

基于代数导数估计法的双频激光干涉测量系统时效误差实时补偿

杜浩, 祝文淼, 张文涛, 王剑*, 周开, 康承广, 高慧莹

(桂林电子科技大学 光电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:针对双频激光干涉测量系统动态位移解算中的时效误差问题,提出基于代数导数估计法(ADEM)的实时补偿方法。采用 JESD204B 协议实现多通道同步采集,解决模/数转换器(ADC)延时差异;设计双线程互补策略,消除奇点域与初始化周期对补偿精度的干扰。实验结果表明:低速下位移误差从约 4.8 nm 降至约 0.5 nm,高速下从约 37 nm 降至 16 nm;变速工况下误差从约 65 nm 压缩至 20 nm 以内;相位残差分析证实系统可达 1 024 倍电子细分,实现亚纳米级分辨率。

关键词:干涉仪位移测量;代数导数估计法;时效误差补偿;多通道同步;硬件在环仿真

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2026)04-0077-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.04.012

Real-time compensation of aging error in dual-frequency laser interferometry system based on algebraic derivative estimation method

DU Hao, ZHU Wenmiao, ZHANG Wentao, WANG Jian*, ZHOU Kai, KANG Chengguang, GAO Huiying

(Guilin University of Electronic Technology, School of Optoelectronic Engineering, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: To address the issue of data age error in dynamic displacement calculation for dual-frequency laser interferometry measurement systems, a real-time compensation method based on the algebraic derivative estimation method (ADEM) is proposed. The JESD204B protocol is employed to achieve multi-channel synchronous acquisition, resolving the delay discrepancies among analog-to-digital converters (ADCs). A dual-thread complementary strategy is designed to eliminate the interference of singularity domains and initialization cycles on compensation accuracy. Experimental results demonstrate that the displacement error is reduced from approximately 4.8 nm to approximately 0.5 nm under low-speed motion, and from approximately 37 nm to 16 nm under high-speed motion. Under variable-speed conditions, the error is compressed from approximately 65 nm to within 20 nm. Phase residual analysis confirms that the system achieves 1 024-fold electronic subdivision, realizing sub-nanometer resolution.

Key words: displacement measurement by interferometer, algebraic derivative estimation method, data age error compensation, multi-channel synchronization, hardware-in-the-loop simulation

0 引言

在精密测量领域,双频激光干涉仪因其高精度、高分辨率和快速响应特性,已成为位移测量的核心工具,广泛应用于半导体制造、光刻机对准、纳米技术等

高精度工业场景^[1-2]。随着集成电路技术的飞速发展,光刻工艺对位移测量精度的要求已提升至亚纳米级别^[3-4]。然而,双频激光干涉测量系统在实际应用中面临一个关键挑战:时效误差。该误差源于位移解算过程中信号采集与处理的延时,导致测量结果无法实时反映运动台的真实位置,显著影响系统的动态测量精度^[5-6]。

时效误差源于信号采集、传输与处理环节引入的延时误差及器件非理想特性造成的相移误差,在高速或变速运动工况下,加速度等高阶运动参数会进一步加剧该误差^[5,7-8]。传统补偿方法(如有限差分法)虽能

收稿日期:2025-07-09。

作者简介:杜浩(1992—),男,河北人,博士,硕士生导师,就职于桂林电子科技大学光电工程学院,主要从事基于激光干涉的纳米位移测量技术研究,主持或参与的国家级、省部级、企业相关的项目累计 10 余项,获 2020 年度研究生国家奖学金。

***通信作者:**王剑(1986—),男,博士,讲师,主要研究方向为外差激光干涉系统信号处理、光纤传感。



杜浩, 祝文森, 张文涛, 等: 基于代数导数估计法的双频激光干涉测量系统时效误差实时补偿

缓解部分误差,但在高频或非平稳信号下易放大噪声,且难以满足实时性要求^[9-10]。因此,开发一种高精度、低噪声且适用于动态工况的时效误差补偿算法,成为提升双频激光干涉系统性能的关键。

本文提出一种基于代数导数估计法(ADEM)^[11]的双频激光干涉测量系统时效误差实时补偿方法,并采用双线程互补策略与多通道同步方案^[12-13]予以实现。

1 测量原理与时效误差机理

1.1 双频激光干涉测量原理

双频激光干涉仪基于多普勒频移效应实现位移测量^[14]。当被测物体运动时,反射或散射光因多普勒效应产生频率变化,通过精确测量该频移量即可解算物体位移。

双频激光干涉仪测量光路如图1所示。本文以ZMI 7702型激光器为光源,输出2束频率分别为 f_1 和 f_2 的正交线偏振光。对应波长 λ_1 和 λ_2 分别为632.991 528 nm、632.991 501 nm,2路信号的幅值相等,且保持20 MHz的频差固定。激光经分束器(BS)分为参考光与测量光2路:其中一路作为参考光,经过检偏器1和雪崩光电二极管(APD)转化为数字信号送入信号处理板卡;另一路光经过偏振分束器(PBS)后被分成频率为 f_1 和 f_2 的2路正交偏振光。其中,频率为 f_1 光经过固定角锥棱镜后反射回PBS; f_2 光射向移动角锥棱镜,其反射光因多普勒效应引入频差,频率为 $f_2 \pm \Delta f$ (图中 ΔL 即为该移动角锥棱镜移动量)。2束光在PBS处汇合后,输出频率为 $f_1 - f_2 \pm \Delta f$ 的拍频信号,经检偏器2与APD转换为电信号,送入同一信号处理板卡。

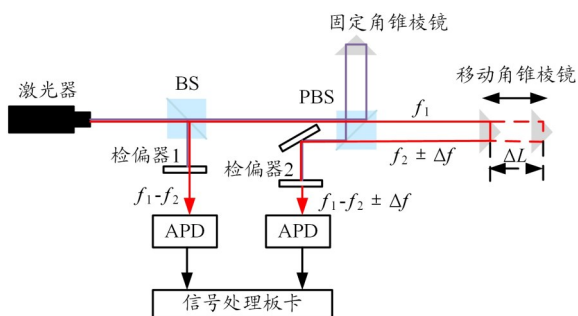


图1 双频激光干涉仪测量光路

当移动角锥棱镜发生运动时,测量光因多普勒效应产生频移 Δf ,其符号由运动方向决定(向左运动时 Δf 为正,向右运动时为负),而参考光频率保持不变。2路信号经光/电转换后输入后续信号处理系统,通过解算2路信号的相位差获得位移信息。

设运动速度为 v ,光速为 c ,测量光频率为 f_2 ,则多普勒频移可表示为

$$\Delta f = \pm \frac{2v}{c} f_2 \quad (1)$$

式中:正负号分别对应移动角锥棱镜向左和向右运动。

由速度与位移的关系 $v = dl/dt$ (l 为瞬时应变位移, t 为时间),光波的波长与频率满足 $\lambda = c/f_2$ 。对式(1)积分可得总位移 L 与多普勒频移 Δf 的关系为

$$L = \int_0^t v dt = \int_0^t (\lambda \Delta f / 2) dt = \varphi \lambda / 2 \quad (2)$$

基于此,可知位移 L 与相位 φ 之间的关系。因此,通过精确测量参考信号与测量信号之间的相对相位变化,即可实现高精度位移解算。

激光器还存在 $\pm 1\ 600\ \text{Hz}$ 的频率不确定度 f' ,因此参考信号与测量信号的表达式分别为

$$\begin{cases} I_r = R \sin[2\pi(f_1 - f_2 + f')t] + D_r \\ I_m = M \sin[2\pi(f_1 - f_2 + f' + \Delta f)t] + D_m \end{cases} \quad (3)$$

式中: R 为参考信号的幅值, M 为测量信号的幅值, D_r 为参考信号的直流偏置值, D_m 为测量信号的直流偏置值。

在拍频合成的实际过程中,由于光斑难以实现完全精准的重合,会不可避免地产生直流分量。在模/数转换器(ADC)采样环节,受其自身电路特性和采样环境等多种因素的影响,也会存在一定程度的直流偏置情况。因此,实际得到的参考信号和测量信号中存在一定的直流量,需要经过消直流模块将直流量滤除得到式(4)。

$$\begin{cases} f_r = R \sin[2\pi(f_1 - f_2 + f')t] \\ f_m = M \sin[2\pi(f_1 - f_2 + f' + \Delta f)t] \end{cases} \quad (4)$$

式中: f_r 和 f_m 分别为消直流量后的参考频率信号和测量频率信号。

上述2路信号经混频与低通滤波后,可解调出仅含多普勒频移的正交信号。然而,由于系统中光电探测器响应延迟、传输线缆延时、ADC采集延时及器件非理想相频特性等因素的影响,解调所得信号中包含时效误差,需在后续环节予以补偿。

1.2 时效误差的产生机理

在双频激光干涉测量系统中,位移信息由参考信号与测量信号之间的相位差解算得到。对于静态或低速稳定测量场景,信号采集、传输和处理过程中引入的时间延迟对最终位移结果的影响相对有限;但当

被测运动台处于高速或变速运动状态时, 系统输出的位移值并不严格对应当前时刻的真实位置。该误差本质上反映了位移发生时刻、信号采集时刻和数据解算输出时刻之间的不一致。

时效误差主要来源于延时误差和相移误差2类因素。延时误差主要由光电探测器响应时间、模拟前端调理电路、传输线缆、ADC采样过程、JESD204B数据链路以及现场可编程门阵列(FPGA)数字处理流程等环节引入。其中, ADC多通道采集延时及板卡间数据同步偏差会导致不同通道信号到达解算模块的时间不一致, 使相位解算结果相对于真实运动状态产生滞后。相移误差则主要来源于模拟滤波、放大、混频以及数字处理环节中器件非理想相频特性所造成的附加相位偏移。该类误差虽然表现为相位偏差, 但在位移解算中会进一步转化为位置误差。

在不同运动工况下, 时效误差的表现形式存在显著差异。匀速运动时, 位移随时间近似线性变化, 误差主要由系统总延时与速度项共同决定, 误差幅值相对稳定, 补偿重点在于准确估计运动速度并修正延时带来的位移滞后。变速运动时, 运动台的速度、加速度甚至更高阶运动参数均随时间变化, 系统延时不仅会造成位置滞后, 还会使相位解算结果无法准确跟随动态运动状态, 误差与加速度等高阶参数密切相关, 形式更加复杂, 补偿难度显著增加。

2 时效误差补偿算法

为补偿上述时效误差, 本文采用ADEM进行实时补偿。该方法通过截断泰勒级数逼近信号导数, 并结合积分器抑制高频噪声, 避免传统有限差分法易放大噪声的缺陷。

2.1 系统总体框架

基于ADEM的双频激光干涉测量系统系统总体框架如图2所示。信号链路前端由5块预处理板卡构成, 每块板卡集成多片ADC芯片, 负责对光电探测器输出的模拟信号进行调理与ADC。各板卡采集的数字信号通过VPX背板高速总线汇总至主板FPGA₁ (Xilinx Kintex UltraScale系列), 由FPGA₁统一完成时效误差补偿、相位解算及位移计算等核心算法任务。解算得到的位移数据最终通过USB接口传输至上位机进行显示与存储。

在该架构中, 各ADC通道间采集延时不一致是时效误差的主要来源之一。由于不同ADC芯片的电气特性差异、时钟路径不匹配及板卡间走线长度偏差等

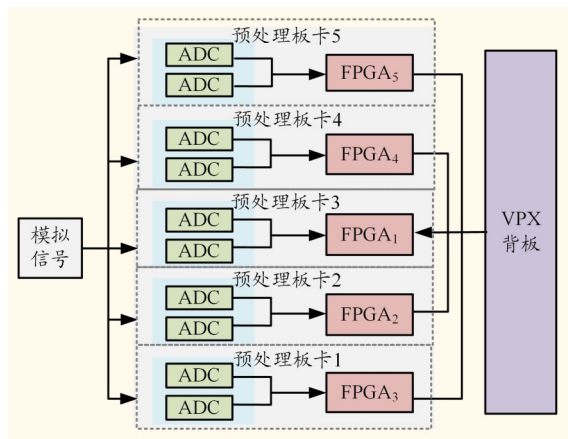


图2 基于ADEM的双频激光干涉测量系统系统总体框架

因素, 各通道数据到达FPGA解算模块的时间存在先后差异。这一时序失配将导致相位解算结果滞后于运动台真实状态, 进而引入位移测量误差。为解决该问题, 本文在信号采集链路中引入基于JESD204B协议的多通道同步方案, 以确保各通道数据在同一时钟上沿对齐后进入解算模块, 从数据采集源头消除时序不一致引入的误差分量。

2.2 多通道同步方案

在本系统传输架构中, JESD204B链路至关重要, 其一端连接ADC芯片JESD204B Tx模块, 负责将ADC转换后的数字信号依JESD204B协议处理后传输; 另一端连接FPGA的JESD204B RX IP核, 用于接收并解析链路数据。时钟芯片在JESD204B接口链路中发挥着关键作用, 它为链路的发送端与接收端提供高度同步的参考时钟SYSREF和设备时钟Device clk。Device clk作为系统运行基准, 确保收发端以相同节奏处理数据; SYSREF用于校准多帧数据的同步边界。

为达成支持JESD204B协议的系统规模拓展^[15-16], 2块板卡上的时钟芯片构建起一套同步机制。通过外接等长信号导线传输时钟信号, 使2块板卡时钟芯片的系统时钟同源且相位差极小。同时, 利用SYSREF信号实现多帧数据同步, 各板根据SYSREF生成本地多帧时钟, 确保数据传输时各通道间的精确同步, 实现整个系统时钟网络的高度同步和同源, 为系统稳定运行提供有力保障。

2.3 双线程互补策略

ADEM在信号过零点附近存在奇点域, 此时导数估计公式中的分母趋近于零, 导致计算结果发散。为解决该问题, 本文采用双线程互补策略: 构建2个并行运算线程, 令其复位时间相差半个信号周期, 使任一时刻至少有1个线程处于非奇点有效区间, 通过互补

杜浩, 祝文森, 张文涛, 等: 基于代数导数估计法的双频激光干涉测量系统时效误差实时补偿

选通拼接为连续输出。

由于系统信号为变频信号, 有效区间长度动态变化, 需采用自适应方法生成选通信号。本文设计三状态状态机 (idle、count_high、flag_generate), 流程如下: 首先对两线程信号延迟一拍后做差, 过阈值时产生奇点位置脉冲 pulse_1 和 pulse_2; 进而生成 2 路周期电平信号, 异或后得到 XOR 信号, 其低电平区间对应两线程均有效的区域; 状态机实时追踪 XOR 低电平持续时间, 在该区间中点处产生选通脉冲 pulse_out, 交替切换两线程的输出。该机制使系统输出始终来自非奇点有效线程, 且状态机实时追踪信号周期变化, 无需预设频率先验信息。互补电平信号图如图 3 所示。

2.4 FPGA 硬件实现

本文依托 Xilinx Kintex UltraScale FPGA 平台完成 ADEM 的硬件部署, 算法整体流程如图 4 所示。正交信号, 经过零检测模块判断幅值过零点, 产生初始化复位信号 1 和 2; 内部计数器据此生成时间变量 t_1 、 t_2 。2 路信号分别进入 2 个独立运算线程 (线程 1、线程 2), 各线程内部先经积分模块得到中间变量 z_1 , 再代入一阶导数 y' 计算与二阶导数 y'' 计算模块分别求得一阶和二阶导数。2 个线程各自采用双线程互补选通模块, 利用状态机判断当前信号是否处于奇点有效区间, 各自输出连续无间断的导数结果。2 个线程输出的导数信号经合并模块汇合为一路, 送入补偿量计算模块求得时效误差修正量, 最终叠加至原始正交信号 A , 输出补偿后信号。

上述模块采用流水线架构部署, 400 MHz 时钟下每周输出出一组有效数据。初始化阶段设置等待计数器, 前 2 个周期内不输出结果, 待状态机稳定后使能输出。ADEM 展开阶次选取 $N=3$, 兼顾亚纳米级补偿精度与 FPGA 资源占用 (控制在 70% 以内)。运算变量以相位角 $0 \sim 2\pi$ 对应电子细分数 $0 \sim 4096$ 为量化基准, 采用定点数格式实现。

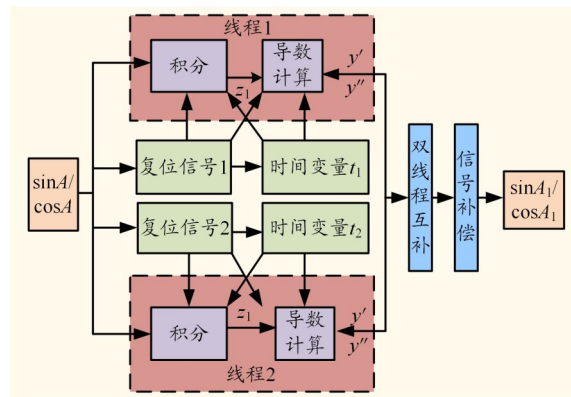


图4 ADEM整体流程

3 实验验证与结果分析

3.1 实验平台与测试条件

为排除实际光路中环境振动、空气扰动及光电探测器噪声等因素对实验结果的影响, 本文采用 SDG122X 型双通道信号发生器模拟运动台输出的正弦测量信号, 该发生器最大输出频率为 120 MHz, 最高采样率为 1.2 GSa/s, 可满足高精度信号模拟需求。实验基于 Xilinx Kintex UltraScale FPGA 平台, 采用硬件在环 (HIL) 仿真方法进行验证。实验环境温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 30%~50%, 系统处理时钟频率为 400 MHz。为模拟系统延时, 对信号发生器输出信号引入 5 个时钟周期的固定延时, 并利用 ADEM 进行补偿。实验平台如图 5 所示。信号发生器输出 2 路正交正弦信号, 接入 FPGA 信号处理板卡, 板卡内部完成 ADEM 误差补偿与相位解算, 算法逻辑通过 JTAG (Joint Test Action Group) 接口下载至 FPGA, 并可在在线读取内部信号进行功能验证。解算结果通过 USB 接口上传至上位机进行数据记录与分析。

3.2 匀速运动工况下的 ADEM 补偿效果

设定信号频率分别为 1、4、8 MHz, 对应运动台速

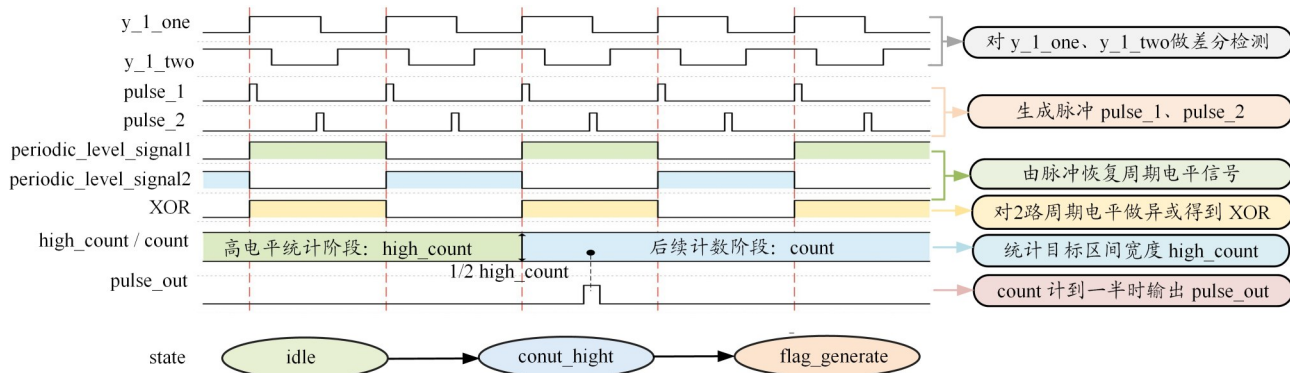


图3 互补电平信号图

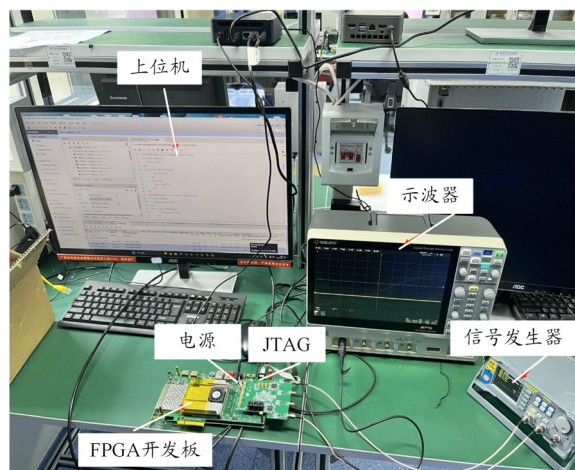
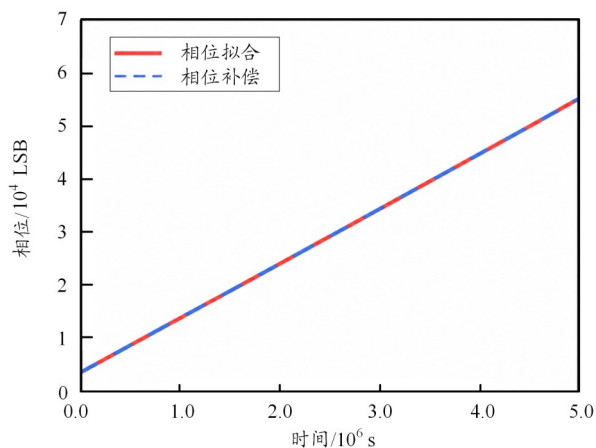


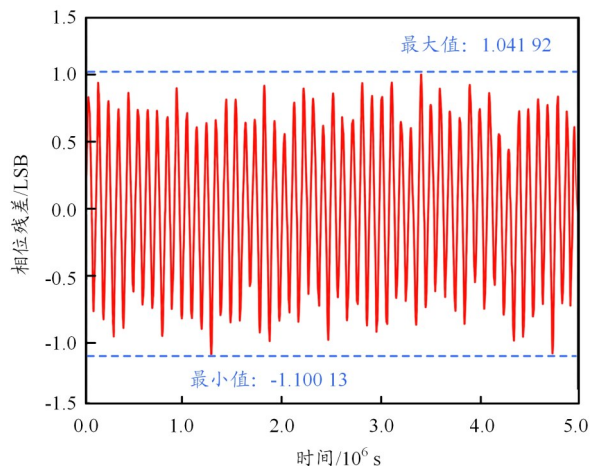
图5 实验测试平台

度为0.316、1.264和2.528 m/s。匀速运动条件下信号频率恒定,理论上阶导数为常数,高阶导数为零。实验结果表明,随着速度增大,ADEM补偿精度逐渐下降,主要原因为:1)高速下信号周期缩短,单位周期内采样点数减少,基于泰勒截断的导数拟合误差增大;2)有限阶次展开本身引入模型误差;3)FPGA定点运算与有限位宽引起的截位误差导致补偿结果存在小幅波动。

对补偿后信号进行相位解算,经平滑与一次拟合处理后,得到1、4、8 MHz下的补偿相位精度及相位残差,分别如图6~图8所示。相位残差可以衡量激光干涉测量系统的位移测量精度、抗干扰能力和稳定性,从3种匀速情况下的补偿相位和相位残差结果来看,频率越低,相位补偿精度越好,高频下误差有所增加;相位残差呈现递增规律,分别在 ± 1 、 ± 2 和 ± 3 LSB之间波动,体现了ADEM的补偿效果良好。同时,也反映了速度增大,出现ADEM的补偿效果欠佳的现象。

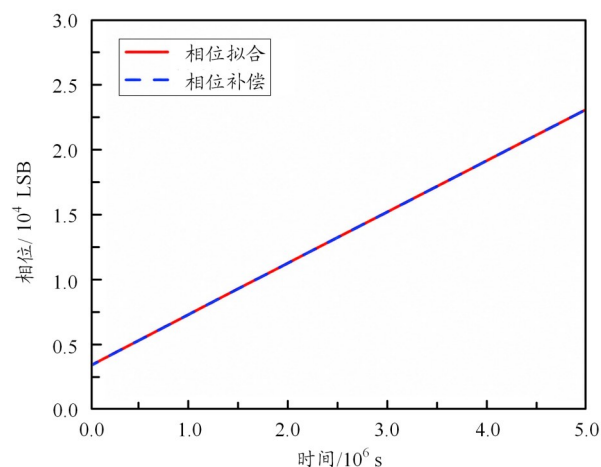


(a) 补偿相位精度

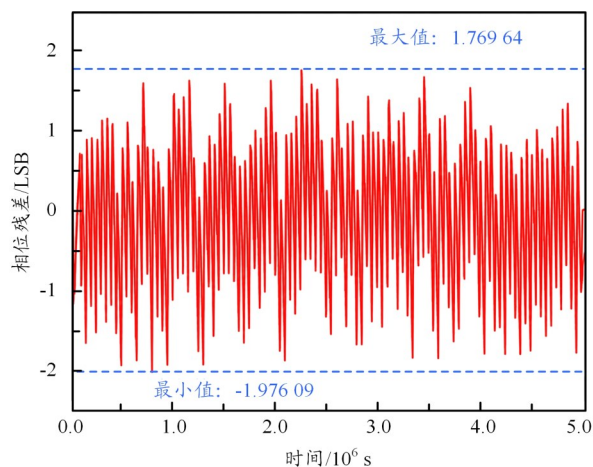


(b) 相位残差

图6 1 MHz补偿相位精度及相位残差



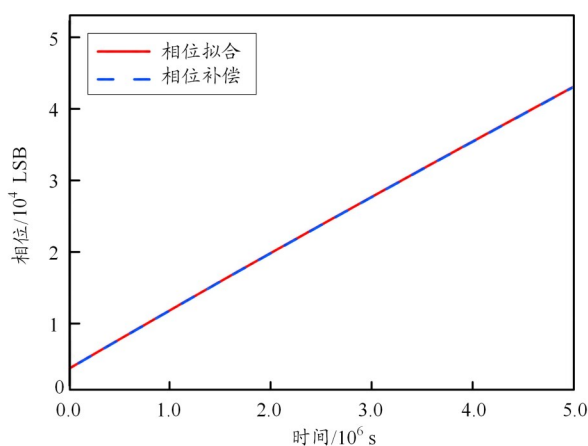
(a) 补偿相位精度



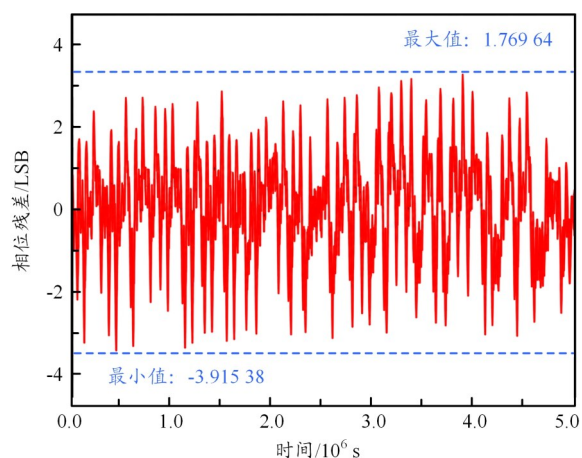
(b) 相位残差

图7 4 MHz补偿相位精度及相位残差

杜浩, 祝文森, 张文涛, 等: 基于代数导数估计法的双频激光干涉测量系统时效误差实时补偿



(a) 补偿相位精度



(b) 相位残差

图8 8 MHz补偿相位精度及相位残差

进一步对相位残差进行统计分析,计算标准差、最大偏差与峰间抖动,结果如表1所示。由表1可知,随着运动速度从0.316 m/s增至2.528 m/s,相位残差的标准差由0.802 mrad升至2.028 mrad,最大偏差由1.688 mrad升至6.007 mrad,峰间抖动由3.286 mrad升至10.976 mrad,各项指标均随速度升高呈递增趋势,表明高频段补偿精度略有下降,但整体残差保持在较低水平。以最大偏差折算,等效细分数分别为3 724、2 073和1 046,最低值仍优于1 024,满足亚纳米级分辨率要求。

表1 运动台不同速度下相位残差数据

速度/(m/s)	标准差/mrad	最大偏差/mrad	峰间抖动/mrad
0.316	0.802	1.688	3.286
1.264	1.135	3.031	5.746
2.528	2.028	6.007	10.976

为量化ADEM的误差抑制能力,定义补偿前后位移测量误差峰值如表2所示。可以看出,在信号频率为1、4、8 MHz的条件下,位移测量误差分别由约4.8、19、37 nm降至0.5、4、16 nm,低频段误差接近零,验证了ADEM在匀速动态工况下对时效误差具有显著补偿效果。

表2 补偿前后误差峰值

信号频率/MHz	补偿前误差峰值/nm	补偿后误差峰值/nm
1	4.8	0.5
4	19	4
8	37	16

在激光干涉测量系统中,信号的频率与时效误差呈正相关关系,即信号频率越大,时效误差愈加显著。一方面是由于运动台的运动速度加快时,运动参数也随之增大,导致计算模型整体量值增大;另一方面是由于高频信号情况下,在一个信号周期内的数据采样数减少,这对于ADEM来说,运动参数的计算误差就会增大;同时,FPGA平台中采用定点数运算且数据位宽有限,难免用到数据截位,这些都会引起误差。

3.3 变速运动工况下的ADEM补偿效果

变速运动是实际光刻及其他工况中常见的运动形式。本文设定信号频率在1~16 MHz内连续变化,模拟运动台变速运动状态。相比匀速工况,变速条件下二阶及高阶导数对时效误差的贡献显著增大,不可忽略。对补偿后信号进行相位解算与平滑拟合,得到相位残差如图9所示。可以看出,相位精度高频段补偿精度略有下降,相较前述低频降低一个数量级;相位残差随频率升高而增大,高频段(接近16 MHz)残差在 ± 6 LSB范围内波动,整体仍处于可接受水平。

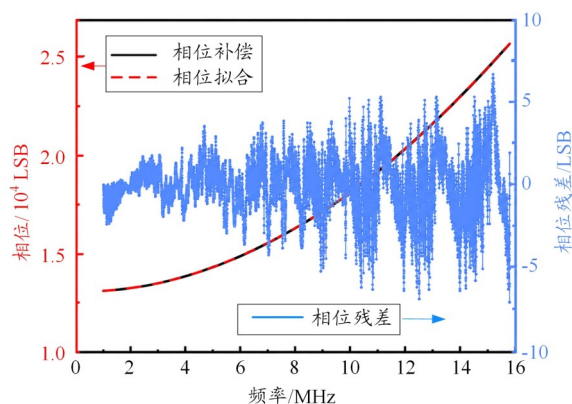


图9 1~16 MHz补偿相位精度及相位残差

1~16 MHz 频率内, ADEM 补偿前后的时效误差对比曲线, 如图 10 所示。可以看出, 补偿前系统时效误差幅值随频率上升呈单调增长趋势, 最大约 65 nm; 经 ADEM 补偿后, 误差幅值被有效压缩至 20 nm 以内。尽管高频段由于采样点数减少、模型截断误差及定点运算精度限制, 补偿效果略有下降, 但整体误差抑制能力明显, 验证了 ADEM 在变速动态测量中的良好适用性。

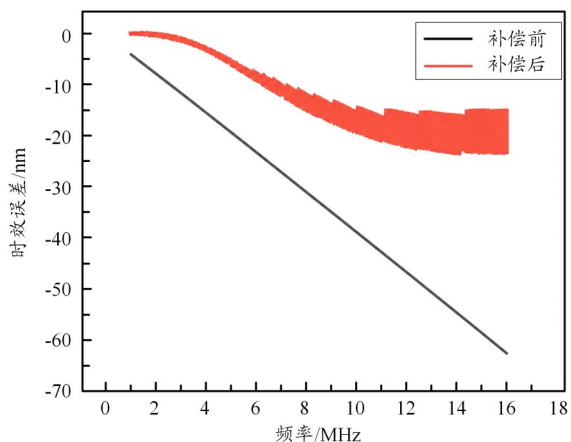


图 10 1~16 MHz 时效误差补偿

4 结束语

本文提出了一种基于 ADEM 的双频激光干涉测量系统时效误差实时补偿方法, 并完成了算法设计与硬件实现。主要结论如下:

1) 基于 JESD204B 协议子类 1 设计的多通道同步方案, 有效解决了 ADC 采集延时问题, 保证了多通道数据的时序一致性。

2) 采用双线程互补策略, 通过错位复位与状态机控制消除了奇点域和初始化周期对补偿精度的影响, 保证了算法的连续稳定性。

3) 实验结果表明, 匀速工况下位移测量误差由约 4.8 nm (低速) 和约 37 nm (高速) 分别降至约 0.5 nm 和约 16 nm; 变速工况下 (1~16 MHz) 系统的时效误差从约 65 nm 压缩至 20 nm 以内。系统等效电子细分优于 1 024, 分辨力达亚纳米级。

本文方法可有效抑制动态测量中的时效误差, 为高速、变速场景下的高精度位移测量提供了可行方案。后续将进一步优化高阶参数估计精度与硬件资源效率, 拓展其在极高速测量中的应用。

参考文献:

- [1] 张凡. 固体激光外差干涉位移测量技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [2] Hahn I, Weilert M, Xu Wang, et al. A heterodyne interferometer for angle metrology[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(4): 45103.
- [3] 党宝生, 熊显名, 王献英, 等. 超精密光栅尺位移测量系统[J]. 激光杂志, 2018, 39(9): 42-46.
- [4] 齐冀. 日美半导体摩擦中美国霸权逻辑分析[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [5] Chen Wang, Ellis J D. Data age error compensation for nonconstant velocity metrology[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(11): 2601-2611.
- [6] 朱维斌, 王辛, 叶树亮. 光栅动态测量在变速运动中的时效误差补偿方法: CN201711002890. X[P]. 2017-10-24: 1-8.
- [7] Zhao Shijie, Wei Haoyun, Zhu Minhao, et al. Green laser interferometric metrology system with sub-nanometer periodic nonlinearity[J]. Applied Optics, 2016, 55(11): 3006-3011.
- [8] Zeng Qilin, Zhao Zhengyi, Xiong Xianming, et al. Design and implementation of a subnanometer heterodyne interference signal processing algorithm with a dynamic filter[J]. Sensors, 2022, 22(14): 5422.
- [9] Fliess M, Join C, Sira-Ramírez H. Closed-loop fault-tolerant control for uncertain nonlinear systems[J]. Control and Observer Design for Nonlinear Finite and Infinite Dimensional Systems, 2005: 217-233.
- [10] Sira-Ramírez H, Rodríguez C G, Romero J C, et al. Algebraic identification and estimation methods in feedback control systems[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2014.
- [11] Morales R, Rincón F, Gazzano J D, et al. Real-time algebraic derivative estimations using a novel low-cost architecture based on reconfigurable logic[J]. Sensors, 2014, 14(5): 9349-9368.
- [12] 杨栋. 高速高精度采集系统研究与 FPGA 实现[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- [13] 李来轩. 多通道采集与处理的若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [14] Nozato H, Kokuyama W, Shimoda T, et al. Primary calibration method for laser doppler vibrometers using electro-optical modulator[J]. Precision Engineering, 2025, 93: 204-215.
- [15] 朱超, 屈晓旭, 娄景艺. 基于 JESD204B 协议的高速串行接口研究[J]. 通信技术, 2017, 50(11): 2391-2399.
- [16] 陈卓. 基于 JESD204B 协议的高速串行接收机控制器的数字电路设计与实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [17] 陆胤桦. 基于运动参数的编码器动态角度测量时效误差补偿方法研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021.
- [18] 张志成. 双频激光干涉系统信号处理板卡设计[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.