

doi: 10.7690/bgzd.2025.07.008

基于 ODR 的取样示波器时基抖动修正技术

孔亦哲^{1,2}, 刘 岩², 赵科佳³, 张义章², 兰庆隆^{1,2}, 刘萍萍^{1,4}, 严发宝^{1,2,4}

(1. 山东大学机电与信息工程学院, 山东 威海 264209; 2. 山东大学空间科学研究院空间电磁探测技术实验室, 山东 威海 264209; 3. 中国计量科学研究院, 北京 100029; 4. 山东省智能电子封装与应用重点实验室, 山东 威海 264209)

摘要: 针对高速取样示波器容易受到时基抖动误差的干扰而导致测量精确度下降等问题, 提出结合正交距离回归(orthogonal distance regression, ODR)算法和信号小波去噪的示波器时基抖动修正方法。ODR 算法能同时处理自变量和因变量误差, 适用于时基抖动这一复杂的非线性误差估计问题, 结合小波变换进行多尺度信号分解, 有效去除噪声, 进一步提升信号精度。实验仿真结果表明: 原始信号包含时基抖动和噪声, 经过时基修正处理后, 误差显著减少, 测量准确度提升, 为取样示波器的高精度测量提供了较为重要的技术支持。

关键词: 时基抖动; ODR; 取样示波器; 小波去噪

中图分类号: TM935.38 **文献标志码:** A

Time-base Jitter Correction Technology of Sampling Oscilloscope Based on ODR

Kong Yizhe^{1,2}, Liu Yan², Zhao Kejia³, Zhang Yizhang², Lan Qinglong^{1,2}, Liu Pingping^{1,4}, Yan Fabao^{1,2,4}

(1. School of Mechanical, Electrical and Information Engineering, Shandong University, Weihai 264209, China;

2. Laboratory for Electromagnetic Detection Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China;

3. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

4. Shandong Key Laboratory of Intelligent Electronic Packaging Testing and Application, Weihai 264209, China)

Abstract: Aiming at the problem that the high-speed sampling oscilloscope is easily interfered by the time-base jitter error, which leads to the decline of measurement accuracy, a time-base jitter correction method for oscilloscope is proposed by combining the orthogonal distance regression (ODR) algorithm and signal wavelet denoising. The ODR algorithm can deal with both independent variable and dependent variable errors, which is suitable for the complex nonlinear error estimation problem of time-base jitter, and can effectively remove noise and further improve signal accuracy by combining with wavelet transform for multi-scale signal decomposition. The simulation results show that the original signal contains time-base jitter and noise. After the time-base correction, the error is significantly reduced and the measurement accuracy is improved, which provides an important technical support for the high-precision measurement of sampling oscilloscope.

Keywords: time distortion; ODR; sampling oscilloscope; wavelet denoising

0 引言

随着电子和通信技术迅猛发展, 高频、宽带信号测量和分析已成为一个重要的研究课题。在 5G、雷达探测、无线通信、卫星传输等领域中, 信号频率、相位以及时序信息的精确测量对于系统性能的优化及技术创新至关重要。取样示波器作为高频信号测量的核心工具, 其重要性不言而喻。由于其硬件电路设计的非理想性, 尤其是时基模块的局限性, 时基抖动已成为制约信号测量精度的重要瓶颈因素。时基抖动导致取样时间间隔分布不均, 导致信号在取样过程中产生相位误差和频率偏移, 严重影响信号的重建与分析。特别是在超高速取样的场景下, 即使是微小的时基抖动, 也会对测量结果产生显著的误差^[1]。笔者探究取样示波器时基抖动的产

生机理, 就具体问题针对性分析, 并设计方法解决时基抖动带来的信号失真问题。

1 示波器误差模型分析

1.1 误差补偿方法研究

面对时基抖动难以优化的挑战, 传统的误差补偿方法多聚焦于硬件电路设计的改进提升, 如: 升级更高精度的时钟源、数字时钟恢复技术等^[2]。然而, 随着数字信号处理技术的飞速发展, 越来越多的研究开始转向基于数学建模与优化算法的解决方案, 如: 多项式插值修正、样本重建取样和误差分析建模等方法。不同于常见的抖动建模与估计补偿, 正交距离回归(ODR)算法因其能够同时处理自变量和因变量的误差, 所以在时基抖动补偿中展现

收稿日期: 2024-09-22; 修回日期: 2024-10-23

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0605902)

第一作者: 孔亦哲(2000—), 男, 甘肃人。

通信作者: 刘萍萍(1978—), 女, 山东人, 博士。

出独特优势^[3]。ODR 正交回归不仅考虑了信号中的随机噪声,还能对时间取样误差进行精确建模,从而提供更准确的时基抖动估计。此外,小波变换作为一种强大的时频分析工具,在信号去噪方面表现出色,能够有效去除噪声成分,进一步提升信号的质量^[4]。笔者提出一种融合 ODR 算法与小波去噪技术的时基抖动补偿方法,并通过仿真实验验证其在提高取样示波器测量精度方面的效果,旨在为高速信号的准确测量提供新视角,也为未来在更复杂环境下的应用提供一定的先验基础。

1.2 取样示波器信号模型

取样示波器基于等效时间取样原理工作,每次取样都在触发信号到来后经过预设的延迟时间进行,因此,每一组时间和电压数据都是在新的触发下获得的^[5]。由于硬件电路的非理想性,示波器的时基模块电路会产生抖动,这意味着每次取样的时基间隔并不完全相等,从而导致信号测量的失真。理想情况下,每次延迟时间的增量应该是相同的,但由于时基抖动误差,实际情况往往有所偏差。此外,每次测量时,生成触发信号的硬件电路自生的抖动,以及取样器模块硬件电路的抖动,也会对测量结果造成一定的干扰。图 1 为取样示波器工作原理。

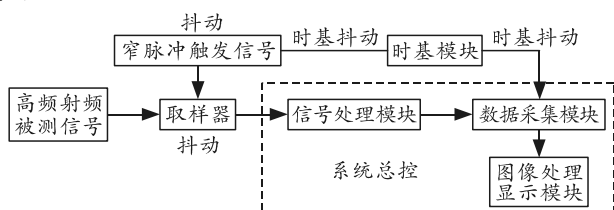


图 1 取样示波器工作原理

由图 1 可推断得到,示波器输出信号中的时基抖动误差 g_i 来源多方面表示为:

$$g_i = \sigma_{\text{time}} + \tau_{\text{trigger}} + \tau_{\text{sampler}} \quad (1)$$

式中: σ_{time} 为时基模块输出时产生的时基抖动; τ_{trigger} 为触发信号发生电路的抖动; τ_{sampler} 为取样器的抖动^[6]。对于同一个示波器而言,时基模块抖动、触发电路抖动和取样电路抖动一般是较为固定的数值,所以可以将这三者所引入的误差综合起来考量,统一视为时基抖动,使其在误差估计和时基修正中更加便捷有效。取样示波器实际输出信号的模型,可表示为:

$$y_i = a + \sum_{k=1}^h [\beta_k \cos(2k\pi f t_i) + \gamma_k \sin(2k\pi f t_i)] + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中: y_i 为取样第 t_i 时刻的取样幅值; a 为信号均值;

f 为测量的正弦波信号的频率; h 为谐波次数,一般取 $h=3$; β_k 和 γ_k 为第 $k(k \leq h)$ 次谐波幅值; ε_i 为示波器系统产生的加性噪声; $T_s=1/f_s$ 为理想的取样实际间隔; f_s 为示波器取样频率; g_i 为第 i 个取样点的时基抖动,则实际取样时刻即可表示为:

$$t_i = (i-1)T_s + g_i \quad (3)$$

取样示波器实际信号输出的数学模型即表示为^[7]:

$$y_i = a + \sum_{k=1}^h [\beta_k \cos(2k\pi f((i-1)T_s + g_i)) + \gamma_k \sin(2k\pi f((i-1)T_s + g_i))] + \varepsilon_i \quad (4)$$

2 时基抖动误差估计

2.1 正交距离回归分析

ODR 是考虑自变量和因变量误差的回归分析方法,而传统的最小二乘法假设自变量没有误差,仅考虑因变量的误差,在某些实际应用中并不符合现实^[8]。ODR 更适合在数据误差较为复杂的情况下使用。笔者研究的示波器时基抖动带来的误差,是一项明确的自变量误差,因此将 ODR 适用于本时基修正技术,具有科学依据。

图 2 为正交距离回归算法原理,与通常假设数据误差服从正态分布且呈线性关系的 OLS 不同,ODR 的核心思想是通过最小化取样数据点到拟合曲线的正交距离的总和来找到最佳拟合曲线。

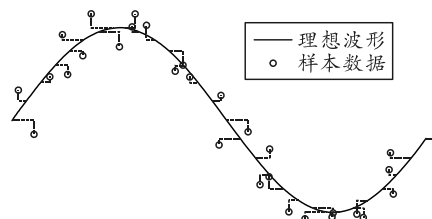


图 2 正交距离回归算法(ODR)原理

ODR 与假设数据误差服从正态分布且呈线性关系的 OLS 不同,不限制数据误差的分布形式,能够处理各种类型的误差,包括非线性误差、异方差误差等,在拟合模型中可以自由选择各拟合参数所占权重,如:在示波器实际信号输出模型的拟合中,时基抖动所占的权重相比其他非线性因素更大,因此更适用于实际数据的拟合。由于采用正交距离作为误差度量,ODR 算法对异常值具有更好的鲁棒性,能减少异常值对拟合结果的影响,因此更适用于笔者研究的示波器时基抖动模型。

正交距离回归的步骤:

1) 定义拟合模型,确定拟合函数的形式和参

数,根据数据的特点和拟合的目的选择适当的模型;

2) 构建误差函数,用来衡量拟合曲线与实际数据之间的差异,一般取数据点到拟合曲线的正交距离的总和,能够有效地考虑数据点的非线性误差;

3) 为每个拟合参数分配权重,保证主要拟合参数的准确性,在示波器实际信号输出模型的拟合中,时基抖动可能比其他非线性因素更为重要,因此,可以给予时基抖动更大的权重;

4) 基于 Levenberg-Marquardt 算法来最小化误差函数,不断调整拟合参数的数值,直到误差函数达到最小值或收敛于某个阈值,确定最佳的拟合参数^[9]。

2.2 构建 ODR 时基抖动误差估计模型

1) 确立拟合信号模型函数。基于取样示波器实际信号输出的数学模型,确定 ODR 拟合的目标模型函数为式(4),将时基模块抖动、触发电路抖动和取样器抖动,将这三者所引入的误差综合起来考量,统一视为时基抖动 g_i ,同时将除时基抖动参数之外的各个待拟合参数,对实际输出信号 $\theta=(\alpha, \beta, \gamma)$ 的影响综合起来考虑为一个映射 G ,即拟合目标模型函数可以简化为:

$$y_i = G(T_s + g_i; \theta) + \varepsilon_i. \quad (5)$$

2) 构建误差估计模型函数。由于模型函数中的各个拟合参数对模型输出的影响不同,则具有权重的正交距离回归算法的误差模型函数^[10]可表示为:

$$|E(\theta, g)|^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ \omega_\varepsilon [G(T_s + g_i; \theta) - y_i]^2 \right\} + \sum_{i=1}^n (\omega_g g_i^2). \quad (6)$$

式中权重 ω_ε 和 ω_g 分别为信号幅值噪声方差和时基抖动方差的倒数,即 $\omega_\varepsilon = 1/\sigma_\varepsilon^2$, $\omega_g = 1/\sigma_g^2$ 。

3) Levenberg-Marquardt 算法实现误差参数估计。当误差模型函数式(6)取得最小值时,拟合信号的各项取样点到理想信号的正交距离之和最短,此时的拟合信号函数的参数最为准确,同时求得误差模型参数 θ, g_i 的估计值,具体实现方法如下:

① 误差模型函数 $E(\theta, g)$ 回归参数的雅可比矩阵为 $J(\theta, g)$, 矩阵表示为:

$$J(\theta, g) = \begin{bmatrix} \partial \varepsilon_1 / \partial \theta_1 & \partial \varepsilon_1 / \partial \theta_2 & \dots & \partial \varepsilon_1 / \partial \theta_m & \partial \varepsilon_1 / \partial g \\ \partial \varepsilon_2 / \partial \theta_1 & \partial \varepsilon_2 / \partial \theta_2 & \dots & \partial \varepsilon_2 / \partial \theta_m & \partial \varepsilon_2 / \partial g \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \partial \varepsilon_i / \partial \theta_1 & \partial \varepsilon_i / \partial \theta_2 & \dots & \partial \varepsilon_i / \partial \theta_m & \partial \varepsilon_i / \partial g \\ \partial g / \partial \theta_1 & \partial g / \partial \theta_2 & \dots & \partial g / \partial \theta_m & \partial g / \partial g \end{bmatrix}. \quad (7)$$

式中:参数 θ 的维数为 m ; 参数 g 的维数为 1。

② 采用 Levenberg-Marquardt 算法来最小化误差函数。首先基于最小二乘法选择一组初始参数向量 $\beta_0=(\theta_0, g_0)$, 构建正则化的海森矩阵 $H=J^T J$ 和梯度向量 $\nabla E=J^T e$, e 是误差向量。

使用以下更新规则计算新的参数向量 β :

$$\beta_{\text{new}} = \beta - (H + \lambda I)^{-1} \nabla E. \quad (8)$$

式中: λ 为阻尼因子; I 为单位矩阵; J^T 为雅各比矩阵的转置。阻尼因子 λ 更新规则: 如果新参数向量 λ_{new} 减少了残差平方和 E^2 , 则减小 λ , 即 $\lambda_{\text{new}} = \lambda/5$; 如果新参数向量 λ_{new} 增加了残差平方和 E^2 , 则增大 λ , 即 $\lambda_{\text{new}} = \lambda \times 5$ 。

当 λ 很大时, 更新规则接近于梯度下降法:

$$\beta_{\text{new}} = \beta - \nabla E / \lambda. \quad (9)$$

当 λ 很小时, 更新规则接近于高斯-牛顿法:

$$\beta_{\text{new}} = \beta - (J^T J)^{-1} \nabla E. \quad (10)$$

③ 重复步骤①到②, 直至参数向量收敛到某个值, 即 $\|\beta_{\text{new}} - \beta\| < \tau$ (τ 为域值) 时, 返回最终参数向量 β 。

3 仿真实验

3.1 示波器抖动原始信号仿真模拟

为了进行算法的验证, 进行了示波器抖动原始信号的仿真模拟, 生成一个包含已知参数的时基抖动和加性噪声的信号, 模拟实际示波器采集的信号。设定等效取样频率为 10 GHz, 原始信号频率为 500 MHz, 以保证信号的有效取样, 符合实际应用场景。生成 4 096 个取样点数据, 并为每个取样点添加从均匀分布中随机生成的噪声, 噪声的标准差在 0.05~0.10 之间, 以模拟实际信号中的随机噪声。时基抖动 G_s 的生成采用线性分段的方式, 将每 1 024 个取样点内的抖动值控制在 $[-100 \times T_s, 100 \times T_s]$ 范围内, 以此来模拟信号采集过程中可能出现的时基抖动^[10], 图 3 为模拟时基抖动。

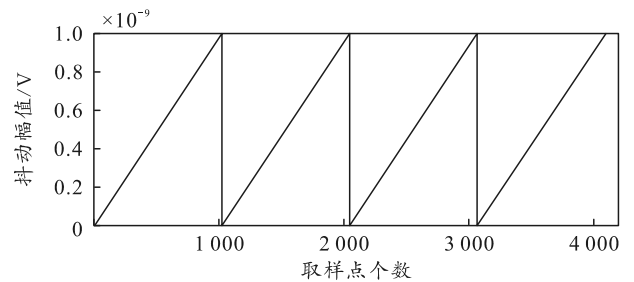


图 3 模拟时基抖动

通过以上步骤生成的模拟信号, 有利于直观地反映出时基抖动对原始信号的影响, 有助于后续的

时基抖动误差估计与补偿以及对小波变换噪声消除的研究。理想信号与生成的示波器抖动原始信号如图 4 和 5 所示。示波器抖动原始信号与理想信号之间波形有较大的出入, 其中包含了时基抖动失真和加性噪声。上文添加的模拟时基失真所带来的影响, 在示波器抖动原始信号中体现为时间轴上(取样点轴)的数据偏移, 可以看到在第 1 024、2 048、3 072 和 4 096 点上较理想信号的偏移尤为明显, 产生了较大的失真。

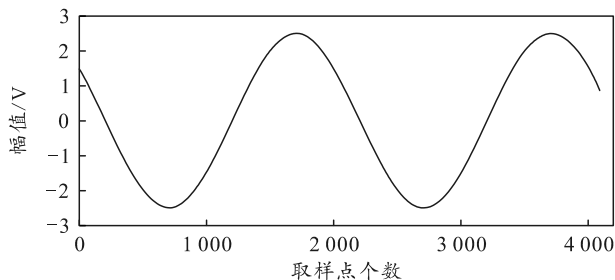


图 4 理想信号

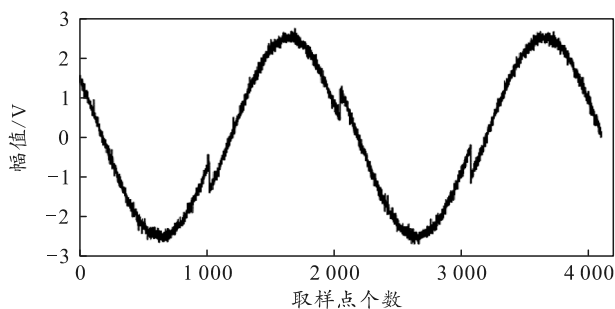


图 5 示波器抖动原始信号

这些时基失真与噪声毛刺是本文中时基修正算法拟合以及补偿修正的重要信号成分, 以此进行原始信号模拟是后续算法研究与实现的基础。

3.2 时基抖动误差估计与补偿

笔者应用 ODR 算法对模拟数据进行回归, 以估计时基抖动误差。为了验证补偿效果, 笔者通过对比补偿前后的信号, 分析时基抖动补偿对信号质量的影响。

首先, 构建回归模型。利用 ODR 算法, 建立一个包含信号各项参数及时基抖动项的数学模型如式(5)。该模型由信号的直流分量、频率分量、相位信息、 k 次谐波分量及时基抖动项组成。时基抖动项 g 视为信号时间轴上的一个扰动, 通常表现为微小的时间误差, 影响取样点的准确性。通过引入这些参数, 模型能全面描述信号在时域上的变化。

其次, 初始化 ODR 算法的各项参数。对于信号的不同特性, 包括直流分量、余弦分量的幅值、正弦分量的幅值、相位及时基抖动项, 使用 OLS

进行初始值估计。这一过程对于确保回归过程的稳定性和收敛性至关重要, 在此过程中, 合理的初始参数设定能够有效避免算法陷入局部最优解, 并提高最终参数估计的准确性。

最后, 对模拟原始信号执行 ODR 回归。该过程通过优化各项参数, 最小化误差函数, 从而获得信号参数的最优估计值。通过 ODR 回归结果的分析, 能够估计出信号中时基抖动的具体参数, 从而对信号进行时域上的平滑补偿处理, 补偿后的信号应显示出明显的失真减少效果, 更加接近于理想原始信号。

图 6 为原始信号与 ODR 正交回归信号对比。

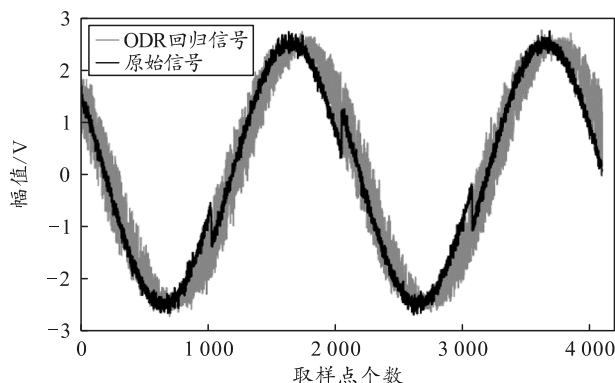


图 6 原始信号与 ODR 正交回归信号对比

由图 6 可以看出: 经过 ODR 补偿后的信号在时间轴上较原始信号有一定的变化, 并且信号整体的包络更接近与理想信号。其中, 从 ODR 补偿效果最为明显的第 1 024、2 048、3 072 和 4 096 点可以看出: 较大的时基抖动失真样本点在补偿后也回到了预期的数值。从时基抖动补偿的效果上来说符合预期效果, 但从得到的数据质量上看, 仍然有一定的优化空间。

3.3 小波变换噪声抑制

小波变换通过对信号进行多尺度分解, 能够有效提取信号的特征并去除噪声。通过 ODR 对原始信号时基补偿后, 时基抖动引起的明显信号失真得到了有效修正, 信号的整体波形向理想信号显著靠近。ODR 正交回归虽然改善了信号的时基精度, 但也引入部分无关频率分量, 影响了数据精细度。

为了进一步改善信号质量并消除不必要的噪声, 笔者采用 4 dB 小波基进行 4 层小波分解。该小波基具有良好的时频局部化特性, 适合于处理平滑过渡的信号, 根据噪声的统计特性, 设定合适的阈值参数, 采用软阈值方法进行去噪。

具体处理步骤如下: 首先, 对 ODR 回归后的

信号进行小波变换, 计算得到各层的小波系数; 然后, 对高频系数进行阈值处理, 通过软阈值法有效抑制噪声成分; 最后, 重构信号以恢复其去噪后的形态。图 7 为 ODR 回归信号与最终信号对比。

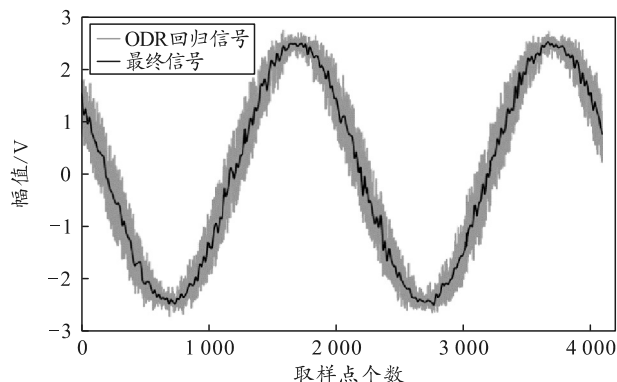


图 7 ODR 回归信号与最终信号对比

如图 8 所示, 小波去噪过程显著减少了信号中的高频噪声, 并在此基础上提升了信号的整体质量, 尤其是在信号的平滑度和精确度方面得到明显改善, 最终信号的波形与理想信号波形高度匹配。

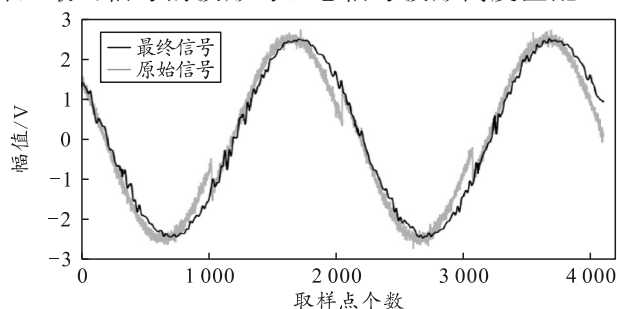


图 8 原始信号与最终信号对比

由图 8 可看出: 原始信号整体的时基失真和局部的明显偏移, 在经过处理后修正效果显著, 极大程度上接近于理想信号。

经以上仿真实验可以观察到原始信号、ODR 回归信号、小波去噪信号与最终信号之间的对比。综合各图信息可知: 原始信号中含有明显的噪声和时基抖动, 通过 ODR 回归, 能有效地估计并补偿时基抖动, 使信号更加平滑。进一步通过小波去噪, 信号中的高频噪声得到了显著减少, 使信号质量得到了显著提升。这表明, 结合 ODR 正交距离回归和小波变换的方法在取样示波器时基修正中的有效性得到了验证, 为实际应用提供了可靠的技术支持。

4 结束语

笔者提出一种结合 ODR 算法和小波变换的时基抖动补偿方法, 并通过信号仿真验证了其在取样示波器时基抖动失真修正中的有效性。在未来的研究中, 可以进一步探索该方法在取样示波器硬件部分应用情况和更复杂的测量环境中的效果, 例如在多频率信号同时存在或时基漂移更加显著的场景下, 方法的适应性与稳定性。此外, 结合人工智能技术, 未来有望开发出基于机器学习的时基抖动实时补偿系统, 从而在不依赖特定模型的情况下, 实现对不同类型抖动误差的自适应补偿。这一研究不仅为高速取样测量技术提供了新的思路, 而且为相关领域的工程应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 龚鹏伟, 马喆, 马红梅, 等. 取样示波器时基抖动的修正[J]. 宇航计测技术, 2011, 31(1): 5-7.
- [2] 江黎, 钟洪声. 一种全数字时钟数据恢复电路的设计与实现[J]. 通信技术, 2008, 41(11): 1-3.
- [3] 胡明晓. 正交回归和一般最小二乘回归的几何误差分析[J]. 数理统计与管理, 2010, 29(2): 248-253.
- [4] 王宏强, 尚春阳, 高瑞鹏, 等. 基于小波系数变换的小波阈值去噪算法改进[J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 165-168.
- [5] 刘瑞华, 何明, 乔龙飞, 等. 基于 DDS 技术的高速等效采样示波器设计[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(9): 58-62.
- [6] 朱江森, 王世镖, 赵科佳, 等. 宽带取样示波器时基误差补偿的新方法研究[J]. 计量学报, 2020, 41(1): 85-89.
- [7] 朱江森, 李然, 缪京元, 等. 高速取样示波器时基失真数学模型的研究与仿真[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(12): 1810-1814.
- [8] 林茂六, 张喆. 高速采样示波器中的时基失真及其估计[J]. 计量学报, 2004, 25(3): 266-269.
- [9] RANGANATHAN A. The levenberg-marquardt algorithm[J]. Tutorial on LM algorithm, 2004, 11(1): 101-110.
- [10] ZWOKAK J W, BOGGS P T, WATSON L T. Algorithm 869: ODRPACK95: A weighted orthogonal distance regression code with bound constraints[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2007, 33(4): 137-148.