

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.12.011

TIADC 系统误差自适应估计及补偿方法^{*}

白 旭 韦雪洁 胡 辉 王永云

(北华航天工业学院电子与控制工程学院 廊坊 065000)

摘 要:时间交替并行采样模数转换器结构(TIADC)是提高系统采样率的一种有效方法。TIADC 结构的实现过程中不可避免的会引入时间失配误差、增益误差和偏置误差从而导致系统的信噪比降低。针对上述问题,提出一种基于可变步长最小均方算法(VSS-LMS)的 TIADC 失配误差自适应估计方法。该方法可以同时完成对时间失配误差和偏置误差的估计,并根据估计得到的失配误差参数对失配误差进行校正。仿真结果表明,该自适应估计方法每通道仅需要不超过 128 个采样点即可以完成对失配误差的估计。最后在实际的时间交替并行采样系统中验证了该算法的有效性,该算法可以使得校准后的并行采样系统的信噪比提高 20 dB。仿真与实验结果表明,所提出的算法可以有效提高 TIADC 系统的性能。

关键词:并行交替采样;失配误差;自适应估计;Farrow 结构分数延时滤波器

中图分类号: TB971 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Adaptive estimation and compensation method for mismatch in TIADC system

Bai Xu Wei Xuejie Hu Hui Wang Yongyun

(School of Electrical and Control Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

Abstract: Time-interleaved analog-to-digital convert (TIADC) is used to improve the sampling rate of ADC system effectively. However, the timing mismatch, gain mismatch and offset mismatch are unavoidable in the TIADC system, which degrades the signal to noise ratio (SNR) of the TIADC. In this paper, an adaptive estimation method based on VSS-LSM algorithm is proposed, which can estimate the timing mismatch and offset mismatch simultaneously. According to the estimated values, the timing and offset mismatches are corrected. The simulation results show that the proposed algorithm requires less than 128 samples to estimate the timing and offset mismatches of each sub-ADC. The effectiveness of the proposed algorithm is verified in an actual TIADC system. The SNR of TIADC system is improved by 20 dB. The simulation and experiment results show that the proposed algorithm improves the performance of TIADC system effectively.

Keywords: parallel sampling; mismatch error; adaptive estimation; Farrow structure fractional delay filter

0 引 言

时间交替并行采样模数转换器结构(TIADC)作为一种提高系统采样率的方法广泛应用于高速示波器和高速数字化仪中。TIADC 系统中 M 片 ADC 交替采样使得整个系统的采样率达到单片 ADC 采样率的 M 倍,大大提高了系统的采样率。TIADC 系统在提高系统采样率的同时

也会由于通道间失配误差的存在而导致系统的信噪比大大降低。对于通道间失配误差的估计和校正已有很多文献做了研究^[1-11]。文献[1]提出了一种自适应补偿结构,通过比对参考通道和子通道导数滤波器组的输出,估算出通道误差参数。文献[1]中的方法需要额外的参考通道,增加了额外的硬件成本。文献[2]采用正弦拟合算法完成了对 3 个失配误差的估计;通过对 ADC 发送对应的控制字来完成对增益和偏置误差的校正,通过调节

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04
^{*} 基金项目:国家重点研发计划重点专项(2017YFC0601900,2017YFC0601901)、河北省教育厅重点基金(ZD2015103)资助项目

PLL 和 ADC 对应的时钟延迟寄存器完成对时间失配误差的校正。文献[2]中的方法要求 TIADC 系统中的 ADC 和 PLL 分别具有程控增益和相位调节的功能,限制了该方法的灵活性。文献[3]使用归一化校正算法完成对增益误差和偏置误差的估计并通过计算通道间的相关函数的最大值完成对时间失配误差的估计。文献[4]从频域的角度出发,通过对并行采样数据的幅频特性和相频特性分析来完成对增益误差和时间失配误差的估计。文献[3-4]中的方法在对时间失配误差估计的过程中需要做多次快速傅里叶变换(FFT)运算,使得文献[3-4]中的方法计算量较高。文献[5]使用希尔伯特变换来完成对 TIADC 系统时间失配误差的估计。文献[5]中的方法对输入信号的频率有一定程度的限制,即输入信号的频率不能是 TIADC 子通道采样率的整数倍。文献[6]使用等效采样的原理完成了对增益误差、偏置误差和时间相位误差的估计,但是文献[6]中的方法需大量的采样数据进行多次平均去噪才可以完成对误差参数的计算,该方法对采样点数的数量要求较高。文献[7-11]使用盲估计的方法来计算 TIADC 系统的失配误差。相比文献[1-6]中的方法,文献[7-11]中的方法有较高的估计精度并且可以跟踪 TIADC 系统失配误差的变化。但是文献[7-11]中算法一次估计过程需要大量的采样点及迭代,计算更为复杂。

为了解决上述问题,进一步降低 TIADC 系统误差估计过程对计算量和采样点数的要求,本文首先完成 TIADC 系统模型和误差分析,从时域的角度提出自适应误差估计方法。在自适应误差估计的过程中使用了变步长最小均方误差法(VSS-LMS),使得每通道的误差参数估计仅需要小于128个采样点即可完成。整个系统的参数估计仅仅需要一个外部输入的参考信号且完全在数字域实现。相比文献[1-2]本文提出的算法无需增加额外的硬件成本具有很好的灵活性。相比文献[3-11],本文的算法具有较低的计算复杂度,对系统参数估计过程中需要的采样点数大大降低。

1 TIADC 系统模型及误差分析

TIADC 采集系统是一种利用多个相对低速的 ADC 进行时间交替采样进而在系统级实现高速采样的一种有效方法。TIADC 系统由 M 片 ADC 组成,每一片 ADC 工作时钟频率为 f ,相邻 ADC 的时钟相位偏差为 $2\pi/M$,整个系统的采样频率为 $M \times f$ 。在实际使用中由于器件自身的非理想特性会导致 TIADC 系统产生额外的失配误差,例如时钟芯片输出时钟的抖动会导致时间失配误差的产生,模拟通道中放大器的增益误差及偏置误差会导致 TIADC 系统产生相应的增益误差及偏置误差。

图1所示为实际工作状态下的 TIADC 系统的系统模型^[12]。

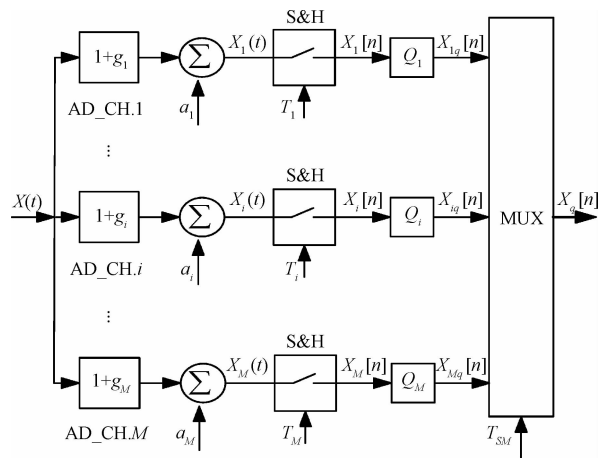


图1 TIADC 模型

Fig.1 TIADC model

图1中 a_i 为第 i 通道偏置误差, g_i 为第 i 通道的增益误差, T_i 为第 i 通道的采样时间, T_i 表达式为:

$$T_i = (kMT + iT + \Delta t_i)$$

$$i = 1, 2, \dots, M; k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中: Δt_i 为第 i 通道的时间失配误差, k 为采样次数。忽略量化噪声的影响第 i 通道的输出序列及整个 TIADC 系统的输出序列分别表示为:

$$X_{iq}[n] = (1 + g_i)X_i(n) + a_i \quad n = T_i \quad (2)$$

$$X_q[n] = \sum_{i=1}^M X_{iq}[n] \quad (3)$$

TIADC 系统的时间失配误差和增益误差相互影响反映在频域上为时间失配误差和增益误差处于同一点频处,而偏置误差则与时间失配误差和增益误差相互独立。由偏置误差所产生的加性噪声在频域中所处的频点位置为^[4]:

$$f_{\text{noise1}} = k \times f_s / M \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

由增益误差和时间失配误差共同作用产生的噪声在频域中所处的频点位置为^[4]:

$$f_{\text{noise2}} = \pm f_{\text{in}} + \frac{k}{M} f_s \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

式(4)、(5)中, f_s 为 TIADC 系统的采样率, M 为 TIADC 系统中并行采样的通道个数, f_{in} 为被测输入信号频率, f_{noise1} 为偏置误差所产生的噪声频率, f_{noise2} 为增益和时间失配误差所产生的噪声频率。当通道数 $M = 2$, 增益误差、偏置误差和时间失配误差分别为 $g_1 = 0.1, a_1 = 0.04, \Delta t_1 = 0.01 \times (1/f_s)$, 输入被测信号频率为 $f_{\text{in}} = f_s/10$ 、采样率 $f_s = 500 \text{ MHz}$ 时 TIADC 系统的频谱如图2所示。

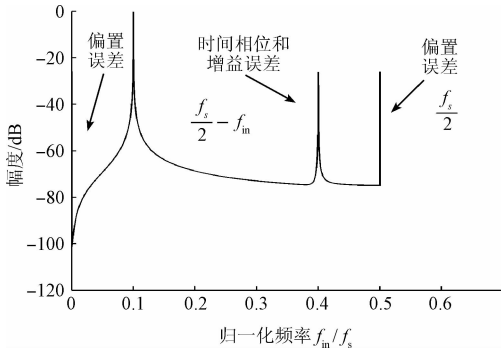


图 2 TIADC 系统的频谱

Fig. 2 The spectrum of TIADC system

2 TIADC 系统模型及误差分析

2.1 TIADC 失配误差的自适应估计算法

为了尽可能降低失配误差对 TIADC 系统性能的影响,需要首先对 TIADC 系统 3 个失配误差进行估计,进而对 3 个失配误差进行校正。本文算法需要一个已知频率的正弦信号作为测试信号。

当输入图 1 中的被测信号 $X(t)$ 为一任意相位的单点频信号,即:

$$X(t) = A \sin(2\pi f_{in} t + \phi) \quad (6)$$

式中: f_{in} 为被测信号的频率, ϕ 为初始相位角,正弦信号的幅度为 A ,忽略 TIADC 系统的量化噪声并对采集数据进行归一化,则式(2)变为:

$$\begin{cases} X_{iq}[n] = X_{iq}[T_i] = \\ (1 + g_i) A \sin\left(\frac{2\pi f_{in}}{f_s}(kM + i + \frac{\Delta t_i}{T}) + \phi\right) + a_i \\ T_i = (kMT + iT + \Delta t_i) \quad i = 1, 2, \dots, M; k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

式中: f_s 为整个 TIADC 系统的采样率。

$$f_s = \frac{1}{T} \quad (8)$$

假设 TIADC 系统不存在增益、偏置和时间失配这 3 个失配误差且输入被测信号的相位 $\phi = 0$, 即一个理想的 TIADC 系统对输入的一个理想的频率为 f_{in} 的正弦信号进行采集,则图 1 中第 i 通道的输出序列为:

$$\begin{cases} \tilde{X}_{iq}[n] = \tilde{X}_{iq}[T_i] = \sin\left(\frac{2\pi f_{in}}{f_s}(kM + i)\right) \\ T_i = (kMT + iT) \quad i = 1, 2, \dots, M; k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (9)$$

同理,同样的理想的 TIADC 系统对输入的一个理想的频率为 f_{in} 余弦信号进行采集,图 1 中第 i 通道的输出序列为:

$$\begin{cases} \hat{X}_{iq}[n] = \hat{X}_{iq}[T_i] = \cos\left(\frac{2\pi f_{in}}{f_s}(kM + i)\right) \\ T_i = (kMT + iT) \quad i = 1, 2, \dots, M; k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (10)$$

令:

$$\phi_i = \phi + \frac{2\pi f_{in} \Delta t_i}{f_s T} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

对式(7)利用两角和的正弦公式展开整理得:

$$\begin{aligned} X_{iq}[n] &= A(1 + g_i) \cos(\phi_i) \tilde{X}_{iq}[n] + \\ &A(1 + g_i) \sin(\phi_i) \hat{X}_{iq}[n] + a_i \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)表明当一个频率为 f_{in} 、幅度为 A 、相位为 ϕ 的单点频信号输入 TIADC 系统中,其第 i 通道的输出序列可以表示为:频率为 f_{in} 理想的正弦信号和理想的余弦信号分别输入理想的 TIADC 系统时,理想 TIADC 系统第 i 通道的输出序列的线性组合。

根据式(12)的结论,本文以 TIADC 系统的 3 个失配误差为研究对象提出一种失配误差自适应估计方法,如图 3 所示。

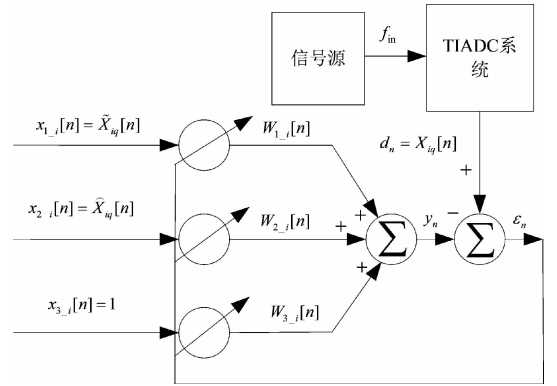


图 3 失配误差自适应估计方法

Fig. 3 Adaptive estimation algorithm of mismatch error

图 3 中信号源产生式(6)中的测试信号,并输入采样率为 f_s 的 M 通道 TIADC 硬件电路中,取 TIADC 系统的第 i 通道的输出序列 $X_{iq}[n]$ 作为期望响应 d_n 输入自适应滤波器中。图 3 中的自适应滤波器中的自适应线性组合器采用多输入结构,共有 3 个输入分别为:

$$\begin{cases} x_{1,i}[n] = \tilde{X}_{iq}[n] \\ x_{2,i}[n] = \hat{X}_{iq}[n] \\ x_{3,i}[n] = 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\tilde{X}_{iq}[n]$ 和 $\hat{X}_{iq}[n]$ 为根据式(9)和(10)由 TIADC 系统中处理器生成的与 $X_{iq}[n]$ 同长度的序列,这两组序列存储在 TIADC 系统的存储空间中。

通过调整自适应线性组合器中通道的权重值 $w_{1,i}[n]$, $w_{2,i}[n]$ 和 $w_{3,i}[n]$ 使得输出 y_n 以最小均方误

差准则去逼近 TIADC 系统第 i 通道的真实采样值 $X_{iq}[n]$ 即 d_n 。当 ε_n 的均方误差达到最小值时自适应线性组合器的权重值满足下式:

$$\begin{cases} W_{1,i}[n] \approx (1 + g_i)A\cos(\phi_i) \\ W_{2,i}[n] \approx (1 + g_i)A\sin(\phi_i) \\ W_{3,i}[n] \approx a_i \end{cases} \quad (14)$$

选取图 1 中的通道 1 作为参考通道,根据式 (11) 和 (14) TIADC 系统各通道的偏置和时间相位误差分别为:

$$\tilde{a}_i = W_{3,i}[n] - W_{3,1}[n] \quad i = 2, 3, \dots, M \quad (15)$$

$$\begin{cases} \frac{\Delta \tilde{t}_i}{T} = \frac{(\tilde{\phi}_i - \tilde{\phi}_1)}{2\pi f_{in} T} \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \\ \tilde{\phi}_i = \arctan\left\{\frac{W_{2,i}[n]}{W_{1,i}[n]}\right\} \end{cases} \quad (16)$$

由于输入测试信号为正弦信号且 TIADC 系统的偏置误差已经由式 (15) 算出, TIADC 系统的增益误差可由文献 [13] 中方法计算:

$$\tilde{g}_i = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} |X_{iq}[n] - a_i|}{\sum_{n=0}^{N-1} |X_{1q}[n]|} \quad i = 2, 3, \dots, M \quad (17)$$

2.2 VSS-LMS 算法

为了实现上文描述的自适应估计过程,本文使用 LMS 算法来完成对各个通道失配误差的估计。LMS 算法为自适应算法中的一种,其用瞬时输出功率的梯度代替均方误差梯度,其递推表达式为:

$$\begin{cases} \varepsilon_n = d_n - X_n^T W_n \\ \tilde{\nabla}_n = -2\varepsilon_n X_n \\ W_{n+1} = W_n - \mu \tilde{\nabla}_n \end{cases} \quad (18)$$

式中: X_n 为自适应线性组合器输入矩阵, W_n 为权重向量矩阵。

$$X_n = \begin{bmatrix} \tilde{X}_{iq}[n] \\ \hat{X}_{iq}[n] \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$W_n = \begin{bmatrix} W_{1,i}[n] \\ W_{2,i}[n] \\ W_{3,i}[n] \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中, μ 为每次迭代过程中的步长,对于多输入结构的线性组合器 μ 需要满足:

$$0 < \mu < \frac{1}{3 \times sp} \quad (21)$$

$$sp = (\tilde{X}_{iq}[n])^2 + (\hat{X}_{iq}[n])^2 + 1 \quad (22)$$

式中: sp 为自适应线性组合器的输入信号的能量。LMS 算法中 μ 的选取决定了其稳态误差和收敛性,当 μ 选取的数值较大时会有较快的收敛速度。但是算法的稳态误差会增大甚至导致算法的发散;反之,则会使得算法的收

敛速度降低,从而导致迭代次数过多计算时间增加。为了解决稳态误差和收敛速度的矛盾本文采用变步长最小均方误差法 VSS-LMS,在 VSS-LMS 算法中 μ 不再是一个固定数值而是随迭代次数不断变化的数值。本文选用的 VSS-LMS 算法其步长参数 μ 通过输出误差 $\varepsilon[n]$ 的瞬时功率来调节^[14-16],计算公式为:

$$\mu(n+1) = \begin{cases} \mu_{\min}, \mu(n) < \mu_{\min} \\ \alpha\mu(n) + \beta(\varepsilon[n])^2 \\ \mu_{\max}, \mu(n) > \mu_{\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中: μ_{\max} 为最大可能收敛速率的步长, μ_{\min} 为具有跟踪能力的最小步长; $0 < \alpha, \beta < 1$, α 为步长的遗传因子,主要决定算法收敛时的步长值, α 的取值不能超过 1,否则造成算法无法收敛, α 的取值一般小于 1 且接近于 1; β 决定步长受误差瞬时能量的影响程度,控制算法的启动和跟踪速率, β 的取值一般很小;当算法深度收敛时, $\beta(\varepsilon[n])^2 \rightarrow 0$,而步长基本按 α^n 减小直到 $\mu[n] \rightarrow \mu_{\min}$ ^[14-16]。

2.3 TIADC 失配误差的校正

根据式 (15) ~ (17) 完成对第 i 通道的偏置误差、时间失配误差和增益误差的估计后需要对这 3 个失配误差进行校正以提高整个 TIADC 系统的信噪比。对于通道的偏置误差和增益误差的校正可以使用式 (2) 第 i 通道输出序列减去偏置误差的估计值,再除以通道增益来完成校正,公式如下:

$$\begin{cases} \hat{X}_{iq}[n] = \frac{X_{iq}[n] - \tilde{a}_i}{G_i} \\ G_i = 1 + \tilde{g}_i \end{cases} \quad i = 2, 3, \dots, M \quad (24)$$

根据式 (2) 和傅里叶变换的时移特性可知,时域延迟 $\frac{\Delta t_i}{T}$ 则对应的频率域变化为频域数值乘以 $e^{j\omega\Delta t_i/T}$,因此

只要求得每个通道的 Δt_i ,就可以利用理想频率响应为 $e^{-j\omega\Delta t_i/T}$ 的全通滤波器实现对时间误差的校正^[17]。本文采用分数延时滤波器来完成对时间失配误差的校正,分数延时滤波器通过数字滤波器的方法重构采样序列,实现信号 $e^{-j\omega\Delta t_i/T}$ 的延时^[18]。分数延时滤波器的常用方法是 Farrow 结构,采用延迟量的多项式来逼近全通函数以达到理想的频率响应。Farrow 结构的分数延迟滤波器的传递函数为^[19-20]:

$$\begin{cases} H_d(z) = \sum_{n=0}^N h_d(n) z^{-n} \\ h_d(n) = \sum_{p=0}^P C_p(n) d^p \end{cases} \quad (25)$$

其中, $d = \frac{\Delta t_i}{T}$,将式 (25) 中 $h_d(n)$ 代入 $H_d(z)$ 得到:

$$H_d(z) = \sum_{p=0}^P \left[\sum_{n=0}^N C_p(n) z^{-n} \right] d^p \quad (26)$$

根据式 (26) 可得图 4 Farrow 结构的分数延时滤波器。

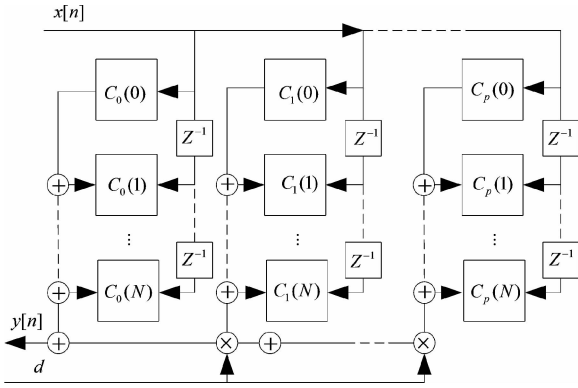


图 4 Farrow 结构的分数延时滤波器

Fig. 4 Fraction delay filter of Farrow structure

式(25)中多项式系数 $C_p(n)$ 采用拉格朗日插值的方式实现,拉格朗日插值是实现分数延时滤波器的最简单方法。多项式系数为^[18]:

$$h_d(n) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq n}}^N \frac{d-k}{n-k} \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (27)$$

经过分数延时滤波器对时间失配误差校正后输出序列为。

$$\tilde{X}_{iq}[n] = \hat{X}_{iq}[n] * h_d[n] \quad (28)$$

3 实验与结果分析

本小节包含两个实验,实验 1 使用 MATLAB 产生含有增益误差、偏置误差和时间失配误差的 TIADC 采样数据,并使用 2.1 和 2.2 节中的方法对失配误差进行估计,以验证算法的有效性。实验 2 使用双通道 TIADC 硬件系统来验证算法的有效性以及该算法对整个 TIADC 系统的信噪比的提高。

3.1 TIADC 失配误差估计

使用 MATLAB 产生一个采样率 $f_s = 100$ MHz 的 2 通道 TIADC 系统,每通道采样率为 50 MHz。TIADC 系统的增益误差、偏置误差和时间失配误差分别设置为 $a_1 = 0.1, g_1 = 0.1, \frac{\Delta t_1}{T} = 0.1$ 。算法在自适应迭代过程中步长参数 μ 依据式 (23) 进行调整,相应的参数为 $\alpha = 0.98, \beta = 0.05, \mu_{\min} = 0.002, \mu_{\max} = 1$ 。

图 5 和 6 所示为分别使用 2.1 和 2.2 节中的方法计算得到的通道 1 的偏置误差和时间失配误差的估计值。

从图 5 和 6 可知,算法可以对每通道的偏置误差和时间失配误差做出精确估计。在每次估计过程中每通道仅仅需要 100 个采样点即可以使得误差的估计值收敛于

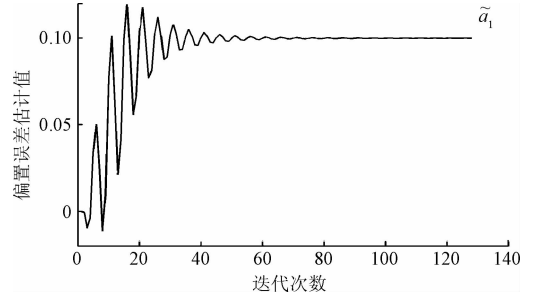


图 5 通道 2 偏置误差估计值

Fig. 5 The estimated value of offset mismatch in channel 2

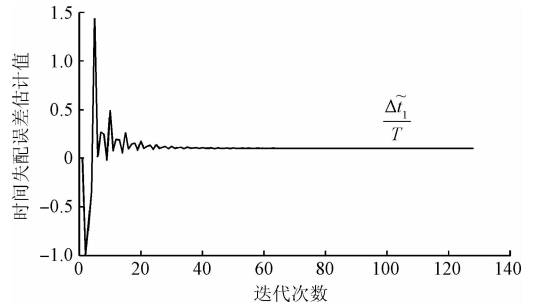


图 6 通道 2 时间失配误差估计值

Fig. 6 The estimated value of timing mismatch in channel 2

系统的设定值,由式(17)计算得系统的增益误差估计值为 $\hat{g}_1 = 0.1033$ 。根据仿真结果显示,TIADC 系统每通道仅需要不超过 128 个存储空间便可以满足算法对参数估计的需要。

3.2 TIADC 失配误差校正

双通道 12 bit-ADC 构成 TIADC 系统来验证算法在实际使用中的有效性。双通道 TIADC 系统每通道采样率为 67.5 MSPS,系统的总采样率为 135 MSPS。双通道 TIADC 系统的硬件如图 7 所示。

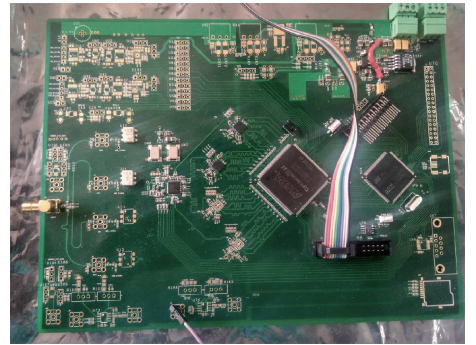


图 7 双通道 TIADC 系统

Fig. 7 Dual channels TIDAC system

图 8 所示为 17 MHz 测试信号输入 TIADC 系统后,系统失配误差校正前后的对比。

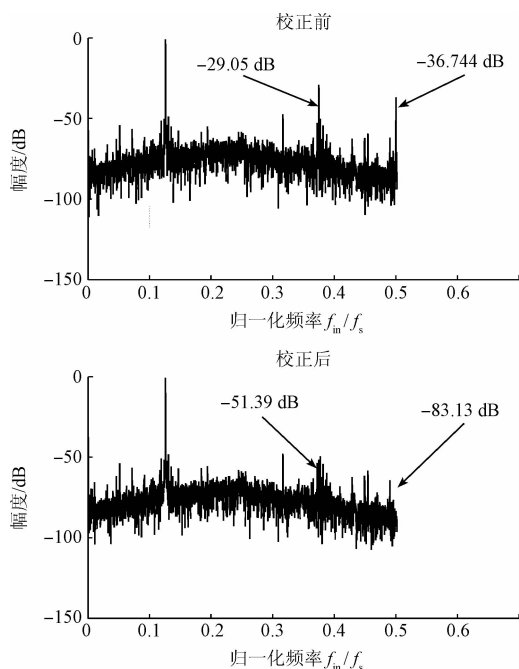


图8 校正前后系统的频谱对比

Fig. 8 Comparison of system spectrum before and after calibration

由图8可以看出,经过校准后系统的信噪比(SNR)提升了22.34 dB。为了测定算法对整个TIADC系统信噪比的提升作用,在6~55 MHz均匀的取9个单点频正弦信号输入TIADC系统中,算法对整个TIADC系统信噪比的提升如图9所示。由图9可以看出算法可以有效的提高TIADC系统的信噪比,在6~55 MHz带宽范围内可以将系统的信噪比平均提升20 dB。

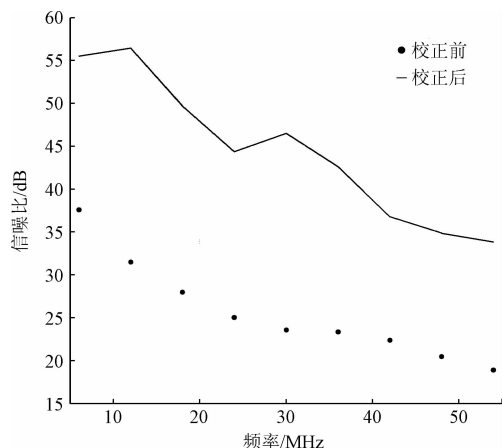


图9 TIADC系统信噪比曲线

Fig. 9 SNR curve of TIADC system

4 结论

本文以TIADC系统的模型为基础,根据两角和的正

弦展开式提出一种自适应失配误差估计方法。

该方法需要预先模拟生成理想TIADC系统对正余测试信号的采样值并存入TIADC系统的存储空间。由于在迭代过程变步长最小均方误差法VSS-LMS的使用使得每通道仅仅需要少于128个采样点即可完成失配误差的参数估计。该方法对TIADC系统的存储空间要求较低并且具有较低的计算量。实测结果表明该方法可以有效的估计TIADC系统的失配误差并且有效的提高TIADC系统的信噪比,该方法适用于存储示波器具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 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(自然科学版), 2013, 40(3): 28-35.
WANG Y J, LI M. Novel adaptive method based on the Taylor series to compensate channel-mismatches of TIADC[J]. Journal of Xidian University(Natural Science Edition), 2013, 40(3): 28-35.
- [2] 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): 842-849.
YANG K J, TIAN SH L, JIANG J, et al. 20 GSPS high speed data acquisition system based on TIADC[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(4): 842-849.
- [3] 叶芃,曾浩,田书林,等. 一种高速并行采样实时校正方法研究[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 166-170.
YE P, ZENG H, TIAN SH L, et al. Research on the real-time calibration technology for high-speed parallel sampling[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 166-170.
- [4] GUO L P, TIAN S L, WANG Z G. Estimation and correction of gain mismatch and timing error in time-interleaved ADCs based on DFT[J]. Metrology and Measurement Systems, 2014, 21(3): 535-544.
- [5] WANG L, GUO L P, JIANG J, et al. A Hilbert transform based method to estimate and correct timing error in time-interleaved ADCs[J]. Journal of Electron Test, 2015, 31(3): 291-299.
- [6] 向前,刘洪庆,包思云. 基于等效采样的TIADC通道失配校准方法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(4): 34-37.
XIANG Q, LIU H Q, BAO S Y. Correction method for channel mismatches errors in TIADC system based on the principle of equivalent sampling[J]. Journal of Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(4): 34-37.
- [7] HUANG S, LEVY B C. Adaptive blind calibration of timing offset and gain mismatch for two-channel time-interleaved ADCs[J]. IEEE Transactions on Circuits &

- Systems I Regular Papers, 2006, 53(6): 1278-1288.
- [8] HUANG S, LEVY B C. Blind calibration of timing offsets for four-channel time-interleaved ADCs[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 2007, 54(4): 863-876.
- [9] SINGH S, ANTILA L, EPP M, et al. Analysis, blind identification, and correction of frequency response mismatch in two-channel time-interleaved ADCs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(5): 1721-1734.
- [10] SINGH S, ANTILA L, EPP M, et al. Frequency response mismatches in 4-channel time-interleaved ADCs: Analysis, blind identification, and correction[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 2015, 62(9): 2268-2279.
- [11] TEYOU G K, PETIT H, LOUMEAU P. Adaptive and joint blind calibration of gain, time-skew and bandwidth mismatch errors in time-interleaved ADCs [J]. Electronics Letters, 2015, 51(22): 1752-1754.
- [12] WANG Z G, GUO L P, TIAN S L, et al. Estimation and correction of mismatch errors in time-interleaved ADCs[J]. Journal of Electronic Testing, 2014, 30(5): 629-635.
- [13] YANG K J, TIAN S L, YE P, et al. A statistic-based calibration method for TIADC system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015: 1-9.
- [14] 李竹, 杨培林, 行小帅. 一种改变步长 LMS 算法及其在系统辨识中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(7): 1340-1344.
- LI ZH, YANG P L, XING X SH. Modified variable step size LMS algorithm and its application in system identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(7): 1340-1344.
- [15] 张红梅, 韩万刚. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法研究及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1822-1830.
- ZHANG H M, HAN W G. A new variable step LMS algorithm and its application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1822-1830.
- [16] 陈泳, 田金鹏, 刘燕平. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 27-31.
- CHEN Y, TIAN J P, LIU Y P. New variable step size LMS adaptive filtering algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(4): 27-31.
- [17] 刘艳茹, 田书林, 王志刚, 等. 一种基于 Farrow 滤波器的并行采样时间误差校正[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 50-54.
- LIU Y R, TIAN SH L, WANG ZH G, et al. A sample-timing error calibration for time-interleaved ADC based on Farrow filter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(1): 50-54.
- [18] 田书林, 潘卉青, 王志刚. 一种并行采样中的自适应非均匀综合校准方法[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2298-2301.
- TIAN SH L, PAN H Q, WANG ZH G. An adaptive synthesis calibration method for time delay of sampling systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2298-2301.
- [19] 秦小芳, 龙兵, 曾浩, 等. 实时校正时间误差的 Farrow 结构滤波器设计[J]. 电子测量技术, 2011, 34(8): 27-30.
- QIN X F, LONG B, ZENG H, et al. Design of farrow structure filter for real time correction of time error[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(8): 27-30.
- [20] 秦国杰, 刘国满, 高梅国, 等. 一种时间交替 ADC 时间失配误差自适应校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2730-2735.
- QIN G J, LIU G M, GAO M G, et al. Adaptive calibration method for timing mismatch error in time-interleaved ADC system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(12): 2730-2735.

作者简介



白旭, 2008 年于河北工业大学获得学士学位, 2012 年于电子科技大学获得硕士学位, 现为北华航天工业学院讲师, 主要研究方向为信号采集和处理。
E-mail: 807280228@qq.com

Bai Xu received B. Sc. from Hebei University of Technology in 2008, and M. Sc. from University of Electronic Science and Technology of China in 2012, respectively. Now he is lecturer in North China Institute of Aerospace. His main research interest includes signal sampling and processing.



韦雪洁 (通信作者), 2002 年于中央民族大学获得学士学位, 2006 年于南昌航空工业学院获得硕士学位, 现为北华航天工业学院副教授, 主要研究方向为信号采集和处理。
E-mail: xuejie_wei@126.com

Wei Xuejie (Corresponding author) received B. Sc. from Central University of Nationalities in 2002, and M. Sc. from Nanchang Institute of Aeronautical Technology in 2006, respectively. Now she is associate professor in North China Institute of Aerospace. Her main research interest includes signal sampling and processing.



胡辉, 1964 年出生, 现为北华航天工业学院教授, 主要研究方向为信号采集和处理。
E-mail: 452725236@qq.com

Hu Hui was born in 1964. She is a professor in North China Institute of Aerospace. Her main research interest includes signal sampling and processing.