim f_s$ 的频带内, 如图 1 所示。

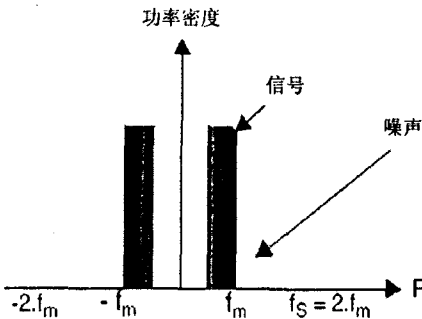


图 1 噪声功率分布 ($f_s = 2f_m$)

上图中 f_m 为输入信号的频率, f_s 为采样频率 (根据 Nyquist 定理, 采样频率必需至少是信号频率的两倍, 否则高频部分将有损失, 所以最小的 f_s 必须为 $2 \cdot f_m$ ^[4])。由于噪声总功率一定, 所以 f_s 越大, 叠加在信号部分的量化噪声就越小, 图 2 显示了将采样频率提高到 N 倍后的量化噪声的分布。

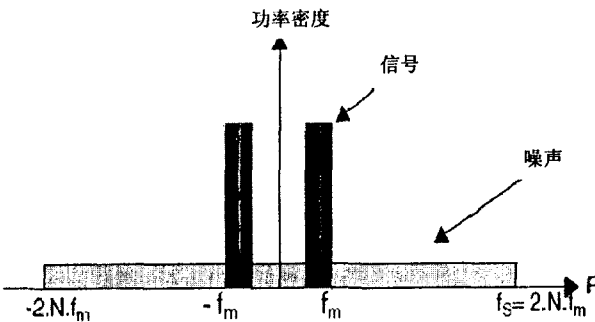


图 2 噪声功率分布 ($f_s = 2Nf_m$)

1.2 过采样率和精度之间的关系

根据前面的假设, 量化噪声为白噪声, 则可以通过计算量化误差的方差来得到平均噪声功率。

$$E(e_q^2) = \sigma^2 = \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} (P(e_q) * e_q^2) de_q = \frac{\Delta^2}{12} \quad (2)$$

给定 ADC 采样频率 f_s , 由于量化噪声在 f_s 频带内随机分布, 所以可以算出量化噪声的功率密度:

$$PSD = \frac{\sigma^2}{f_s} \quad (3)$$

而真正对采样有影响的是出现在输入信号频率范围内的量化噪声, 这部分量化噪声的功率可以通过对功率密度 PSD 在 $-f_m \sim f_m$ 频带上积分来得到:

$$\eta^2 = \int_{-f_m}^{f_m} \frac{\sigma^2}{f_s} df = \sigma^2 * \frac{2 * f_m}{f_s} = \Delta^2 * \frac{2 * f_m}{12 * f_s} \quad (4)$$

将 $\frac{f_s}{2f_m}$ 称作过采样率, 记为 OSR, 将公式 (1) 代入公式 (4) 后得到:

$$\eta^2 = \frac{V_{ref}^2}{12 * OSR * 4^N} \quad (5)$$

两边以 2 为底求对数后得到:

$$\log_2 \eta^2 = -\log_2 OSR - 2N - \log_2 12 + 2 * \log_2 V_{ref} \quad (6)$$

如果不进行过采样, 即 $OSR = 1$, 此时

$$\log_2 \eta^2 = -2 * N - \log_2 12 + 2 * \log_2 V_{ref} \quad (7)$$

若需要提高 p 位精度, 即

$$\log_2 \eta^2 = -2 * (N + p) - \log_2 12 + \log_2 V_{ref} \quad (8)$$

由公式 (6) 和公式 (8) 可得

$$OSR = 4^p \quad (9)$$

也就是说, 通过 4^p 倍的过采样, 能够将原来的数据精度提高 p 位。

1.3 过采样数据的抽取

以 4^p 过采样率得到的采样值通过求和、平均的方法进行处理。但是不能将这 4^p 个采样值相加后简单的除以 4^p , 这样只能起到一个低通滤波的作用, R 位的采样值经过这样平均后精度仍旧是 R 位, 并不能实现采样精度的提高^[5]。数据抽取方法首先将 4^p 个采样值相加, 得到一个 $R + 2p$ 位的数值, 然后将该数值右移 p 位, 得到一个 $R + p$ 位的数值, 这个数值才是最终提高了 p 位精度的采样结果。

1.4 进行过采样的前提条件

过采样技术并不是在任何情况下都能很好地发挥作用的, 如果要使用过采样来增加采样精度, 必须满足下面两个条件:

(1) 输入信号里必须存在一些噪声, 这些噪声必须是白噪声, 功率平均分配在整个有用的频带内。

(2) 噪声的幅度必须能够对输入信号产生足够大的影响, 以使得 ADC 转换的结果能随机地翻转至少 1 位, 否则的话所有的输入信号将会转换成同样的值, 对这些值进行的抽取操作将不会带来精度的提高。

在大多数应用中, 内部 ADC 的热噪声以及输入信号本身的变化足以使得以上条件成立。如果热噪声不足以使输入信号随机地翻转 1 位, 那么必须人为的在输入信号中引入一定的噪声。引入的噪声不应和输

入信号线性相关,并且必须能使得 ADC 转换结果随机地在相邻的量化值之间翻转。

2 过采样技术在 STM32 上的实现

2.1 STM32 片上 ADC 的特性

STM32 内部自带 12 位的 ADC^[6]。该 ADC 具有 16 个输入信号通道,通过配置采样序列寄存器,这些通道能以任意的顺序轮流进行采样。该 ADC 还具有自动校验功能,可以显著地减小采样的误差。STM32 上 ADC 的结构见图 3。

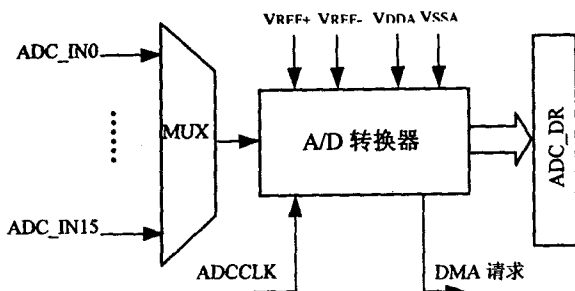


图 3 STM32 内部 ADC 框图

图 3 中 ADCCLK 为 ADC 时钟,在 CPU 时钟为 56MHz 的情况下,ADCCLK 可达 14MHz。在最高速转换的情况下,只需要 14 个 ADC 时钟周期就能完成一次采样,因此可达到 1Msps 的采样速度。

STM32 内部具有 2 个 DMA 控制器,共有 12 个通道,用于外设和存储器以及存储器和存储器之间的快速数据传输。ADC 每完成一次采样,就可以产生一次 DMA 请求,如果相应的 DMA 通道被使用,采样值就可以通过 DMA 直接传输到 SRAM,不需要 CPU 的干预,使得大部分时间里,CPU 和数据传输处于并行操作,因此可以使整个系统的效率大大提高。

STM32 内嵌了 8 个 16 位的定时器,具有捕获比较、输入/输出比较、PWM 和单脉冲等工作模式。定时器时钟可以设置为和 CPU 时钟一样大小,从而能够精确地产生 μs 级的定时。

设计中使用了 STM32 系列中的 STM32F103C。

2.2 STM32 上过采样条件检测

为了确保过采样技术使用的正确性,在正式设计软件代码之前对系统是否满足过采样条件进行了检验。实验过程中输入信号的频率为 50Hz,根据 Nyquist 定律,采样率至少为 100Hz。在 100Hz 的采样率下,分别向系统 ADC 提供 0.0000V,1.7000V 和 3.4000V 输入信号,采样值不经过处理直接送到 PC 机上,通过 Excel 软件观看得到的数据。

图 4 为信号为 1.7000V 时采样值中的 200 个数据。

从图 4 中可以看到,系统中的噪声能够使得输入信号翻转 1~2 位,并且噪声的分布近似是随机的,从而可以将其看成白噪声。所以在该系统上,已经满足了进行过采样所需要的条件,无须再人为地给输入信号引入白噪声。

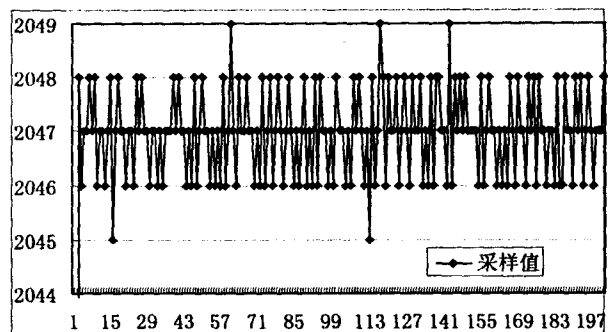


图 4 采样数据图(输入信号=1.7000V)

2.3 软件设计

软件系统主要包括系统初始化和中断处理两大模块。

2.3.1 系统初始化模块

该部分主要对 STM32 的 CPU 时钟、ADC、DMA、定时器进行初始化。

为了将精度提高 4 位,50Hz 的输入信号需要至少 $50 \times 2 \times 4^4 = 25.6\text{kHz}$ 的采样频率。通过将 CPU 时钟设为 56MHz,ADC 时钟分频系数设置为 8,转换时间设为 242 个 ADC 时钟周期,使得 ADC 的采样率为 29kHz,即能满足采样频率的要求,又不会占用 CPU 时间。定时器设置为每 10ms 产生一次中断,在定时器中断中启动一次 DMA 传输,DMA 传输源设置为 ADC 数据寄存器,传输目的为一块 256 半字的缓存,传输量为 256 个半字(每个采样值为一个半字),这样使得实际的采样值获取频率为 25.6kHz。

2.3.2 中断处理模块

在 DMA 传输完成中断处理程序中对获得的 256 个采样值进行求和,得到的和进行以下处理^[8]:

(1)右移 8 位,得到一个 12 位的采样值,该值作为一个经过均值滤波的采样结果,将用于过采样结果的参照。

(2)右移 4 位,得到一个 16 位的采样值,该值作为最终的过采样结果。

得到的这两种数据通过串口送到 PC 进行显示。

2.4 测试结果

实验中所使用的标准信号源为 VICTOR11+,输出分辨率 0.0001V,实验对不同范围的输入信号进行测量,得到的数据如表 1 所示。

由采样结果可以看到,使用过采样技术采集的数

据能够基本达到 14 位的精度。

表 1 采样结果

输入信号 单位:V	普通采样		过采样	
	理论值 (12 位)	实际采样值 (12 位)	理论值 (16 位)	实际采样值 (16 位)
0.1111	133	134	2141	2149~2150
0.4111	495	495	7924	7927~7929
0.8111	977	978	15634	15642~15645
1.2111	1459	1460	23344	23355~23358
1.6111	1940	1941	31054	31064~31068
2.1111	2543	2544	40692	40713~40718
2.7111	3266	3268	52257	52281~52286
3.1111	3747	3749	59967	59986~59992

3 处理器负荷分析

在该软件系统中,处理器主要的时间花在 DMA 的传输完成中断处理上,其中最占时间的是 256 个数据的循环累加。

由于 STM32 系列微控制器采用了 Cortex-M3 处理器,而 Cortex-M3 处理器的核心是基于哈佛架构的 3 级流水线内核,该内核集成了分支预测技术,所以达到了 1.25 DMIPS/MHz 的优越性能。在 56MHz 的系统时钟下,指令周期 = $1/(1.25 \times 56) = 0.01423\mu\text{s}$ 。通过反汇编可以看到,每次累加需要 6 条指令(虽然其中包含了 LDR 和 BCC 指令,但由于指令顺序经过编译器调整,内核又使用了分支预测,所以流水线能保证每个机器周期吐出一条指令^[7]),256 次累加总共用到 $256 \times 6 = 1536$ 条指令,执行时间 = $1536 \times 0.01423 \approx 21.857\mu\text{s}$ 。也就是说在 10ms 的采样间隔时间内,处理器只需要花费 21.857 μs 去处理数据,由此可计算处理器使用率 = $0.021857/10 \approx 0.22\%$ 。由此可见处理器并不会因为过采样数据的处理而受到很大的影响。

4 STM32 上过采样对输入信号频率的限制

根据 Nyquist 定律,采样频率必须是输入信号的 2 倍才能将信号还原,当需要提高 p 位采样精度的时

候,频率又得提高 4^p 倍。STM32 上的 ADC 能达到的最高采样率为 1MHz,如果要达到 16 位的精度,那么输入信号的频率就不能够超过 $1\text{M}/2/256 = 2\text{kHz}$ 。

5 结束语

过采样技术的应用,能够有效地利用低精度的 ADC 获得高精度的采样结果,这使得本来需要使用昂贵的外部专用 ADC 的微控制器仅使用自带的 ADC 就能够达到应用要求,在一定程度上节约了成本。

当然,过采样技术的使用必须具备一定的前提条件,并且使用过采样技术后对输入信号频率具有一定局限性。过采样技术对 CPU 的负荷也是有一定的影响的,但是由于 STM32 采用了高性能的 Cortex-M3 处理,并且采用了 DMA 在外设和 SRAM 之间进行直接数据传输,使得过采样技术不会给 STM32 处理器增加太大负荷。

参考文献:

- [1] Schafer R. Discrete-time signal processing[M]. New Jersey: Prentice Hall,1999.
- [2] Karema T, Ritoniemi T, Tenhunen H. A 20-bit sigma-delta D/A converter prototype for audio applications[M]//of 1991 IEEE Int. Conference on A/D and D/A Conversion. UK:[s. n.],1991:136-141.
- [3] Cygnal. Application Note An18 UAS[EB/OL]. 2003. <http://www.cygnal.com/suport/application.htm/<<Improving ADC resolution by Over sampling and Averaging>>>
- [4] 许勇,叶刚,卞青青,等.基于 A/D 转换最小二乘法的数据采集应用[J]. 微计算机信息,2009,4(2):280-282.
- [5] 阮双喜.基于 ARM 的气象数据采集系统的研制[J]. 吉林大学学报,2006,24(2):222-223.
- [6] 王永宏,徐伟,郝立平. STM32 系列 ARM Cortex-M3 微控制器原理与实践[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [7] Sloss A N, Symes D. ARM 嵌入式系统开发——软件设计与优化[M]. 沈建华,译. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [8] 张俊. 匠人手记[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.

(上接第 208 页)

- [13] Ashburner M, Ball C A, Blake J A, et al. Gene ontology: tool for the unification of biology[J]. Nature Genetics, 2000(25): 25-29.
- [14] Pan Y X, Zhang Z Z, Guo Z M, et al. Application of pseudo amino acid composition for predicting protein subcellular loca-

tion: stochastic signal processing approach[J]. Journal of Protein Chemistry, 2003(22):395-402.

- [15] 王克龙. 离散小波变换分析蛋白质序列相似性[D]. 成都:四川大学,2004.