

# 一种并行采样中的自适应非均匀综合校准方法

田书林, 潘卉青, 王志刚

(电子科技大学自动化工程学院, 四川成都 610054)

**摘 要:** 并行交替采样中的时间非均匀和幅度非均匀误差严重影响系统性能. 本文提出一种基于自适应控制的综合校准方法, 同时进行时基、增益和偏置误差的估计, 并在估计过程中自动完成校正; 采用分数延时滤波器实现时基误差的校正, 降低了设计难度与成本. 系统校正性能和实时性高, 不需要增加额外的校准信号, 可以自动跟踪因老化或环境因素导致的误差参数变化.

**关键词:** 并行交替采样; 非均匀; 时基误差; 自适应

**中图分类号:** TN957.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 10-2298-04

## An Adaptive Synthesis Calibration Method for Time Delay of Sampling Systems

TIAN Shu-lin, PAN Hui-qing, WANG Zhi-gang

(School of Automation Engineering, UESTC of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** In parallel time-interleaved data acquisition systems, timing and amplitude mismatches of this structure degrades the performance of the whole ADC system. In this paper, an adaptive synthesis calibration algorithm is proposed. It could estimate the timing error, gain and offset errors, simultaneously calibrate the mismatches automatically. The fractional delay filter is adopted to complete timing adjustment, which simplifies the design and decrease the cost. This method has good calibration and high real time characteristics, no extra calibration signal is needed, and it could dynamically track the changes of mismatches due to aging and temperature variation efficiently.

**Key words:** time-interleaved sampling; nonuniform; timing Mismatch; self-adaptive

## 1 引言

并行交替采样是解决模数转换(A/D)速度限制, 提高数字化率的有效途径<sup>[1]</sup>. 但由于并行通道之间的采样时钟相位控制偏差(时基偏差), 以及增益、偏置等参数不一致, 引起采样的时间和幅度非均匀<sup>[1,2]</sup>, 导致系统性能下降. 为此, 大量学者对非均匀参数估计方法、各种非均匀误差的校正方法分别进行了研究<sup>[3~7]</sup>. 但这些研究主要针对某项非均匀误差进行, 没有从三种误差的综合影响出发考虑校正问题; 也有研究用自适应控制方法估计非均匀参数<sup>[8]</sup>, 但估计和校准过程是分开的. 完成校正涉及的所有误差的估计、校正等环节都需要一定时间代价, 累积产生的实时性问题对工程应用而言往往无法忍受. 因此, 研究能同时进行时基、增益和偏置误差的估计, 并在估计过程中同时完成校正的综合校准方法十分必要. 此外, 校准过程需要额外的标准激励信号, 误差参数变化后需重新修改校正电路或软件, 校正运算量大等未很好解决的问题, 也需要在研究中重点考虑.

自适应控制是一种在工作过程中不断地检测系统参数或运行指标, 根据参数的变化或运行指标的变化, 改变控制参数或控制作用, 使系统运行于最优或接近于最优工作状态的反馈控制<sup>[9]</sup>. 将自适应控制方法用于非均匀校正, 通过将误差的综合影响作为反馈量, 控制校正过程, 不仅可以实现误差估计与校正的有机结合, 而且可以自动跟踪误差的变化.

本文通过构造误差函数直接控制校正模块, 采用自适应策略调整校正参数, 在实现误差准确估计的同时完成误差校正; 利用分数延时滤波器实现时基误差的校正, 降低硬件设计难度和系统成本, 提高校正性能.

## 2 自适应综合校准原理

自适应综合校准的基本原理如图 1 所示. 设采样通道 0 为参考通道, 相邻通道间理想的采样间隔为  $T_s$ , 为获得通道  $m$  与参考通道之间因失配产生的采样偏差, 首先对通道  $m$  所获得的采样数据延迟  $mT_s$ , 使其与参考通道间只存在由增益误差  $g_m$ 、偏置误差  $o_m$ 、时基误差

$t_m$  所引入的偏差. 综合校准的目的就是利用偏差信号  $e_m(k)$  提供给后续的校正模块, 最终将偏差调整为 0, 即通道间  $g_m$ 、 $o_m$  相等,  $t_m$  为零.

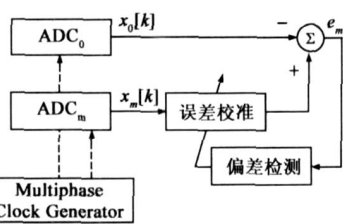


图1 自适应综合校准的基本原理

对于理想的  $mT_s$  延时, 是一个固定已知的常量, 可以使用一个系数为 Sinc 函数的 FIR 滤波器进行拟合<sup>[10]</sup>。从图 1 可以得到系统误差函数为:

$$e_m(k) = x_0(k) - \hat{g}_m^{(k)} x_m(k - mT_s - \hat{D}_m^{(k)}) - \hat{o}_m^{(k)} \quad (1)$$

利用式(1)获取系统失配相对误差函数  $e_m(k)$ , 目标是使得误差函数的均方误差最小, 达到提高系统性能的目的, 即代价函数可以写成:

$$J = E\{e^2(k)\} = f(\hat{g}^{(k)}, \hat{o}^{(k)}, \hat{D}^{(k)}) \quad (2)$$

代价函数  $J$  是一个三维的非线性优化问题, 运用松弛法<sup>[11]</sup>, 将其解耦转换成 3 个一维优化问题, 分别对  $g_m$ 、 $o_m$ 、 $t_m$  进行迭代, 便可以提供给后续的校正模块, 产生适当的调节信号, 控制校准单元, 使系统的输出慢慢与理想值接近, 偏差信号趋于 0, 即可达到系统综合校准的目的。

偏置误差对于系统相当于产生的加性噪声, 可使用累加单元可以进行补偿。同时代价函数  $J$  是一个单峰函数, 有唯一最小值, 可以采样最速下降法, 利用梯度技术对累加单元的更新方程进行如式(3)所示的更新, 其中  $\mu_o$  是更新步长:

$$o_m^{(k+1)} = o_m^{(k)} + \mu_o \nabla J_{o_m}(k) \quad (3)$$

增益误差对于系统相当于附加的乘性噪声, 可使用乘法单元可以进行补偿, 实现校正, 其更新方程如式(4), 其中  $\mu_g$  为收敛因子:

$$g_m^{(k+1)} = g_m^{(k)} + \mu_g \nabla J_{g_m}(k) \quad (4)$$

而对于时基误差  $t_m$  这个未知参数, 它相对于系统的采样周期  $T_s$  是一个十分微小的时间量, 试图通过延时时间可变的延时电路进行修正, 几乎不可能实现; 即使能够实现, 其复杂度产生的代价也无法容忍。为此, 本文采用分数延时 (Fractional Delay) 滤波器的数字处理技术, 以校正采样时钟非均匀所引入的误差。这种结构的滤波器的优势在于, 当时基误差  $t_m$  改变时, 无需改变滤波器的结构和参数, 只需更新输入参数, 便可实现对时基误差的自适应校准。

$$D_m^{(k+1)} = D_m^{(k)} + \mu \nabla J_{D_m}(k) \quad (5)$$

其中,  $\mu$  是时基误差收敛因子。

通过上述分析, 得到自适应非均匀综合校准系统

的组成结构如图 2 所示。

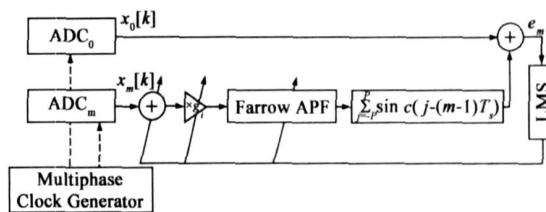


图2 自适应综合校准的系统组成

### 3 分数延时滤波器

分数延时滤波器通过数字滤波的方法重构采样序列, 实现信号  $e^{-j\omega t_m/T_s}$  的延时。分数延时滤波器的实现方法多为采用逼近的方法, 基于 Farrow 结构<sup>[9]</sup>, 达到理想频率响应。

设有  $P_2 + 1$  阶 FIR 滤波器逼近  $h_d(n)$ , 即传输函数为:

$$H_d(z) = \sum_{n=0}^{P_2} h_d(n) z^{-n} \quad (6)$$

则式(1)可以写为:

$$e_m(k) = x_0(k) - \hat{g}_m^{(k)} \sum_{i=-P_3}^{P_1} \text{sinc}(j - mT_s) \cdot x_m(k - j - i) h_{D_m}^{(k)}(i) - \hat{o}_m^{(k)} \quad (7)$$

若每个滤波器的系数用样条拟合或多项式逼近, 可进一步将  $P_2 + 1$  阶的滤波器继续分解为  $P_2 + 1$  个  $P_3 + 1$  阶子滤波器组, 便形成了 Farrow 结构。例如, 将滤波器系数  $h_d(n)$  关于  $D_m = t_m/T_s$  做多项式展开, 取  $P_3 + 1$  阶:

$$h_d(n) = \sum_{l=0}^{P_3} c_l(n) D_m^l, \quad n=0, 1, \dots, P_2 \quad (8)$$

式(6)可改写为:

$$H_d(z) = \sum_{n=0}^{P_2} \sum_{l=0}^{P_3} c_l(n) D_m^l z^{-n} = \sum_{l=0}^{P_3} \left[ \sum_{n=0}^{P_2} c_l(n) z^{-n} \right] D_m^l = \sum_{l=0}^{P_3} C_l(z) D_m^l \quad (9)$$

因此可以得到如图 3 所示的滤波器结构:

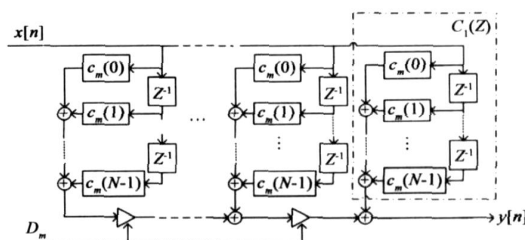


图3 分数延时滤波器结构图

$e_m(k)$  最终可以转换为:

$$e_m(k) = x_0(k) - \hat{g}_m^{(k)} \sum_{i=0}^{P_2} \sum_{j=-P_1}^{P_1} [c_l(i) D_m^l \sin(j - mT_s) \cdot x_m(k - j - i) - \hat{o}_m^{(k)}] \quad (10)$$

后续可利用式(5)更新 Farrow 结构分数阶延时滤波

器的输入,对通道进行时钟补偿.

#### 4 校准过程

失配偏差估计和校准的步骤可以归纳如下:

(1) 合理选择迭代步长  $\mu_g, \mu_o, \mu$ , 如果可以获取失配误差的先验知识,则可以适当放大步长;

(2) 初始化参数  $\hat{g}^{(0)}, \hat{o}^{(0)}, \hat{D}^{(0)}$ ;

(3) 对输入信号进行采样, 获取  $x_m[k], m = 1, \dots, M$ ;

(4) 根据式(10)计算  $e_i(k)$ ;

(5) 根据式(3)、(4)、(5)计算更新参数  $\hat{D}^{(k)}, \hat{o}^{(k)}, \hat{g}^{(k)}$ , 送入校准模块;

其中:

$$\begin{aligned} \nabla J_{o_m}(k) &= \frac{\partial^2 e_m(k)}{\partial o_m} = -2e_m(k) \\ \nabla J_{g_m}(k) &= \frac{\partial^2 e_m(k)}{\partial g_m} \\ &= -2e_m(k) \cdot \sum_{i=0}^{P_2} \sum_{j=-P_1}^{P_1} \text{sinc}(j - mT_s) \cdot x_m(k - j - i) h_{D_m}^{(k)}(i) \\ \nabla J_{D_m}(k) &= \frac{\partial^2 e_m(k)}{\partial D_m} \\ &= 2e_m(k) \sum_{i=0}^{P_2} \sum_{j=-P_1}^{P_1} \text{sinc}(j - mT_s) \cdot x_m(k - j - i) \frac{\partial}{\partial D_m} c_l(i) D_m^l \\ &= 2e_m(k) \sum_{i=0}^{P_2} \sum_{j=-P_1}^{P_1} \text{sinc}(j - mT_s) \cdot x_m(k - j - i) \sum_{l=0}^{P_3-1} (l+1) c_{l+1}(i) D_m^l \quad (11) \end{aligned}$$

(6) 如果  $e_m = 0$ , 则停止更新相应误差方程, 否则重复(4).

因此, 对于自适应方法来说, 虽然系统初始参数未知, 但通过上述方法不断调整, 系统初始参数不确定对系统运行性能的影响将逐步减小, 经过一段时间后, 系统最终将自动地调整到与期望的相一致.

#### 5 收敛分析

为验证上述时基误差估计算法的有效性, 根据通道  $m$  与通道 1 间的误差:

$$\begin{aligned} e_m(k) &= [g_m y_1(k + D_m) - o_m] \\ &\quad - [\hat{g}_m^{(k)} y_m(k - (m-1)T_s - \hat{D}_m^{(k)}) + \hat{o}_m^{(k)}] \\ &\quad [g_m y_1(k + D_m) - o_m] - [\hat{g}_m^{(k)} y_1(k - \hat{D}_m^{(k)}) - \hat{o}_m^{(k)}] \end{aligned} \quad (12)$$

$E\{\hat{g}_m^{(k+1)}\}$  可以由下式表示, 其中  $E\{\cdot\}$  为数学期望.

$$\begin{aligned} E\{\hat{g}_m^{(k+1)}\} &= E\{\hat{g}_m^{(k)} + \mu_g \frac{\partial e_m^*(k) e_m(k)}{\partial \hat{g}_m^{(k)}}\} \\ &= E\{\hat{g}_m^{(k)} + 2\mu_g e_m^*(k) \frac{\partial e_m(k)}{\partial \hat{g}_m^{(k)}}\} \\ &= \hat{g}_m^{(k)} + 2\mu_g \sum_{y_1}^2 [g_m - \hat{g}_m^{(k)}] \quad (13) \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} E\{e_m^*(k) \frac{\partial e_m(k)}{\partial \hat{g}_m^{(k)}}\} &= E\{e_m^*(k) \frac{\partial}{\partial \hat{g}_m^{(k)}} [g_m y_1(k - \hat{D}_m^{(k)})]\} \\ &= E\{[g_m y_1(k + D_m) - o_m] \\ &\quad - [\hat{g}_m^{(k)} y_1(k - \hat{D}_m^{(k)}) - \hat{o}_m^{(k)}] y_1(k - \hat{D}_m^{(k)})\} \\ &= E\{[g_m y_1(k + D_m) - \hat{g}_m^{(k)} y_1^*(k - \hat{D}_m^{(k)})] y_1(k - \hat{D}_m^{(k)})\} \\ &= g_m^2 \sum_{y_1}^2 \text{sinc}(D_m - \hat{D}_m^{(k)}) - \hat{g}_m^{(k)2} \sum_{y_1}^2 g_m^2 \sum_{y_1}^2 - \hat{g}_m^{(k)2} \sum_{y_1}^2 \quad (14) \end{aligned}$$

利用迭代递推关系可以得:

$$E\{\hat{g}_m^{(k+1)}\} = \hat{g}_m^{(0)} + 2\mu_g \sum_{y_1}^2 [g_m - \hat{g}_m^{(0)}] (2 - 2\mu_g \sum_{y_1}^2)^{k-1} \quad (15)$$

由式(15)可见, 当收敛因子  $0 < \mu_g < \frac{1}{2 \sum_{y_1}^2}$  时, 经过  $k$

次迭代后, 误差估计值  $E\{\hat{g}_m^{(k)}\}$  收敛于实际的增益误差  $g_m$ . 同样的, 可以得到, 当收敛因子  $0 < \mu_o < \frac{1}{4 \sum_{y_1}^2}$ ,

$0 < \mu_o < \frac{1}{4 \sum_{y_1}^2}$  时, 经过  $k$  次迭代后, 算法收敛.

#### 6 仿真验证

为验证本文方法, 利用双通道 8-bit ADC 构建并行交替采样系统进行校准实验: 输入时钟频率为  $f_o = 15\text{MHz}$  的正弦信号, 利用整体采样率为  $f_s = 500\text{MHz}$  的系统对其进行采样. 设通道 2 的初始增益误差  $g_2 = 1.1$ , 偏置误差为  $o_2 = 0.035$ , 时基误差为  $t_2 = 0.2 * T_s$ .

系统校准前后频谱图分别如图 4、5 所示. 结果显示, 信号中原多出的误差谱线基本消除, 系统信噪比由原来的 24.8 提高到 43, 将近一倍, 校正后系统的性能得到了大幅提高.

在校准系统中, 算法的收敛速度和估计精度是两个相互制约的因素. 在交替采样系统中, 三种通道偏差相对与系统的时基、偏置、增益而言已是很小的差异

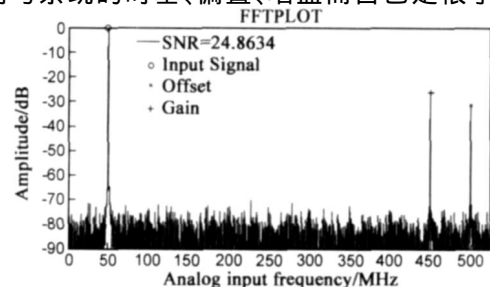


图4 校准前信号频谱图

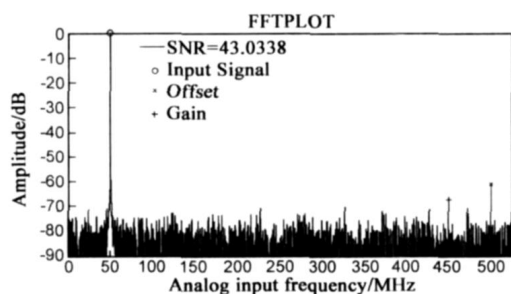


图5 校正后信号频谱图

量,所以在算法步长的选择上,是在收敛范围内选择了较小的步长  $\mu_g = 0.0008$ ,  $\mu_o = 0.0003$ ,  $\mu_D = 0.0003$ , 得到较高的估计精度,同时保证算法的收敛性,也得到了适中的收敛速度.失配误差估计过程如图6所示.结果表明:经过自适应迭代得到  $\hat{t} = 0.1942 T_s$ 、 $\hat{g} = 1.1011$ 、 $\hat{o} = 0.034963$ .其中,时基误差和偏置误差的收敛速度要优于增益误差的收敛速度;总体在采样达到2500~3000点时,校正模块对系统初始偏差的估计收敛于系统的设定值,收敛时间约为5~6 $\mu$ s,相对于通道失配误差的变化速度是相当有优势的.

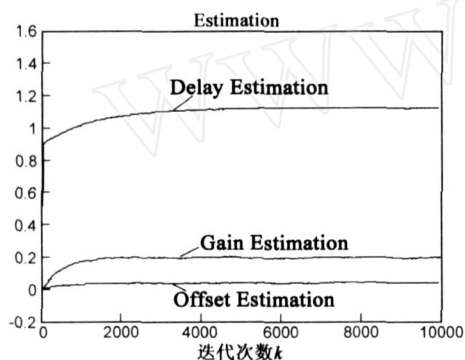


图6 通道失配误差的估计过程

实际应用中,通过第一次校准可获得失配误差的先验值,由于非均匀误差具有基本不变或变化缓慢的特征,随后校正所需的迭代过程将大幅度缩减,可以完全满足应用中的实时性要求.

## 7 结论

本校准方法在实现误差准确估计的同时完成误差校正,提高了技术实现效率.同时,结合分数延时滤波器实现时基误差的校正,降低硬件设计难度和系统成本.系统校正性能和实时性高,不需要增加额外的校准信号,可以自动跟踪因老化或环境因素导致的误差参数变化,特别适合于高速数字存储示波器应用.

## 参考文献:

- [1] Vogel, C, D Draxelmayer, et al. Spectral shaping of timing mismatches in time-interleaved analog-to-digital converters [A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) [C]. IEEE Press, vol. 2, 2005, 1394 - 1397.

- [2] S K Mitra, A Petraglia. Analysis of mismatch effects among A/D converters in a time-interleaved waveform digitizer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1991, 40 (5): 831 - 835.
- [3] Y C Jenq. Digital spectra of nonuniformly sampled signals: a robust sampling time offset estimation algorithm for ultra high-speed waveform digitizers using interleaving[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1990, 39 (1): 71 - 75.
- [4] J M Pereira, P M B Silva, A M C Serra. An FFT-based method to evaluate and compensate gain and offset errors of interleaved ADC systems [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53 (2): 423 - 430.
- [5] C Knapp, G Carter. The generalized correlation method for estimation of time delay [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1976, 24 (4): 320 - 327.
- [6] 邱天爽, 王琰. 广义相关时间延迟估计的自适应实现[J]. 海洋技术, 1994, 13 (4): 20 - 29.
- [7] M Olsson, H Johansson, P L Wenborg. Delay estimation using adjustable fractional delay all-pass filters [A]. Proceedings of the 7th Nordic Signal Processing Symposium (NORSIG) [C]. IEEE Press, 2006, 346 - 349.
- [8] H Jin, E K F Lee. A digital-background calibration technique for minimizing timing-error effects in time-interleaved ADCs [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2000, 47 (7): 603 - 613.
- [9] 陈新海, 李言俊, 周军. 自适应控制及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
- [10] H C So, P C CHING, Y T CHAN. A new algorithm for explicit adaptive of time delay[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 1994, 42 (7): 1816 - 1820.
- [11] J LI, R B WU. An efficient algorithm for time delay estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46 (8): 2231 - 2235.

## 作者简介:



田书林 男, 1968年6月出生. 教授, 博士生导师. 现任国家电子测量仪器标准化技术委员会, 电子科技大学自动化工程学院院长. 长期从事高速测试信号获取与产生、电子系统综合测试诊断方向的研究, 主持完成各类国家项目11项, 获省部级科技进步奖9项, 发表学术论文30余篇, 出版规划教材或专著2部. 获第八届四川省青年科技奖荣誉称号, 入选教育部新世纪优秀人才计划. E-mail: shulin@uestc.edu.cn

潘卉青 女, 博士研究生. 1981年10月出生. 现就读于电子科技大学自动化工程学院, 测试计量技术于仪器专业. 主要研究方向为测试测量仪器、非均匀信号处理. E-mail: panhuiqing@uestc.edu.cn