

# TIADC 系统误差联合测量及补偿方法

王 克, 樊昌周, 李宏伟, 梁丹亚

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

**摘要** 针对时间交替并行采样系统通道间存在增益误差和时钟失配误差问题,提出一种误差联合测量方法。该方法利用了测试信号的特性,同时测量 2 种误差。与已有算法相比,算法结构简单,精度较高。同时根据时钟失配误差产生原理,设计了基于 Farrow 结构的分数延迟滤波器补偿算法,针对 Farrow 结构局限于 Nyquist 带宽的问题,设计了多通道的补偿结构。仿真实验表明,系统的无杂散动态范围得到明显抑制,输出的信纳比至少提高了 25 dB。

**关键词** 交替采样;Farrow 结构;时钟失配;增益误差;滤波器

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.013

**中图分类号** TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0054-04

## A Joint Measurement and Compensation Method for Errors of TIADC System

WANG Ke, FAN Changzhou, LI Hongwei, LIANG Danya

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** To solve the problem of gain error and timing-skew mismatches among channels of time-interleaved analog-to-digital converter (TIADC) system, a joint measurement method of mismatches error is proposed. By making full use of the characteristic of the test signal, this method can measure two kinds of errors simultaneously. Compared with the existing algorithm, the measurement algorithm is simple and more effective. According to the principle of timing-skew, the compensation method of fractional delayed filter based on Farrow structure is designed. Because of the problem of limited Nyquist bandwidth of Farrow structure, a multi-channel compensation structure is designed. After compensation, the output SINAD of the system is increased by at least 25dB.

**Key words:** TIADC; Farrow structure; timing-skew; gain error; filter

宽带、超宽带信号的广泛应用对数模转换系统提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。时间交替并行采样系统 TIADC (Time-Interleaved ADC, TIADC) 利用多片低速、高精度的 ADC 对输入模拟信号时间交替采样,从而实现系统层面的高速高精度,在提高模数转换速度方面具有很大的优势。但是由于各通道传输特性不一致,采样时钟延迟不相等等因素的影响,导

致通道间引入诸如直流偏置误差  $o$ 、增益误差  $g$ 、时钟失配误差  $\tau$  等误差量<sup>[2]</sup>。因此对误差的估计和补偿成为提升系统性能的关键,很多文献对此进行了研究<sup>[2-7]</sup>。文献[2]提出一种时钟失配误差估计及补偿方法,取得了良好的效果,但是算法只针对时钟失配误差而没有考虑其他 2 种误差对系统的影响,限制了算法的精度。文献[5]在提出一种增益误差

收稿日期:2015-03-12

作者简介:王 克(1990—),男,河北石家庄人,硕士生,主要从事宽带信号采样研究.E-mail: 15691753616@163.com

**引用格式:**王克,樊昌周,李宏伟,等. TIADC 系统误差联合测量及补偿方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):54-57. WANG Ke, FAN Changzhou, LI Hongwei, et al. A Joint Measurement and Compensation Method for Errors of TIADC System [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 54-57.

的估计方法的同时忽略另外2种误差,影响了系统性能。文献[7]虽然提出一种时钟失配误差及增益误差的联合测量方法,但算法推导过程中,忽略直流偏置误差的影响。

## 1 误差联合测量算法

图1中,ADC\_0为参考通道的模数转换器,ADC\_m为第m通道的模数转换器, $e^{j\omega_0 T_s}$ 为一组相移器,LPF为低通滤波器。测量算法通过第一路通道的输出构建各通道的参考信号,利用参考信号与第m通道的信号相乘将误差因子独立出来,分别进行测量。

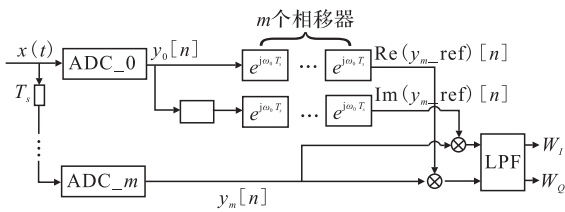


图1 测量算法的结构框图

Fig.1 structure of measurement algorithm

假设  $g_m$ 、 $\tau_m$  分别为增益误差和时钟失配误差,其中  $m=1,2,\dots,M-1$  为通道序列号,子ADC的采样周期为  $MT_s$ ,系统的总采样周期为  $T_s$ 。 $x(t) = A \cos(\omega_0 t + \theta)$  为测量信号, $\omega_0$  为信号角频率, $\theta$  为初始相位。子通道的输出见式(1),参考通道的输出见式(2),经过  $90^\circ$  相移器,得到式(3)。

$$y_m[n] = g_m A \cos(\omega_0(nM + m + \tau_m)T_s + \theta) \quad (1)$$

$$y_0[n] = A \cos(\omega_0 nMT_s + \theta) \quad (2)$$

$$y'_0[n] = A \sin(\omega_0 nMT_s + \theta) \quad (3)$$

第1路信号的复数域表达式为:

$$y_0[n] = A \cos(\omega_0 nMT_s + \theta) + jA \sin(\omega_0 nMT_s + \theta) = A e^{j(\omega_0 nMT_s + \theta)} \quad (4)$$

式(4)经相位延迟得第m路的参考信号:

$$y_{m\_ref}[n] = A e^{j(\omega_0 nMT_s + \theta)} e^{j\omega_0 mT_s} \quad (5)$$

m通道的输出信号分别与参考信号的实部、虚部相乘得到:

$$y_m[n] \cdot \text{Re}(y_{m\_ref}[n]) = \frac{1}{2} g_m A^2 (\cos(\omega_0 \tau_m T_s) + \cos(2\omega_0(nM + m)T_s + 2\theta) \cos(\omega_0 \tau_m T_s) - \sin(2\omega_0(nM + m)T_s + 2\theta) \sin(\omega_0 \tau_m T_s)) \quad (6)$$

$$y_m[n] \cdot \text{Im}(y_{m\_ref}[n]) = \frac{1}{2} g_m A^2 (-\sin(\omega_0 \tau_m T_s) + \sin(2\omega_0(nM + m)T_s + 2\theta) \cos(\omega_0 \tau_m T_s) + \cos(2\omega_0(nM + m)T_s + 2\theta) \sin(\omega_0 \tau_m T_s)) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知,输出信号与参考信号相乘后分解为3项,其中2项为信号的2倍频分量,1

项为只包含误差的参量。可以通过低通滤波器将其独立出来:

$$W_I = 0.5 g_m A^2 \cos(\omega_0 \tau_m T_s) \quad (8)$$

$$W_Q = -0.5 g_m A^2 \sin(\omega_0 \tau_m T_s) \quad (9)$$

则增益误差的测量值为:

$$g_m = \frac{2}{NA^2} \sqrt{\sum_N W_I^2 + \sum_N W_Q^2} \quad (10)$$

时钟失配误差的测量值为:

$$\tau_m = \frac{1}{\omega_0 T_s} \arctan\left(-\frac{1}{N} \sum_N W_Q / \frac{1}{N} \sum_N W_I\right) \quad (11)$$

该测量算法充分利用了测量信号的特性,通过简单的相乘运算将2种误差参量独立出来,结构简单,实时性高。在测量系统中,对低通滤波器的设计关系到系统性能好坏。根据文献[3]可知,TIADC系统中还存在直流偏置误差。本文提出的算法虽不能有效地测量直流偏置误差,但可以通过设计低通滤波器将信号的1倍频分量滤掉,来避免直流偏置误差对另外两种误差测量结果的影响。同时由式(1)可知,测量算法对输入信号的初始相位没有要求,提升了系统的实用性。

## 2 基于Farrow结构的分数延迟滤波器补偿算法

已知时钟失配误差  $\tau T_s$  前提下,通过延迟滤波器  $h(t) = e^{-j\omega_0 \tau T_s}$  完成时钟失配的补偿。由滤波器理论知识可知,该滤波器为一个理想全通滤波器,在物理上是难以实现的。在实际应用中,需要对滤波器的冲击响应  $h(t)$  进行截短,假设截短后的滤波器长度为  $(N+1)T_s$ ,可以得到补偿后输出信号为:

$$y[k] = \sum_{i=0}^N x[(k-i)T_s] h((i+\tau)T_s) \quad (12)$$

Farrow结构的滤波器其本质是利用多项式拟合的方法来得到延迟滤波器  $h(t)$  的近似值。常用的拟合方法就是基于拉格朗日多项式的拟合办法。其时域表达式为:

$$h((i+\tau)T_s) = \sum_{p=0}^P c_p(i) (\tau T_s)^p \quad (13)$$

式中:  $N$  为截短滤波器长度;  $P$  为拟合阶数。式(13)代入式(12),化简后得:

$$y[k] = \sum_{i=0}^{N-1} x[(k-i)T_s] \sum_{p=0}^P c_p(i) (\tau T_s)^p = \sum_{p=0}^P \left( \sum_{i=0}^{N-1} c_p(i) x[(k-i)T_s] \right) (\tau T_s)^p = \sum_{p=0}^P C(p) (\tau T_s)^p \quad (14)$$

式(14)所示的线性系统就是典型的Farrow结构滤波器表达式,电路实现框图见图2。

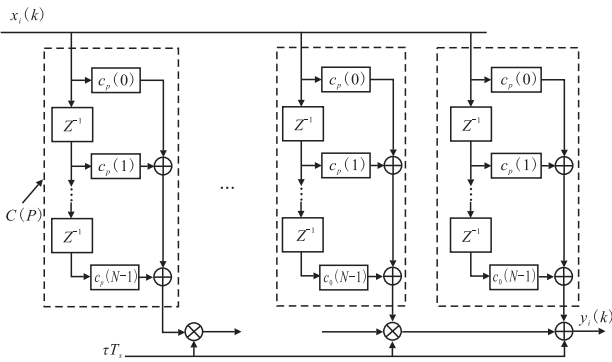


图2 Farrow 结构滤波器结构框图

Fig.2 Structure of Farrow filter

由图2可知,Farrow 结构滤波器由一组固定系数的 FIR 滤波器和可变参数的乘法器组成,可变参数就是时钟失配误差量  $\tau T_s$ 。通过改变参数得到不同的滤波特性。通过使用 Farrow 结构滤波器将时钟失配误差独立出来,简化了整个系统的设计,同时可以更好地与测量算法相结合。

虽然 Farrow 结构滤波器实现简单,延迟精确,但由于在 TIADC 系统中,子通道的采样频率往往远低于 Nyquist 采样频率,致使信号的带宽无限展宽,就不能再使用延迟滤波器进行补偿。本文通过对子通道输出进行  $M$  倍插值,使得输出信号的带宽限制在有限带宽内,再使用 Farrow 结构滤波器进行补偿,经过  $M$  倍抽取和多路选择器对信号进行输出。子通道的补偿结构框图见图3。

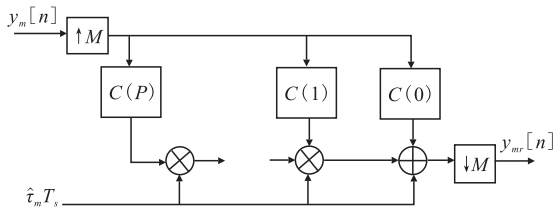


图3 子通道补偿结构框图

Fig.3 Compensation structure of sub-channel

该补偿结构具有良好的扩展性,可以扩展到  $M$  通道,但随着通道数的增加系统的复杂度也逐渐增加。假设每个子滤波器的长度为  $N$ ,Langrange 逼近的阶数为  $P$ ,则一共需要  $NP(M-1)$  个固定乘法器和  $(P-1)(M-1)$  个可变系数乘法器。

### 3 实验仿真

#### 3.1 测量算法性能分析

为了得到最佳的低通滤波器设计方案,探索低通滤波器的设计原则,实验以 2 通道系统为例,设置 TIADC 系统的采样率为 400 MHz,量化位数为 16 bit,输入信号频率为 63.66 MHz。以第 1 通道为参考,设置第 2 通道的增益误差  $g = 1.03$ ,时钟失配误差

差  $\tau = 0.02$ ,总采样点数为 5 000。分别采用 Hann 等 5 种窗设计滤波器。为便于比较,归一化频率设置为 0.31,滤波器阶数设置为 10。滤波器使用 Matlab 中的 fdatools 进行设计。

取 2 000 个测量点  $g_{\text{测}}[n]$ 、 $\tau_{\text{测}}[n]$  做加权平均作为测量值  $g$  和  $\tau$ 。定义测量值的方差为:

$$\Delta g = \frac{1}{2\,000} \sum_{n=1}^{3\,499} (g_{\text{测}}[n] - g)^2 \quad (15)$$

$$\Delta \tau = \frac{1}{2\,000} \sum_{n=1}^{3\,499} (\tau_{\text{测}}[n] - \tau)^2 \quad (16)$$

对实验数据进行处理得表 1。

表 1 不同窗函数测量结果对比表

Tab.1 Measure results of different window function

滤波器	实际值	均值	方差/ $10^{-5}$
Hann	$g$	1.03	1.984 9
	$\tau$	1.02	1.869 4
Chebyshev	$g$	1.03	1.869 4
	$\tau$	1.02	1.943 8
Hanming	$g$	1.03	1.046 2
	$\tau$	1.02	0.985 3
Kasier	$g$	1.03	11.961
	$\tau$	1.02	11.266
Gaussian	$g$	1.03	1.302 8
	$\tau$	1.02	1.226 9

表 1“均值”可以看出,使用 Kasier 窗设计低通滤波器时,增益误差的测量值与实际值之间稍有偏差。这是因为在限定滤波器阶数为 10 的情况下,使用 Kasier 窗设计低通滤波器的边带抑制效果不好,导致信号的 2 倍频分量产生泄露,影响了测量结果。表 1“方差”可以看出,使用窗函数设计低通滤波器时,均可以使测量值的方差达到  $10^{-5}$  数量级。使用 Hanming、Gaussian 窗设计低通滤波器时相较于 Hann、Chebyshev,测量值的偏差更小。

为了验证直流偏置误差对系统的影响,低通滤波器的归一化频率设计为 0.6,其他参数不变,在使用 Hanming 窗设计低通滤波器时,得到增益误差的测量均值为 1.032,方差为 165.26。由此可知,直流偏置误差对测量系统有严重的影响,所以在设计低通滤波器时,必须将该误差滤掉。

#### 3.2 补偿前后频谱分析

实验 1:为了验证补偿算法对无杂散动态范围的影响,设置 TIADC 系统参数与 3.1 节相同,输入信号为 60 MHz 的正弦信号,并加入 SNR=12 的高斯白噪声,总采样点数增加至 10 000。Farrow 结构滤波器使用 Matlab 中的 fdesign.fracdelay 函数设计,滤波器长度  $N = 6$ ,阶数  $P = 5$ 。

增益误差通过乘法器进行补偿,信号补偿前后

的功率谱见图 4~5。

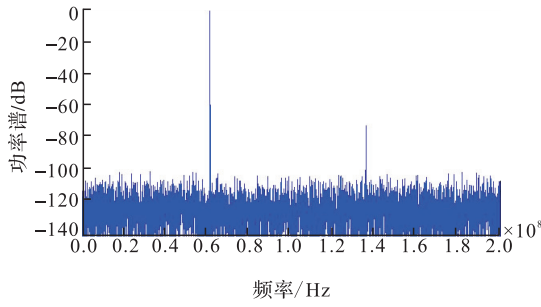


图 4 信号补偿之前的功率谱

Fig.4 PSD of signal before compensation

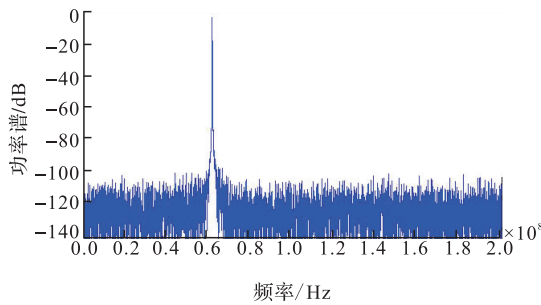


图 5 信号补偿之后的功率谱

Fig.5 PSD of signal after compensation

从图 4~5 可以看出,信号经过补偿以后,系统的杂散谱得到明显地抑制,无杂散动态范围得到明显改善。

实验 2:为了得到在整个有效频带内系统信纳比的仿真结果,设置 TIADC 系统参数与误差参数与 3.1 节相同,在频带 20 MHz 到 180 MHz 之间均匀地选出 34 个单频正弦信号作为系统的输入信号,增益误差通道乘法器进行补偿,根据文献[8]定义系统的输出输入信纳比为:

$$\text{SINAD}_{\text{in}} = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |x[n] - y[n]|^2} \right\} \quad (17)$$

$$\text{SINAD}_{\text{out}} = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |x[n] - y[n]|^2} \right\} \quad (18)$$

式中:  $y[n]$  是带有误差信号,  $y[n]$  是补偿之后信号。可以近似整个频带内,系统的补偿性能曲线见图 6。

由图 6 可以看出,经过补偿算法后,系统的信纳比得到明显改善。在低频段,系统的信纳比大幅改善,这是因为增加系统的采样率可以使得信噪比增加。随着频率的提升,系统的补偿性能下降,但至少也可以提高约 25 dB。

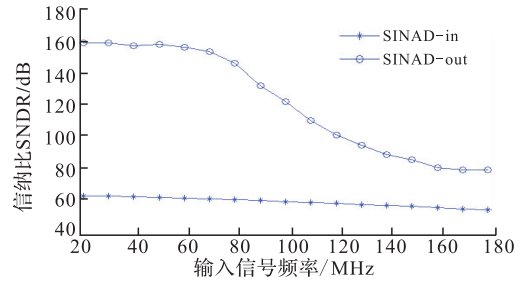


图 6 系统补偿性能曲线

Fig.6 Compensation performance diagram

## 4 结语

提出一种基于 Farrow 结构滤波器的补偿算法,通过仿真实验表明经过补偿后系统的无杂散动态范围得到明显改善,信纳比至少提升了约 25 dB。

## 参考文献(References):

- [1] PAN Huiqing, ZENG Hao, QIU Duyu. Optimal Design of Adjustable Frequency Response Linear-Phase Filters[C]//The 11th IEEE International Conference on Electronic Measurement&Instruments, ICEMI' 2013.
- [2] 王亚军,李明.一种新的时间交叉采样 ADC 时钟偏斜误差自适应补偿算法[J].系统工程与电子技术,2011,33(10):2164-2168.  
WANG Yajun, LI Ming. Novel Adaptive Method for Compensation of Timing-skew in Time-interleaved ADC[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(10): 2164-2168. (in Chinese)
- [3] 张昊,师奕兵,王志刚.时间交替 ADC 系统通道时钟延迟的多频正弦拟合算法[J].电子测量与仪器学报,2010,24(3):244-249.  
ZHANG Hao, SHI Yibing, WANG Zhigang. Multi-tone Sine Wave Fit Algorithm of Channel Time Delay in Time-interleaved ADC System[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(3): 244-249. (in Chinese)
- [4] YE Chunfeng, ZHANG Lei. A New Method of Waveform Digitization Based on Time-interleaved A/D Conversion[J]. Chinese Physics C, 2013, 37(11): 49-57.
- [5] 张炜承,林钱强,陈曾平.宽带雷达射频分时交替采样增益失配误差估计方法[J].国防科技大学学报,2013,35(4):134-139  
ZHANG Weicheng, LIN Qianqiang, CHEN Zengping. Gain Mismatch Estimation Method for Time-interleaved ADC System in Wideband Radar RF Sampling[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(4): 134-139. (in Chinese)
- [6] Zhang Rui, Yin Yongsheng. Split-ADC Based Digital Background Calibration for Time-Interleaved ADC[J]. Journal of Electronics (China), 2012, 29(3): 302-309.
- [7] 王亚军,李明.TIADC 通道误差自适应修正方法[J].西安电子科技大学学报,2013,40(3):27-35.  
WANG Yajun, LI Ming. Novel Adaptive Method Based on the Taylor Series to Compensate Channel-mismatches of TIADC[J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(3): 27-35. (in Chinese)
- [8] IEEE Std 1241-2000. IEEE Standard for Terminology and Test Method for Analog-to-digital Converters[S]. New York: IEEE Press, 2001.

(编辑:姚树峰)