

DOI: 10.3724/SP.J.1187.2010.00034

一种并行交替采样中时基非均匀信号自适应重构方法*

潘卉青 田书林 叶 芃 曾 浩

(电子科技大学自动化工程学院, 成都 611731)

摘 要: 并行采集系统中, 通道间时基延迟的不一致性严重降低了系统性能。通过对系统时基误差分量的分析, 提出了一种基于自适应控制的非均匀信号重构方法。该方法不需要额外增加校准信号, 能在误差估计的同时自动完成信号重构, 实时性高; 无需重构滤波器, 降低了系统设计难度及成本。实验结果表明, 经过约 250 次自适应迭代后, 该重构算法能有效估计通道时基误差, 具有迭代次数少、运算量小、能动态跟踪时基延迟变化的特点; 重构后系统信噪比由原来的 33 dB 提高到 48 dB, 有效位数提高近 2.5 bit, 系统性能得到了大幅提高。

关键词: 并行交替采样; 非均匀; 时基误差; 自适应; 信号重构

中图分类号: TN957.5

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.4010

Adaptive signal reconstruction for timing nonuniform of parallel sampling systems

Pan Huiqing Tian Shulin Ye Peng Zeng Hao

(School of Automation Engineering, UESTC of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In parallel time-interleaved sampling systems, timing mismatch of this structure degrades the performance of whole ADC system. In this paper, an adaptive signal reconstruction algorithm is proposed by analyzing the timing mismatch between channels. This algorithm could estimate timing mismatch, and simultaneously reconstruct the sampling data automatically with no needing of extra calibrating signal and the restructuring filter, that simplifies the design and has high real-time. Computer simulation results demonstrate it could estimate the timing mismatch efficiently and dynamically track the change with less steps and computation.

Keywords: time-interleaved sampling; nonuniform; timing mismatch; self-adaptive; signal reconstruction

1 引 言

信号重构, 就是利用有限个采样所得到的数据值按照一定的法则进行运算, 以确定原始未知信号在所需的各个理想时间点上的值。实际的并行交替采样中, 通道之间的采样时钟相位控制偏差(时基偏差), 引起了采样的时间非均匀^[1-2], 导致采样波形非线性失真^[3], 为补偿系统的无杂散动态范围 SFDR (spurious free dynamic range) 和实际信噪比 SNR (signal-to-noise ratio), 有效的还原信号原貌, 需要对采样序列进行信号重构。

与均匀采样相类似, 当并行交替采集系统的平

均采样率不小于奈奎斯特采样率 (Nyquist rate) 时, 原始带限连续信号可由其非均匀采样离散值唯一重构^[4]。为此, 大量文献对非均匀信号重构中所使用的时基偏差的估计方法、信号重构方法分别进行了阐述。现有估计方法大多通过输入标准激励信号进行, 如信号谱分析方法^[5]、相关法^[6-7]、参数模型法^[8]等, 由于这些方法需要加入额外的频谱纯净的已知信号, 不仅估计过程复杂, 而且需要在测试前增加单独的估计环节, 不具有实时性。盲估计法^[9]虽无需特殊激励信号, 直接采集未知被测信号通道间差异获取时基偏差, 但算法计算量大, 不适于实际工程应用。非均匀内插信号重构算法^[10]可对并行系统非均匀信

本文于 2009 年 7 月收到。

*基金项目: 国家自然科学基金(编号: No. 60772145)资助项目; 国家自然科学基金(编号: 60827001)资助项目。

号进行重构,但系统通道数改变时需要改变重构算法的结构。分数阶延时滤波器实现的信号重构算法^[11],时基误差改变时,无需改变滤波器的结构和参数,但只适用于通道数较少的系统,通道数增大后,资源消耗过大。也有利用自适应方法估计非均匀参数^[12],但估计和重构过程是分开的,完成误差估计、重构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,研究能在估计的同时完成信号重构的算法,解决估计过程需要额外的标准激励信号,以及运算量过大等问题十分必要。从采样数据的样本统计出发,通过构造误差函数,采用自适应策略,估计时基偏差,解决一次性估计运算量过大的问题;并利用误差函数直接控制重构模块,实现信号误差准确估计的同时完成信号重构,降低硬件设计难度和系统成本,提高系统性能。该方法不需要特殊测试信号,重构过程与实际采集过程同时进行,可以跟踪随环境温度或仪器的老化而导致的时基误差参数变化。

2 并行交替采集系统

ADC 并行交替采集系统采用 M 片 ADC 进行并行逐次交替采样,两次相邻采样时间间隔为 $T_s=1/f_s$,各 ADC 采样速率为 f_s/M ,后端利用重组使整个系统等效采样率达到 f_s 。由于通道间时基误差 Δt_n 的存在,系统对输入信号 $x(t)$ 的实际输出序列为:

$$y[n] = x(t_n) = x(nT_s + r_n T_s), n = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中: r_n 是描述采样间隔非均匀度的一个变量,并以 M 为周期,即:

$$r_n = r_{n+M} = \frac{\Delta t_n}{T_s} \quad (2)$$

时基延迟误差的不一致性,造成实际采样是非均匀的,相对于对被采样信号进行不需要的相位调制,严重降低系统的无杂散动态范围和实际信噪比。非均匀信号重构的目的就是通过估计时基误差,获取系统时基非均匀所引入的误差分量,反馈给后续的误差校准模块进行重构,以保证系统的性能^[3]。

3 自适应信号重构

3.1 信号重构基本原理

自适应控制是一种在工作过程中不断检测系统

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^[13]。将自适应控制方法用于非均匀信号重构,通过将误差的综合影响作为反馈量,控制重构过程,不仅可以实现误差估计与信号重构的有机结合,降低一次性获取误差的复杂度,而且可以自动跟踪误差的变化。

为获得时基误差引入的影响,将通道采集数据在 n 时刻处做 Taylor 展开:

$$y[n] = x(nT_s + r_n T_s) \approx x(nT_s) + (r_n T_s) x'(nT_s) + o(r_n T_s) \quad (3)$$

式中: $x'(\cdot)$ 为信号的一阶导数; $o(\cdot)$ 为信号 Taylor 展式的高阶导数余项。由式(3)可以得到理想采样信号:

$$x(nT_s) = y[n] - e[n] \quad (4)$$

式中:

$$e[n] \approx r_n T_s x'(nT_s) \quad (5)$$

从式(4)可以看出,由于时基偏差 Δt_n 的存在,相当于在理想信号上叠加了非均匀误差分量 $e[n]$,其大小取决于采样间隔非均匀度 r_n 、采样时钟 T_s 以及输入信号的一阶导函数。非均匀信号重构就是,利用通道采样数据的统计特性,构造误差函数,控制参数 $\hat{e}[n]$,提供给后续的重构模块,以获取理想采样信号。其基本原理如图 1 所示。因任意多通道系统可以分解为后续各通道($i=1,2,\dots$)与参考通道($i=0$)构成的双通道时基偏差估计模型。简便起见,重点利用双通道特性进行分析。

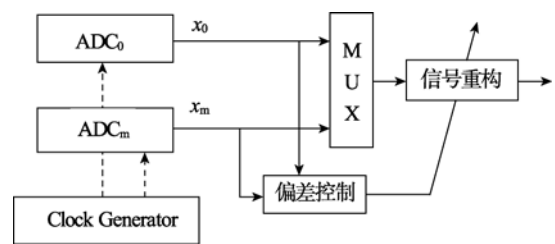


图 1 时间非均匀自适应信号重构基本原理
Fig.1 Basic principle of adaptive signal reconstruction

3.2 时间非均匀与误差分量的自适应获取

在构造误差分量 $e[n]$ 的过程中,首先需要获取输入信号的一阶导函数 $x'(nT_s)$ 。进一步分析系统通道 0 采样数据,并设通道 1 为参考通道,即 $r_1=0$,可由其相邻时刻采样数据差 $e_{0,0}[n]$:

$$e_{0,0}[n] = y[2(n+1)] - y[2n] \approx 2T_s x'(2nT_s) \quad (6)$$

近似计算得到 $x'(nT_s)$:

$$x'(nT_s) \approx \frac{e_{0,0}[n]}{2T_s} \quad (7)$$

再次, 为方便获取系统时基非均匀性 r_1 用于信号重构, 可对系统通道 0 与通道 1 的采样数据进行分析:

$$e_{1,0}[n] = y[2n+1] - y[2n] \approx (1+r_1)T_s x'(2nT_s) \quad (8)$$

可见, 利用通道间偏差信号 $e_{1,0}[n]$ 可实现对系统均匀性的测试。式(8)的求解过程可转换成优化问题, 对 r_1 进行最小均方 (LMS) 迭代, 因此构造误差函数:

$$e_2[n] = e_{1,0}[n] - (1+\hat{r}_1)T_s x'(2nT_s) \quad (9)$$

目标是使误差函数 $e_2[n]$ 均方误差最小, 达到估计非均匀性 r_1 的目的, 其代价函数如下:

$$J = E\{e_2^2[n]\} \quad (10)$$

代价函数 J 是一个单峰函数, 有唯一最小值, 可以采用最速下降法, 利用梯度技术对重构单元的更新方程进行如式(11)所示的更新, 其中 μ_r 是更新步长:

$$r_1^{(k+1)} = r_1^{(k)} - \mu_r \nabla J_{r_1}(k) \quad (11)$$

利用式(7)、式(11)获取了输入信号的一阶导函数 $x'(nT_s)$ 以及采样间隔非均匀度 $r_1^{(k)}$ 后, 就可以构成非均匀误差分量, 提供给后续的重构模块, 产生补偿信号, 使系统的输出慢慢与理想值接近, 即可达到信号重构的目的。通过上述分析, 得到自适应非均匀信号重构系统的组成结构如图 2 所示。这样不需要特殊的校准信号, 只需未知的被测信号即可估算出时基偏差用于重构, 计算量小, 适于工程应用。

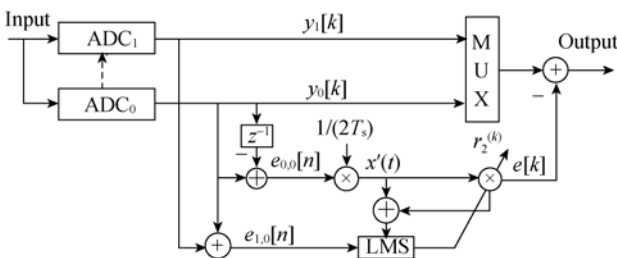


图 2 时间非均匀信号重构的基本原理

Fig. 2 Basic principle of timing mismatches signal reconstruction

3.3 信号重构过程

自适应非均匀信号重构的步骤可以归纳如下:

- 1) 合理选择迭代步长 μ_r , 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 $\hat{r}_1^{(0)}$;
- 3) 对输入信号进行采样, 获取 $y_m[k], m=0,1$;
- 4) 根据式(7)计算 $x'(nT_s)$;
- 5) 根据式(11)计算更新参数 $r_1^{(k+1)}$, 构成非均匀误差分量 $e[n]$, 送入重构模块;

$$\nabla J_{r_1}(k) = \frac{\partial^2 J(k)}{\partial r_1} = -\hat{r}_1^{(k)} T_s x'(2nT_s) \quad (12)$$

如果 $e_2(n) \rightarrow 0$, 则停止更新相应误差方程, 否则重复 3)。

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一致。

4 实验验证

为验证本文方法, 利用 Analog 公司提供的 8-bit ADC 模型(Ideal_8_Bit_adc)构建双通道并行交替采样系统, 用蒙特卡罗仿真方法在通道 2 时基误差为 $r_1=0.175$ 的情况下对采样数据进行自适应仿真分析, 验证本文算法的重构性能; 并与文献[12]中时基误差检测算法做估计性能比较。

输入时钟频率为 $f_0=20$ MHz 的正弦信号, 利用整体采样率为 $f_s=500$ MHz 的系统对其进行采样。采集序列重构前后频谱图分别如图 3、图 4 所示。结果显示, 信号中由时基偏差所引入误差谱线($f_{spur} = f_s/M - f_0 = 230$ MHz)基本消除, 系统信噪比由原来的 33 dB 提高到 48 dB, 系统有效位数提高了 2.5 bit, 重构后系统的性能得到了大幅提高。

失配误差估计过程如图 5 所示。因交替采样系统中, 时基偏差相对于系统采样率而言是很小的差异量, 所以在算法步长的选择上, 选择了较小的步长 $\mu_r=0.0001$, 初值 $r_1^{(0)}=0.5$ 。

图 5 中与文献[12]的对比结果表明: 经过自适应迭代得到 $\hat{r}_1 = 0.1758$, 估计精度高于文献[12]的估计精度; 只需在采集约 250 个采样点后, 迭代运算就可实现对时间非均匀的估计, 速度快, 而文献[12]中的估计算法则需经过约 1000 个采集时间后算法才收敛。

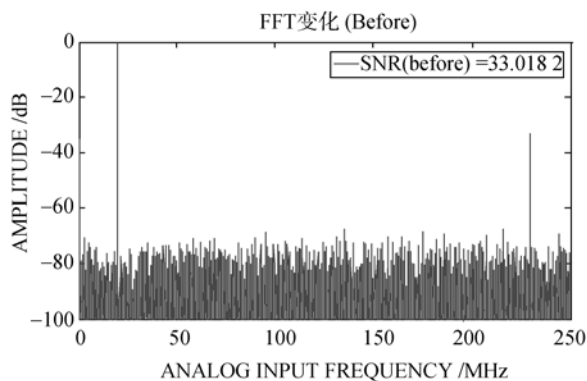


图 3 信号重构前频谱图
Fig. 3 FFT plot before calibration

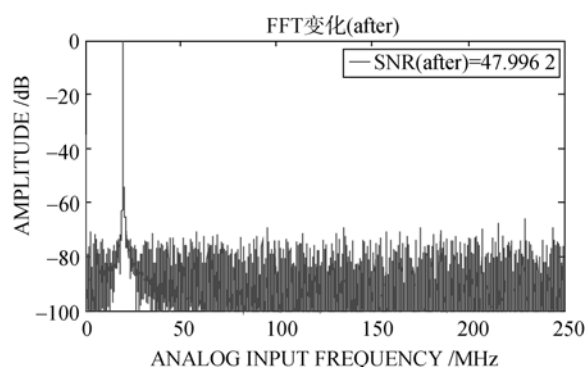


图 4 信号重构后信号频谱图
Fig. 4 FFT plot after calibration

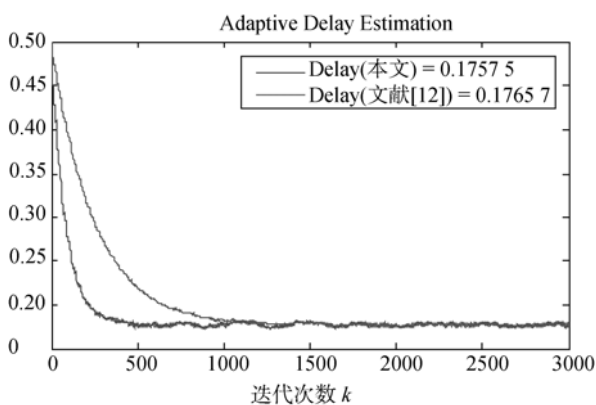


图 5 通道失配误差的估计过程对比结果
Fig. 5 Channel mismatches estimation results

与分数阶延时滤波器实现的信号重构算法^[14]类似, 系统时基非均匀参数发生变化后, 本算法无需重新设计重构滤波器, 降低了系统设计难度; 只需迭代约 250 次, 每次迭代运算中使用 2 次乘法运算, 即可实现对时基非均匀信号的重构, 而分数延时信

号重构算法使用了 4 组 4 阶的 Farrow 结构, 则需要在总体采样达到 2 500~3 000 点, 每次自适应迭代使用 19 次乘法运算后, 校正模块对系统时基偏差的估计才收敛, 运算量大, 信号重构代价高。当系统采集通道数增加后, 随着多个通道时基非均匀误差重构模块的使用, 后者将消耗比本文算法更多的系统资源。

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, 随后信号重构所需的迭代过程将大幅度缩减, 完全可以满足应用中的实时性要求。

5 结 论

利用并行时间交替采集实现高速采样时, 通道间的时基延迟误差降低了系统性能, 需要进行信号重构。本文通过对系统误差分量的分析, 实现了一种基于自适应控制, 能在误差准确估计同时实现信号重构的算法, 有助于系统性能的提高; 其系统硬件设计难度低, 迭代次数少, 运算量小, 提高了算法实现效率; 在无需增加额外的校准信号的情况下, 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等应用。

参考文献:

- [1] JENQ Y C. Digital spectra of nonuniformly sampled signals: fundamentals and high-speed waveform digitizers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1988, 37(2): 245-251.
- [2] VOGEL C. The impact of combined channel mismatch effects in time-interleaved ADCs[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54 (1): 415-427.
- [3] JENQ Y C. Digital spectra of nonuniformly sampled signals: digital look-up tunable sinusoidal oscillators [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1988, 37(3): 358-362.
- [4] BEUTLER F. Error free recovery of signals from irregularly spaced samples[J]. SIAM Rev., 1966, 8(3): 328-335.
- [5] JENQ Y C. 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.
- [6] KNAPP C, CARTER G. The generalized correlation

- method for estimation of time delay[J].IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1976, 24(4): 320-327.
- [7] 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): 20-31.
- QIU T S, WANG L. Adaptive realizations of the generalized correlation for time delay estimation [J]. Ocean Technology, 1994, 13(4): 20-31.
- [8] 梁志国, 朱济杰. 数据采集系统通道间延迟时间差的精确评价[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(6): 619-623.
- LIANG Z G, ZHU J J. The evaluation of channel delay of data acquisition systems[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(6): 619-623.
- [9] ELBORNSSON J, EKLUND J E. Blind estimation of timing errors in interleaved AD converters[J]. ICASSP-2001, 2001(6): 3913-3916.
- [10] 初任欣, 赵伟, 王廷云. 一类非均匀采样信号的内插重构算法[J]. 计量学报, 2000, 21(3): 210-215.
- CHU R X, ZHAO W, WANG T Y. Interpolation algorithm of a sort of nonuniformly sampled signals[J]. ACTA Metrologica Sinica, 2000, 21(3): 21-215.
- [11] KAAKINEN J Y, SARAMAKI T. An algorithm for the optimization of adjustable fractional-delay all-pass filters[J]. Proc. of the 2004 Int. Symp. On Circuits and Systems, 2004(3): 153-156.
- [12] SO H C. Adaptive time delay estimation with noise suppression for sinusoidal signals[J]. MWSCAS-2002, 2002(2): 412-415.
- [13] 陈新海, 李言佼, 周军. 自适应控制及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
- CHEN X H, LI Y J, ZHOU J. Adaptive control and application[M]. Xi an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998.
- [14] 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(2): 289-291.
- TIAN S L, PAN H Q, WANG Z G. An Adaptive Synthesis Calibration Method for Time Delay of Sampling Systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 268-271.

作者简介:

潘卉青: 2004年于电子科技大学获得学士学位, 现为电子科技大学自动化工程学院博士研究生, 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

Pan Huiqing: received B.Sc from University of Electronic Science and Technology of China in 2004. Now she is a doctor candidate in School of Automation Engineering, UESTC of China. Her research interests are measuring and testing technology and nonuniform signal processing.

田书林: 2009年于电子科技大学获得博士学位。现为电子科技大学自动化工程学院院长、教授、博士生导师。主要研究方向为高速测试信号获取与产生、电子系统综合测试诊断。

E-mail: shulin@uestc.edu.cn

Tian Shulin received PhD from University of Electronic Science and Technology of China in 2009. Currently, he is a professor and dean of School of Automation Engineering, UESTC of China. His research interests are high speed high precision data acquisition & processing and testing bus technology & testing system integration.