

doi: 10.7690/bgzh.2025.07.004

基于信号正交性的 TIS 系统定时失配盲校正方法

邱富军¹, 黎逸², 黎泽林^{2,3}, 印茂伟^{1,3}(1. 泸州职业技术学院智能控制与电子器件应用技术泸州市重点实验室, 四川 泸州 646000;
2. 成都航天通信设备有限责任公司, 成都 610000; 3. 西南科技大学国防科技学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 针对时域交织采样 (time-interleaved sampling, TIS) 系统通道间的时间失配问题, 提出一种时间校正 (signal-orthogonality-based timing calibration, SOTiC) 方法。基于信号正交性结合自适应迭代算法完成对双通道 TIS 系统中时间失配参数的估计及校正。推导多通道扩展结构, 将双通道校正结构通过奇偶通道重组扩展到 M 通道的 TIS 系统。理论和实验结果表明: SOTiC 具有收敛速度快、稳态误差小、计算复杂度低、可扩展性好等优点, 可广泛应用于高速/超高速采样系统定时误差的在线校正。

关键词: TIS; 定时校正; 信号正交; 奇偶信道重组; 多通道扩展结构

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

Blind Timing Mismatch Correction Method for TIS System Based on Signal Orthogonality

Qiu Fujun¹, Li Yi², Li Zelin^{2,3}, Yin Maowei^{1,3}(1. Intelligent Control and Electronic Device Application Technology Key Laboratory of Luzhou, Luzhou Vocational and Technical College, Luzhou 646000, China; 2. Chengdu Aerospace Communication Equipment Co., Ltd., Chengdu 610000, China;
3. School of Defense Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to solve the problem of timing mismatch between channels in time-interleaved sampling (TIS) systems, a signal-orthogonality-based timing calibration (SOTiC) is proposed. Based on the signal orthogonality and adaptive iterative algorithm, the estimation and correction of time mismatch parameters in dual-channel TIS system are completed. The multichannel extension structure is derived, and the two-channel correction structure is extended to the M-channel TIS system through odd-even channel recombination. The theoretical and experimental results show that SOTiC has the advantages of fast convergence, small steady-state error, low computational complexity and good scalability, and can be widely used in online correction of timing error in high speed/ultra high speed sampling systems.

Keywords: TIS; timing calibration; signal orthogonality; parity channel reorganization; multi-channel expansion architecture

0 引言

现代雷达、通信、电子战系统对模数转换器 (analog to digital converter, ADC) 的转换速率及转换精度要求不断提高, 单个 ADC 很难同时满足这 2 个要求。时域交织采样 (TIS) 系统利用 M 通道 ADC 并行交织采样, 采样率也得以成倍提升^[1], 很好地解决了该问题。在实际应用中, 由于器件制造差异、老化和温度变化等因素, 不同通道的工作情况会产生差异, 造成系统通道失配, 典型失配误差包括偏移失配、增益失配和时间失配, 这些误差将对 TIS 系统的整体性能带来严重影响, 反映在无杂散动态范围 (spurious free dynamic range, SFDR)、信噪失真比 (signal to noise ratio, SNDR) 等指标的下降。与偏移失配和增益失配相比, 时间失配造成系统性能的下降要明显得多^[2]。一般而言, 对 TIS 系统的

研究主要集中在解决失配参数估计和误差校正 2 个关键问题。在很多实际 TIS 系统中, 输入信号的各种参数未知, 导致盲校正方法的使用更广泛^[3]。

笔者提出一种适用于 TIS 系统定时误差的全数字校正技术, 又称为基于信号正交性的时间校正 (SOTiC)。SOTiC 利用基于信号正交性的特点, 结合自适应迭代方法, 能够快速精准地估计时间失配参数, 并采用类似基 2-FFT 的校正结构, 通过奇偶分组将双通道 TIS 系统的校正方法模块化地扩展到多通道 TIS 系统。

1 算法原理

1.1 双通道 TIS 系统通道模型

对于实际的双通道 TIS 系统, 假设采样时间 n 从 0 开始, 则子 ADC 的采样输出为:

收稿日期: 2024-09-12; 修回日期: 2024-10-13

基金项目: 国家科技部科技专项 (G2022036014L); 四川省科技计划重点项目 (2023YFG0135); 泸州市重点实验室开放基金 (ZK202201)

第一作者: 邱富军 (1982—), 男, 四川人, 硕士。

$$y_0[n] = \cos[\omega_0 \cdot (nT + \tau_0) + \theta], \quad n=0, 2, 4 \cdots 2n; \quad (1)$$

$$y_1[n] = \cos[\omega_0 \cdot (nT + \tau_1) + \theta], \quad n=1, 3, 5 \cdots 2n+1. \quad (2)$$

式中 $y_k[n] (k=0, 1)$ 为第 k 个通道的输出信号。在理想的 TIS 系统中, 时间失配 $\tau_k (k=0, 1)$ 为 0。文中 $\tau_0 + \tau_1 = 0$ 。TIS 系统信号的总时移与所研究的问题无关; 因此, 双通道 TIS 系统的时域模型为:

$$y[n] = \cos \left\{ \omega_0 \left[nT + \frac{\tau_0 - \tau_1}{2} - (-1)^n \cdot \frac{\tau_0 - \tau_1}{2} \right] + \theta \right\}, \quad n=1, 2, 3 \cdots \quad (3)$$

式中 $(\tau_0 - \tau_1)/2$ 为通道 0 和 1 的时间失配之差。假设通道 0 不存在时间失配, 时间失配只存在于通道 1。利用基于三角函数的变换方法, 双通道 TIS 系统的时域模型可写成如下公式:

$$y[n] = \underbrace{\cos[\omega_0 \cdot \frac{\tau_0 - \tau_1}{2}] \cdot \cos[\omega_0 \cdot (nT + \frac{\tau_0 - \tau_1}{2}) + \theta]}_{\text{desired signal}} + \underbrace{\sin[\omega_0 \cdot \frac{\tau_0 - \tau_1}{2}] \cdot \sin[(\omega_0 - \frac{\omega_s}{2}) \cdot nT + \omega_0 \cdot \frac{\tau_0 - \tau_1}{2} + \theta]}_{\text{error signal}}, \quad n=1, 2, 3 \cdots \quad (4)$$

式中: ω_0 为输入信号的角频率; ω_s 为双通道 TIS 系统中的采样信号; 第 1 项为期望信号; 第 2 项为由于时间不匹配造成的误差信号。为简单起见, 将式(4)中的具体信号用以下符号代替:

$$y[n] = y_d[n] + y_e[n]. \quad (5)$$

式中: $y[n]$ 为输出信号; $y_d[n]$ 为期望信号; $y_e[n]$ 为因时间失配而产生的误差信号。

1.2 双通道 TIS 系统时间失配校正

首先阐述双通道 TIS 系统中 SOTiC 方法的校正结构, 然后推导双通道 TIS 系统中的失配系数的估计和信号调制。

SOTiC 方法使用期望信号来替代理想信号, 并估计误差信号。在式(5)中, TIS 系统的输出信号被分为期望信号和由时间失配引起的误差信号, 误差信号可以由期望信号通过一定的调制和变化得到, 再乘以系数 α 来调整, $\hat{y}_e[n]$ 为误差信号的估计值, 可表示为:

$$\hat{y}_e[n] = y_d[n] * h_d[n] \cdot (-1)^n. \quad (6)$$

式中: $y_d[n]$ 为导数滤波器; $(-1)^n$ 为调制信号; $y_e[n]$ 为实际的误差信号。

$$y_e[n] = \alpha \cdot \hat{y}_e[n]. \quad (7)$$

双通道 TIS 系统的校正结构可表示为:

$$y_a[n] = y[n] - \alpha \cdot \hat{y}_e[n]. \quad (8)$$

将式(4)代入式(7), 得到系数表达式(9)。在实际的 TIS 系统中, 时间失配远小于单通道采样周期 $[(\tau_k / T) \ll 1]$, 系数 α 可近似为:

$$\alpha = \frac{\sin[\omega_0 \cdot (\tau_0 - \tau_1) / 2]}{\omega_0 \cdot \cos[\omega_0 \cdot (\tau_0 - \tau_1) / 2]} \approx \frac{\tau_0 - \tau_1}{2}. \quad (9)$$

在没有时间失配的情况下, 理想样本及其导数之间的内积值为零, 呈现出正交性。然而, 当存在时间失配时, 输入信号与其导数之间的正交性就会受到干扰。可以利用这一特殊性质来估计时间错配误差参数 α 。第一步建立正交参考信号:

$$y_{or}[n] = y[n] * h_d[n] \cdot (-1)^n. \quad (10)$$

式中 $y_{or}[n]$ 为正交参考信号。 $y[n]$ 和 $y_{or}[n]$ 的内积值如式(11)。通过泰勒级数近似, 内积值为:

$$\sum_{n=1}^N y[n] \cdot y_{or}[n] = -\cos[\omega_0 \cdot (\tau_0 - \tau_1) / 2] \cdot \sin[\omega_0 \cdot (\tau_0 - \tau_1) / 2] \approx -\omega_0 \cdot (\tau_0 - \tau_1) / 2. \quad (11)$$

式中, N 为内积操作数据块长, 如果将 $(\tau_0 - \tau_1)/2$ 视为一个常数, 那么式(11)也是一个关于频率 f_0 的函数, $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$ 。与其他方法类似, SOTiC 方法应避免校正频率为 $f_s/4$ 整数倍的单音信号。

双通道 TIS 系统中 SOTiC 的实现结构如图 1 所示。校正后的 TIADC 信号进入信号生成 (2-signal generate, 2-SG) 模块, 一路产生正交参考信号, 另一路将输入信号通过延时模块。通道间时间失配的大小和正负由 2 个信号的内积值间接表示。在系数估计过程中, SOTiC 方法使用信号的内积运算来代替乘法运算。信号在 2 维空间中的内积表示其正交关系, 具有更明显的物理意义。

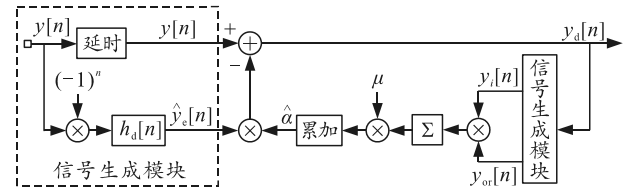


图 1 双通道 TIS 系统校正和估计结构

此外, α 与内积之间存在线性关系。通过使用自适应迭代算法, 不断更新迭代系数 α , 目的是最大限度地减少估计值与实际系数值之间的差异。通过自适应迭代得到的系数 α 如下:

$$\alpha^{k+1} = \alpha^k + \mu \cdot \sum_{n=1}^N (y[n] \cdot y_{or}[n]). \quad (12)$$

式中 μ 为迭代的步长。式(12)利用数据块的内积运算进行自适应迭代。首先, 内积运算能有效控制稳

态误差；其次，与随机梯度下降法相比，它可以选
择更大的迭代步长，获得更快的收敛速度。

1.3 M 通道 TIS 系统中 SOTiC 的扩展结构

为了将双通道时间失配校正方法扩展到 M 通道，提出一种奇偶通道重组结构。信号分组的过程类似于基 2-FFT 方法的蝶形运算。所提出的方法采用了倒序输入和正序输出的思想，倒序是指颠倒原始数字的二进制编码，倒序后(符号“^”表示倒序操作)，通道被分为奇数组和偶数组，然后进行重组。其中，4 通道 TIS 系统中 SOTiC 方法的实现结构如图 2 所示，4 个子 ADC 交替对模拟信号进行采样，并按照奇数组和偶数组的方式进行重组。子 ADC₀ 至子 ADC₃ 依次编号为 00-11 号。4 通道采样信号通过交织成 2 个信号的方式传输至 2 通道校正(two-channel calibration, 2-TC)模块。例如，00 号和 10 号 2 个采样信号交织形成输入信号 0，用作

2-TC 模块的输入信号。经过 2-TC 模块校正后，子 ADC 采样的 2 个信号是正交的。输入信号 2 由之前 2-TC 模块的输出信号交织而成。

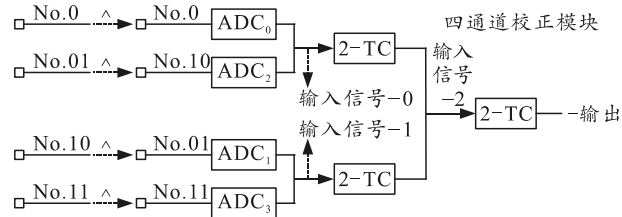


图 2 4 通道 TIS 系统 SOTiC 实现结构

在对上述 4 通道的 SOTiC 方法分析后，2-TC 可扩展到 M 通道的 TIS 系统($M=2^L$)，如图 3 所示。校正结构分为 L 个独立流程，包括过程 1，过程 2，……，过程 $\log_2 M$ 。这种分组方法使得将 SOTiC 方法扩展到 2^L 通道 TIS 系统变得非常简单。此外，多维空间系数搜索问题被转化为多个 2 维空间的系数搜索，避免了系数之间的耦合问题。

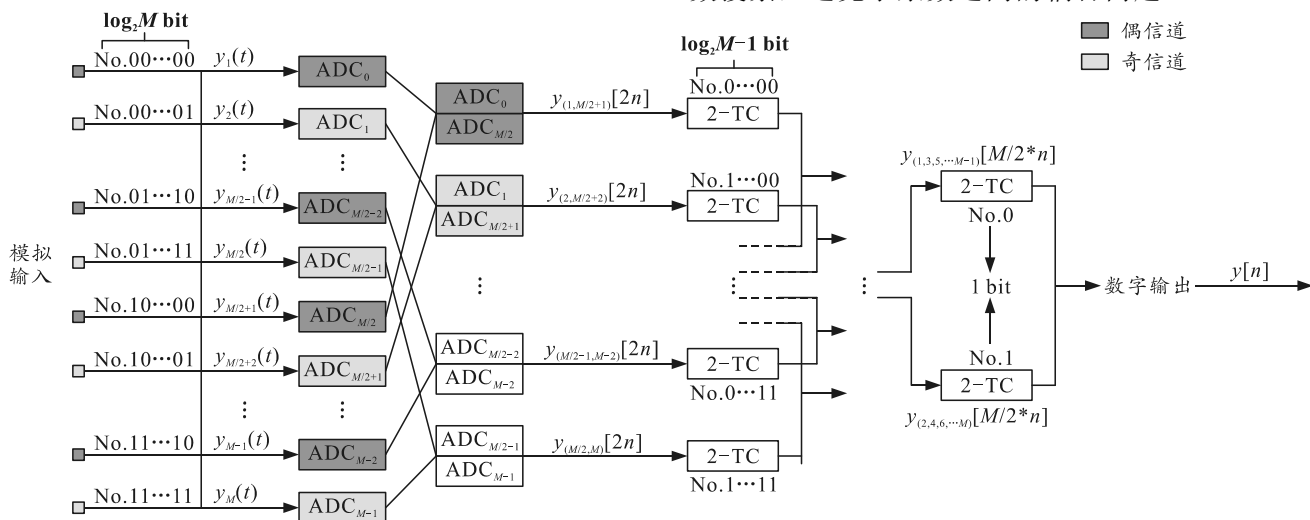


图 3 M 通道 TIS 系统 SOTiC 实现结构

2 实验结果

2.1 参数估计

图 4 为验证 SOTiC 方法在双通道 TIS 系统中的收敛速度。相关参数设置如下：时间失配 $\tau=[0.05, -0.05]$ ；采样点数=100 K；数据块长 $N=1$ K；迭代步长 $\mu=0.25$ 。

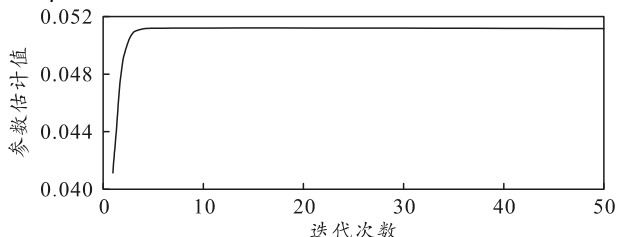


图 4 参数估计收敛曲线

图 4 中，在输入信号归一化频率为 0.42、导数滤波器抽头数为 31 的条件下，双通道 TIS 系统中系数 α 估计只需 5 步即可达到收敛，而且 5 步后的估计值不会波动。图 4 证明了 SOTiC 方法具有快速收敛特性和精准的稳态误差控制特点。

2.2 误差校正

单音信号输入用于精确测量校正效果。下面验证 SOTiC 方法在双通道和 4 通道 TIS 系统中的校正效果。如图 5 所示，在双通道 TIS 系统中，实验参数设置如下：TIS 系统的样本数=100 K；数据块长 $N=1$ K； $\tau=[0.05, -0.05]$ ； $\mu=0.25$ ；输入信号频率为 0.42。

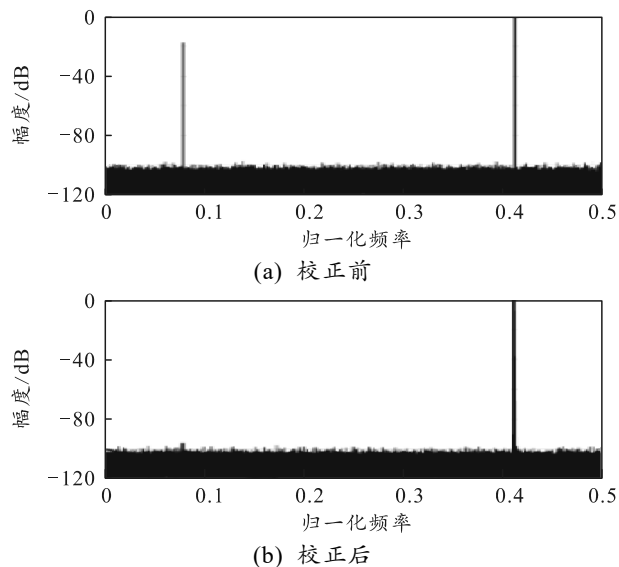


图 5 双通道 TIS 系统信号的能量密度谱

如图 5(a)所示,由于存在时间失配,在频率 0.08 处存在一个峰值,大大降低了输入信号的 SFDR。校正后,频率 0.08 处的杂散从 -17.54 dB 降至 -95.99 dB,如图 5(b)所示。

在 4 通道 TIS 系统中,实验参数设置如下: TIS 系统的样本数=100 K;数据块长 $N=1$ K, $\tau=[0.03, -0.015, 0.015, -0.03]$; $\mu=0.25$;输入信号频率为 0.42。校正后,频率为 0.08、0.17 和 0.33 的杂散分别从 -24.52、-36.58 和 -37.61 dB 减小到 -101.9、-82.3 和 -81.87 dB,如图 6 所示。

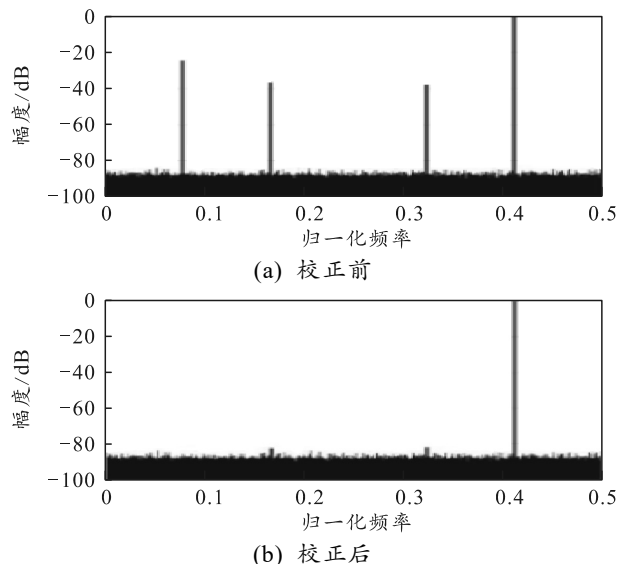


图 6 4 通道 TIS 系统信号的能量密度谱(单音输入)

此外,使用多音输入信号对 SOTiC 方法的宽带信号处理能力进行测试。如图 7 所示,图中“•”标注为失配误差谱线,经过校正后,失配误差得到了很好的消除, SFDR 提升至 58.66 dB。

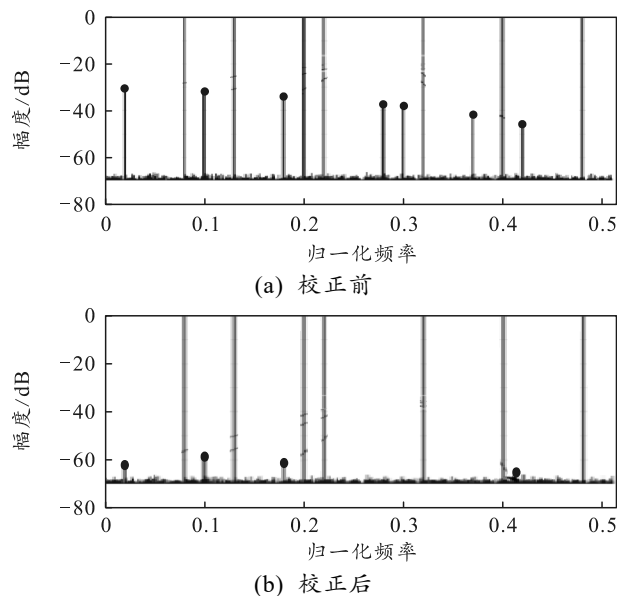


图 7 4 通道 TIS 系统信号的能量密度谱(多音输入)

2.3 性能分析

图 8 显示了 12 位 4 通道 TIS 系统的校正性能,其中实验参数设置如下: TIS 系统的样本数=100 K, $N=1.4$ K; $\tau=[0.06, 0.09, -0.09, -0.06]$ 。导数滤波器采用一个 31 抽头的 12 位 FIR 滤波器。计算 SNDR 和 SFDR 用于评估性能^[4]。

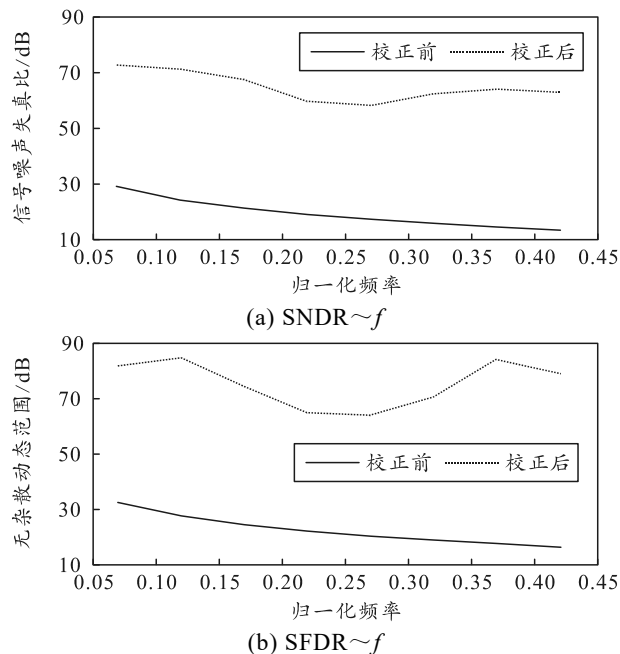


图 8 4 通道 TIS 系统校正前后性能指标曲线

如图 8(a)所示, SNDR 明显改善,在测试频段内总体改善幅度约为 40.61~49.41 dB。校正后, SNDR 达到 58.48~72.85 dB。SFDR 总体改善约为 42.48~66.36 dB,如图 8(b)所示。校正后, SFDR 可达到 64.04~84.85 dB。

根据式(8)、(11)和(12)，一个 2-TC 模块需要消除 2 个乘法和 3 个加法器。M 通道 TIS 系统的误差校正需使用 2-TC 模块 M-1 次；因此，M 通道 TIS 校正系统的资源消耗是 2-TC 模块的 M-1 倍。在资源消耗方面，算法的复杂度低至 O(M)。

表 1 显示了该方法与其他 5 种方法的性能指标

表 1 与其他方法的性能比较

特征	文献[2]	文献[3]	文献[5]	文献[6]	文献[7]	本文中方法
分辨率/bit	12	12	—	12	12	12
通道个数	8	4	4	4	4	4
失配类型	O/G/T	T	O/G/T	T	T	T
SNDR/dB	67	69.20	56.07	69.8	68.6	72.85
SFDR/dB	76.8	76.4	65.41	—	—	84.85
ENOB/bit	10.84	11.2	9.02	11.3	11.0	11.8
收敛速度(数据长度)/K	20	5	50	30	100	5
加法器个数	82	23	14	24	23	9
乘法器个数	56	8	28	16	0	6

备注：O：偏移；G：增益；T：时间。

3 结束语

笔者提出一种 2 通道 TIS 系统的数字校正方法，并将该结构扩展到 M 通道 TIS 系统。基于信号正交性的特点，该算法对时间失配具有高灵敏度，利用自适应迭代方法，对失配参数的估计可实现快速精准的收敛。同时，该算法的复杂度低，校正结构简单；模块化的特点也使得将其扩展到 M 通道更加容易。理论分析和实验验证了其有效性，该方法在雷达、通信、电子对抗侦察、高速信号分析等领域有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] BLACK W C, HODGES D A. Time interleaved converter arrays[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1980, 15(6): 1022-1029.

[2] KHAN S R, HASHMI A A, CHOI G S. A Fully Digital Background Calibration Technique for M-Channel Time-Interleaved ADCs[J]. Circuits Systems and Signal

对比。本文中方法在资源消耗和收敛速度方面具有明显优势。与一阶统计方法^[4]相比，本文中方法保持了其快速收敛特性。同时，SOTiC 采用内积运算的二阶方法，可以获得更高的精度，但资源消耗却比文献[4]方法略低。SOTiC 的计算复杂度低，M 通道 TIS 中只消耗 2(M-1)个乘法器和 3(M-1)个加法器。

Processing, 2017, 36(8): 3303-3319.

[3] YIN M W, YE Z F. First Order Statistic Based Fast Blind Calibration of Time Skews for Time-Interleaved ADCs[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(1): 162-166.

[4] 王亨勇, 黄锐, 张雄林, 等. 基于 FMC 和 PCI 通信的高速 ADC 动态性能测试[J]. 兵工自动化, 2016, 35(5): 43-45.

[5] QIU Y, LIU Y J, ZHOU J, et al. All-Digital Blind Background Calibration Technique for Any Channel Time-Interleaved ADC[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2018, 65(8): 1-12.

[6] YIN Y, SUN K, CHEN H, et al. Calibration of Timing mismatch in TIADC Based on Monotonicity Detecting of Sampled Data[J]. IEICE Electronics Express, 2020, 17(3): 1-6.

[7] LI J, WU S, LIU Y, et al. A Digital Timing Mismatch Calibration Technique in Time-Interleaved ADCs[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2014, 61(7): 486-490.