

基于等效采样的 TIADC 通道失配校准方法*

向前¹ 刘洪庆^{1,2} 包思云¹

(1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555; 2. 电子信息测试技术安徽省重点实验室 蚌埠 233010)

摘要: 本文针对 TIADC(时域交替模数转换器)的通道失配校准存在过程复杂、计算量大的问题,设计了一种高效的通道失配校准方法。基于等效采样原理,将单个 ADC 多个周期的采样数据重叠显示在一个周期内,通过比较各个 ADC 重叠波形的平均值、幅值范围和相位,即可实现同时校准偏移失配、增益失配和时间失配,免除了频域转换或正弦拟合等步骤。仿真和实际测试结果表明,本文方法能准确测量上述失配误差,在显著提升 TIADC 性能的同时,能有效降低校准的复杂性,减小运算量。

关键词: TIADC; 校准; 通道失配; 等效采样

中图分类号: TM935.37 TN911.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Correction method for channel mismatches errors in TIADC system based on the principle of equivalent sampling

Xiang Qian¹ Liu Hongqing^{1,2} Bao Siyun¹

(1. The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China; 2. Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, Bengbu 233010, China)

Abstract: This paper proposes an efficient channel mismatch correction method for TIADC (time-interleaved analog-to-digital converter) system, in order to overcome the complexity and inefficiency of the conventional correction method. Based on the principle of equivalent sampling, the sampling data of a certain number of cycles is overlapped to one cycle high-resolution data, from which all parameters needed to correct channel mismatch, such as average value, amplitude range and phase, can be acquired. According to these parameters, the proposed method can correct offset error, gain error and time skew directly, so avoid the great calculation of FFT or curve fitting. Simulation and application results show that the method can measure above-mentioned errors rightly and enhance the performance of TIADC efficiently, at the same time, reduces the complexity and calculation.

Keywords: TIADC; calibration; channel mismatch; equivalent sampling

1 引言

TIADC 通过几路 ADC 同时交叉采样,在兼顾采样精度的同时,大幅度提高了系统采样率,在软件无线电、雷达信号测试等领域有着广泛的重要应用^[1]。但交叉采样引起的通道失配误差会降低 TIADC 系统的整体性能^[2],导致有效量化位数的下降,必须通过校准予以消除。

TIADC 主要存在 3 种通道失配误差:偏置误差、增益误差和时间相位误差^[3],在进行通道失配的校准时,首先要进行通道失配误差的测量。常见的通道失配误差测量

方法主要有盲适应估算方法和预先刻度测量方法^[4-5]。前者采用自适应策略实现误差估计,不需要专门的信号源,但算法比较复杂,且估算精度不是很高;后者是用一个单一频率正弦波对系统进行测量,通过各通道实际测量出的正弦波参数与理想值的对比来获取各失配参数。这种方法需要对每个通道的数据都进行 FFT 或正弦拟合计算,随着复用 ADC 数量的增加计算量会大大增加。

针对以上问题,本文提出了一种新的通道失配校准方法,免除了复杂的数学运算,基于等效采样原理将单个 ADC 多个周期的采样数据重叠显示在一个周期内,各个

收稿日期:2016-01

* 基金项目:电子信息测试技术安徽省重点实验室专项资金项目(A657)资助

ADC 重叠波形的平均值、幅值范围和相位可以直接比较计算,根据计算结果调节硬件电路,即可实现直接校准偏移失配、增益失配和时间失配,有效降低了校准的复杂性,减小运算量。

2 原理

TIADC 由 M 个并行的独立 ADC 组成,每个 ADC 以 f_{ADC} 的采样率交替对输入信号进行采样,通过重组得到一组具有采样率为 $M \cdot f_{ADC}$ 的输出数据,相当于将采样率提高了 M 倍。

当输入频率为 f_{SIN} ,幅度为 A ,初始相位为 θ ,直流分量为 Z 的单一正弦波时,TIADC 各通道的输出值为^[6]:

$$Y_K(t) = AG_K \sin(2\pi f_{SIN}(t + K\Delta t_{SM} + \Delta t_K) + \theta) + Z + Z_K \quad (1)$$

式中: K 为通道的编号,从 0 开始, $Y_K(t)$ 为 K 通道 t 时刻采样的信号幅值, G_K 为 K 通道的增益, Δt_{SM} 为系统的采样间隔,即各通道间的延时时间, Δt_K 为 K 通道的时间失配误差, Z_K 为 K 通道的偏置失配误差。

校准是以一个通道为基准,将其他通道的 G_K 、 Δt_K 、 Z_K 调至与基准通道一致。如果以 0 通道为基准,校准结束后,各通道的输出为:

$$Y_K(t) = AG_0 \sin(2\pi f_{SIN}(t + K\Delta t_{SM}) + 2\pi f_{SIN} \Delta t_0 + \theta) + Z + Z_0 \quad (2)$$

由公式(2)可以看出,各通道的正弦波波形是完全一样的,是基准正弦波在时间轴上按通道间理论延时的平移。如果能得到各通道的正弦波,通过幅度调节、偏移调节、平移等操作,最终能实现各通道波形完全一致,即可实现校准。

如果每个通道的采样速率足够高,可以近似地认为采样得到的正弦波是连续的,各个通道的正弦波可以直接比较是否一致。随着采样率的降低,前一个通道采样的正弦波位置,不能保证都被后面的通道采集到,反之亦然。如图 1(a)所示,在图中,0 通道的采样时刻对应的波形位置,无法在 1 通道被采集到,因此失去了比较的基础。只有通过复杂的拟合计算,复原出连续的正弦波才能进行比较。

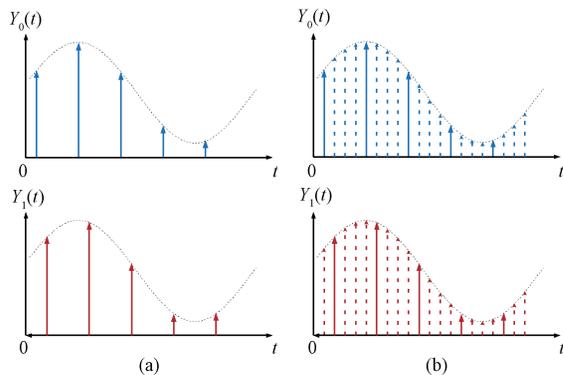


图 1 各通道采样位置对应示意

如果能实现高分辨率插值,每个通道的正弦波的采样位置都可以一一对应,如图 1(b)所示,通过直接比较采样结果即可得到各种通道失配相应的误差,为后期的校准提供依据。

对于周期信号,等效采样可以大幅提高采样率^[7-8]。设单个通道的采样周期为 T_{ADC} ,按式(3)来设置输入正弦波的周期 T_{SIN} ,式中 N 为整数, T_{ES} 为等效采样间隔。

$$T_{SIN} = NT_{ADC} + T_{ES} \quad (3)$$

通过这样的设置,信号的每个周期结束后,都相当于采样触发向后多延时 T_{ES} 时间,通过将多个连续周期的数据叠加在同一个周期上显示,即可实现高分辨率插值。

3 理论仿真

为了验证本文方法的可行性,在 MATLAB 中对 4 通道 TIADC 进行仿真,每个通道 1.25 GHz 的采样率,采样间隔为 0.8 ns,4 路交替采样,每个通道的采样延时为 0.2 ns。

仿真采用的标准正弦波频率为 414.938 MHz,幅度为 1,初始相位为 0,直流分量为 0,周期为 2.41 ns,比 3 个采样间隔多出 0.01 ns,这样最终合成的等效采样正弦波时间分辨率为 0.01 ns,一个周期有 241 个点,为了更好地模拟真实情况,给标准正弦波加上幅度为 0.01 的二次谐波,以及幅度为 0.01 的随机噪声。

以通道 0 作为参考,将其偏移误差 Z_0 、增益 G_0 、时间误差 Δt_0 分别设置为 0、1、0。其他 3 路通道的偏移误差、增益、时间误差的设置值如表 1 所示。4 个通道的重叠采样结果平均去噪后如图 2 所示,每个正弦波各点幅值的平均值,对应该通道的偏置误差;幅度范围,即最大正幅度和最大负幅度的差,对应通道的增益;各正弦波上的圆圈为过零点位置,相互之间的差值对应各通道之间的采样延时。

表 1 通道 1 失配参数计算结果

失配参数	偏置误差	增益	时间误差
设置值	0.05	0.95	0.03
测量值	0.050 027	0.950 21	0.030 012
相对误差(%)	0.05	0.02	0.04

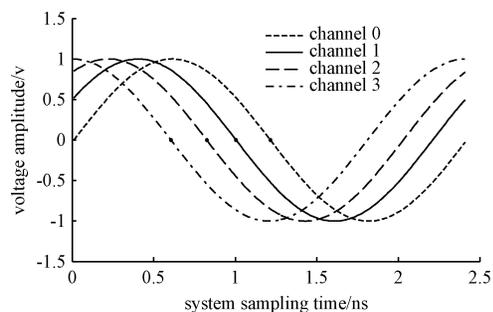


图 2 4 通道等效采样示意

单通道连续采集 241 个点即可组合成一个周期的 0.01 ns 分辨率正弦波,采用 100 次平均去噪,每个通道的采样数据为 24 100 个,计算的通道 1 各失配参数如表 1 所示,从表中数据可以看出,本方法可以准确地还原出偏置误差、增益和时间误差。

为验证去噪平均次数对失配误差测量精度的影响,以通道 1 为例,分别计算采用 10 次平均去噪、50 次平均去噪、100 次平均去噪的失配参数,如表 2 所示。从表中数据可以看出,随着平均次数的增加,偏置误差和增益误差的测量精度也有相应的提高,时间误差的测量精度虽然也有提高,但由于时间误差的调整只能以等效采样的分辨率为单位进行,因此这个提高在工程上不会产生相应的效果。

表 2 通道 1 失配参数计算结果与平均次数的关系

平均次数	相对误差(%)		
	偏置	增益	时间
10	0.42	0.26	0.74
50	-0.14	0.11	0.15
100	0.05	0.02	0.04

4 实际应用

某型高速数字示波器采用本文方法实现了 5 GSps TIADC 的校准,如图 3 所示。该示波器采用 TIADC 芯片 EV8AQ165A 实现时间交替采样,共有 4 个通道,每个通道的采样率为 1.25 GSps,设置为单通道工作方式,实现 5 GSps 的采样率。



图 3 校准界面

EV8AQ165A 对通道的配置和通道参数的调整是通过 SPI 总线读写 ADC 相应的寄存器完成的^[9]。SPI 命令格式如表 3 所示。

表 3 SPI 命令格式

Bit23	Bit22~Bit16	Bit15~Bit0
0:读;1:写	寄存器地址	数据

校准时对寄存器的操作步骤如下:

1) 设置通道选择寄存器(地址 0X0F),选择进行操作的 ADC 通道号。

2) 读偏置/增益/相位当前值寄存器(地址分别 0X21/0X23/0X25)

3) 根据各通道的等效采样波形计算出的误差参数,对读出的值进行修正后写入偏置/增益/相位设置寄存器(地址分别 0X20/0X22/0X24),其中偏移寄存器是在当前值基础上加上相应的误差参数,相位寄存器是在当前值基础上减去相应的误差参数,增益寄存器是在当前值基础上除以误差参数。

4) 写校准控制寄存器(地址 0X10),使设置数据生效。

偏置/增益/相位设置寄存器的数据格式如表 4 所示:

表 4 偏置/增益/相位设置寄存器数据格式

Bit15~Bit10	Bit9~Bit0
保留	设置值

偏置、增益、相位寄存器的设置范围均为 0X000(0X3FF。其中,偏置寄存器中,0X000 对应最大正偏置;增益寄存器中,0X000 对应最小增益;相位寄存器中,0X000 对应最大负延迟。

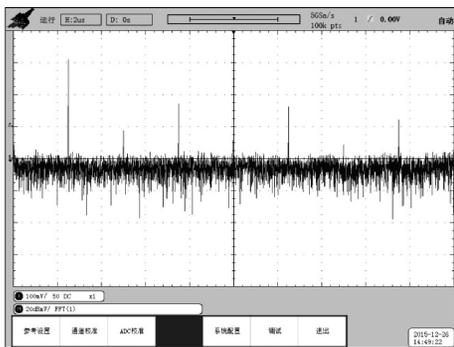
由 FLUKE9500B 示波器校准仪提供频率为 418.41 MHz 的高纯度正弦波,等效采样重叠平均 16 次后得到 4 组高分辨率正弦信号,根据前面介绍的方法计算各通道的相应失配参数,通过调节相应的寄存器,完成通道失配的校准。

当出现波形在几个位置重合程度接近的情况时,可借助欧几里德距离进行微调,用波形循环平移后与基准波形的欧几里德距离来量化重合程度^[10],选择最小的欧几里德距离所对应的时间点。

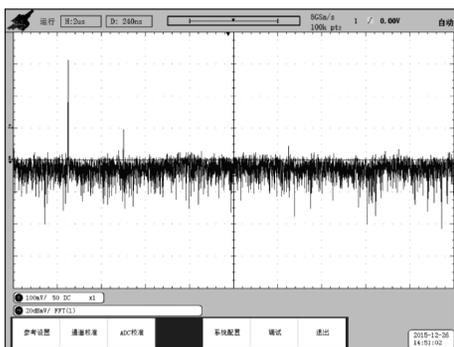
为了评价本文方法对 TIADC 通道失配的校准效果,用基于 FFT 的测试方法分别在校准前和校准后对系统动态参数进行了测试^[11],由 FLUKE9500B 示波器校准仪提供 312.5 MHz 的正弦波作为激励源,满足相关采样条件,校准前后信号的频谱如图 4 所示。从图 4(a)、(b)两图对比可以看出,通道失配导致的频率杂散分量在校准后得到有效抑制,计算校准前后系统的主要动态指标值,系统 SINAD(信噪失真比,signal-to-noise and distortion ratio)从 32.4 dB 提高到 49.5 dB,系统 SFDR(无伪波动态范围,spurious free dynamic range)从 26 dBc 提高到 43 dBc,系统 ENOB(有效位数,effective number of bits)从 5.1 bit 提高到 7.9 bit,由此可知采用本文方法的校准可以明显提高整个系统的性能。

5 结论

基于等效采样原理的 TIADC 通道失配校准方法能准确测量和有效调节主要的通道失配误差,直观、简便,降低了校准的复杂性,减小了运算量,在实际应用中取得了良好的效果,具有一定的工程应用价值。



(a) 校准前信号频谱



(b) 校准后信号频谱

图4 信号频谱

参考文献

- [1] 王凯, 李小波, 查淞. 多片 AD 并行采样技术在软件无线电中的应用[J]. 电子技术应用, 2010, 36(3): 57-59.
- [2] 张尚良, 邹月娟. TIADC 高速数据捕获和时间失配补偿的 FPGA 实现[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(5): 601-608.
- [3] 杨扩军, 田书林, 蒋俊, 等. 基于 TIADC 的 20Gs/s 高速数据采集系统[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 841-849.

作者简介

- [4] ELBORNSSON J, GUSTAFSSON F, EKLUND J-E. Blind adaptive equalization of mismatch errors in time interleaved A/D converter system [J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems I, 2004, 51(1): 151-158.
- [5] 唐邵春. 基于时间并行交替技术的超高速高精度波形数字化研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [6] KUROSAWA N, KOBAYASHI H, MARUYAMA K, et al. Explicit analysis of channel mismatch effects in time-interleaved ADC systems [J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems I, 2001, 48(3): 261-271.
- [7] 邱渡裕, 田书林, 叶芄, 等. 基于并行结构的随机等效时间采样技术研究 with 实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1669-1675.
- [8] 陈培哲, 曾刚, 黄志远, 等. 冲激脉冲的等效采样研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 55-58.
- [9] e2v semiconductors. EV8AQ165A 数据手册[Z]. 2013.
- [10] 肖秦琨, 谢艳梅. 融合深度图和三维模型的人体运动捕获[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(1): 19-22.
- [11] 何芹, 黄朴, 虞致国, 等. 基于平均频谱测试高速 ADC 动态参数的方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(7): 755-762.

向前, 1970 年出生, 高级工程师, 主要研究方向为基础类电子测量技术及仪器。

E-mail: eiqd@ei41.com

刘洪庆, 1983 年出生, 工程师, 主要研究方向为基础类电子测量技术及仪器。

包思云, 1965 年出生, 研究员, 主要研究方向为基础类、通信类电子测量技术及仪器。