



基于微分运算的激光外差干涉非线性误差补偿算法

陈洪强, 谢建东, 严利平

(浙江理工大学精密测量技术实验室, 杭州 310018)

摘要: 为补偿激光外差干涉位移测量中因激光频率混叠引入的一阶非线性误差, 提出了一种基于微分运算的非线性误差补偿算法。首先对外差干涉信号进行正交下混频, 得到一对包含待测相位信息的正交信号; 然后对正交信号进行微分运算, 以消除频率混叠引入的直流偏移误差; 最后通过反正切运算求得待测相位。设计了基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的全硬件补偿算法, 开展了模拟干涉信号和激光外差干涉位移测量实验。实验结果表明: 采用该补偿算法后, 位移测量结果的信纳比从 38.59 dB 提高至 54.65 dB, 各阶谐波失真减小约一个数量级, 验证了所提算法的可行性和有效性。该算法可减小激光外差干涉位移测量中的非线性误差, 提高测量精度。

关键词: 激光外差干涉; 非线性误差补偿; 频率混叠; 微分运算; 位移测量

中图分类号: TH741

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2022)09-0783-08

A nonlinear error compensation algorithm for laser heterodyne interference based on differential operation

CHEN Hongqiang, XIE Jiandong, YAN Liping

(Precision Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to compensate for the first-order nonlinear error caused by laser frequency mixing in laser heterodyne interference displacement measurement, a nonlinear error compensation algorithm based on differential operation was proposed. First, the heterodyne interference signal was subjected to quadrature down-mixing to obtain a pair of quadrature signals containing the phase information to be measured. Subsequently, the differential operation was performed to eliminate the DC offset caused by laser frequency mixing in the quadrature signal. Finally, the phase to be measured was obtained through the arctangent operation. The all-hardware compensation algorithm based on field programmable gate array (FPGA) that can perform full hardware calculation was designed, the experiments for simulated interference signal and the measurement of the laser heterodyne interference displacement were carried out. The experimental results have shown that by using the compensation algorithm, the signal to noise and distortion of the displacement measurement results was improved from 38.59 dB to 54.65 dB, and the harmonic distortion of each order was reduced by about an order of magnitude, verifying the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm. The algorithm can reduce the nonlinear error in the laser heterodyne interference displacement measurement and improve the measurement accuracy.

Key words: laser heterodyne interference; nonlinear error compensation; frequency mixing; differential operation; displacement measurement

收稿日期: 2022-04-08 网络出版日期: 2022-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875530)

作者简介: 陈洪强(1997—), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要从事信号处理相关工作。

通信作者: 谢建东, E-mail: xiejiaandong@zstu.edu.cn

0 引言

激光外差干涉测量中的干涉信号为交流信号,具有抗干扰性强、分辨率高等优点,被广泛应用于精密测量领域^[1-3]。然而,受光源椭圆偏化、偏振分光镜偏振泄露等因素的影响,光路存在激光频率混叠,会引入几纳米甚至几十纳米的非线性误差^[4-5],限制了测量精度的提高。因此,如何补偿激光外差干涉测量中的非线性误差成为各国学者的研究重点。

激光外差干涉测量中的非线性误差补偿方法可大致分为三种。第一种补偿方法是优化光路结构。陈洪芳等^[6]将测量角锥棱镜以运动方向为轴线旋转一定角度,使非线性误差一次谐波减小为原来的40%;侯文政等^[7]在光路中增加四分之一波片,通过旋转测量探测器前的偏振片,使位移测量结果非线性误差小于1 nm;Fu等^[8]通过在光路的参考臂或测量臂放置可调节光功率衰减器,将一阶非线性误差抑制在0.24 nm以内。第二种补偿方法是采用空间分离式外差干涉光路,从源头上避免频率混叠。贺寅竹等^[9]利用一个偏振分光镜、三个分光镜和三个反射镜构成对称分离式外差干涉光路,减小非线性误差;Fu等^[10]利用一个分光镜和四个角锥棱镜组成分离式外差干涉光路,缺点是其中的分光镜会降低激光功率使用效率;Le等^[11]设计了一个专用的偏振光束置换组镜来实现分离式外差干涉光路,在提高激光功率使用效率的同时简化了光路结构。第三种补偿方法是通过信号处理算法来补偿非线性误差,此方法无需改变光源和光路结构。Eom等^[12]采用基于最小二乘的椭圆拟合算法,对干涉信号正交下混频后的正交信号进行椭圆拟合,实现非线性误差的补偿;Lu等^[13]采用离散时间连续小波变换算法对非线性误差进行量化,并根据量化结果进行非线性误差补偿;Fu等^[14]利用正交解调和极值算法补偿非线性误差,根据正交解调输出信号的极值消除直流偏移和幅值不等的影响,实现非线性误差补偿。上述信号处理算法通常需要预先获得整周期正交信号数据,并且算法较为复杂,运算量较大,难以实现快速相位解调与非线性误差补偿。Wang等^[15]通过现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)实现了基于卡尔曼滤波的椭圆拟合算法,提高了非线性误差补偿速度,但该算法仍需预先获取整周期数据;本课题组在前期研究^[16]中提出了一种迭代算法,对利萨如图进行平移和缩放,仅需少量数据即可实现非线性误差的快速补偿,但

该算法也较为复杂。

综上可知:优化光路结构的方法需引入额外的光学器件,增加了光路复杂程度;空间分离式外差结构的方法可从源头上消除非线性误差,但容易受环境影响;通过信号处理算法实现非线性误差补偿的方法无需修改光路结构,但现有方法所需数据量大,算法复杂。为此,本文提出了一种基于微分运算的非线性误差补偿算法,通过微分运算消除正交信号中包含的直流偏移,实现一阶非线性误差补偿。该算法可用于实时补偿激光外差干涉位移测量中因频率混叠引起的非线性误差,提高位移测量精度。

1 算法原理

1.1 频率混叠对激光外差干涉相位解调的影响

激光外差干涉位移测量的基本结构如图1所示,其中:Laser为双频激光器,BS为分光镜,PBS为偏振分光镜, M_1 和 M_2 为角锥棱镜, P_1 和 P_2 为偏振片, PD_1 和 PD_2 为光电探测器; ω_1 和 ω_2 为双频激光器的输出激光频率, A 和 B 分别为P偏振态与S偏振态的激光强度, α 和 β 分别为P偏振态与S偏振态混叠的激光强度, $D(t)$ 为待测对象位移, $S_r(t)$ 和 $S_m(t)$ 分别为参考与测量干涉信号。理想情况下,双频激光器输出一对正交线偏振光,偏振分光镜能够将偏振方向互相垂直的激光完全分离,分光后的透射与反射激光分别经过测量臂和参考臂,携带与光程对应的相位信息,通过干涉信号解调,获取相位差并换算待测对象位移。

但实际情况中,由于激光器出射偏振态不稳定,偏振分光镜存在偏振泄露,测量臂和参考臂中均存在频率混叠,对应测量干涉信号可表示为:

$$S_m(t) \propto AB \cos[\omega_s t + \varphi(t)] + (A\beta + B\alpha) \cos(\omega_s t) + \alpha\beta \cos[\omega_s t - \varphi(t)] \quad (1)$$

其中: $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$,为干涉信号频率; $\varphi(t)$ 为待测相位。

传统算法利用锁相放大的方法进行相位解调,算法原理如图2所示,其中:LO为本振,LPF为低通滤波器,ATAN为反正切运算。

本振输出一对相位正交并且频率与参考干涉信号相同的本地参考信号,测量干涉信号与本地参考信号相乘,并经过低通滤波器滤除高频成分,得到畸变的正交信号 N_1 、 N_2 :

$$N_1 = \frac{AB - \alpha\beta}{2} \sin\varphi(t) \quad (2)$$

$$N_2 = \frac{AB + \alpha\beta}{2} \cos\varphi(t) + \frac{A\beta + B\alpha}{2} \quad (3)$$

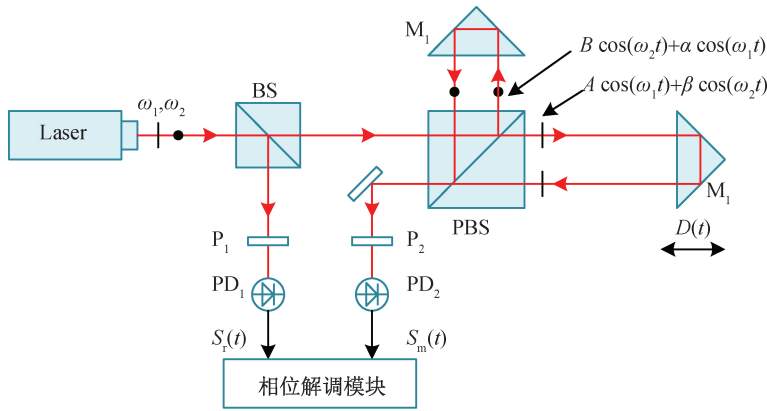
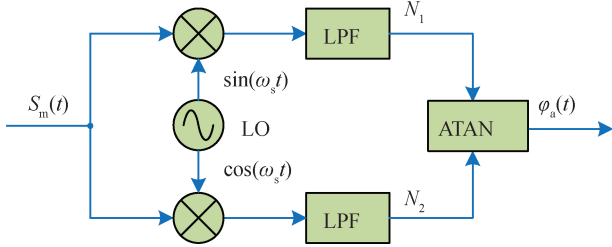
图 1 激光外差干涉位移测量基本结构示意图^[16]

图 2 基于锁相放大的相位解调原理示意图

显然,在频率混叠的影响下,正交信号中的余弦成分产生了直流偏移,并且正交信号的幅值也出现不相等的情况。经过反正切运算,得到相位解调结果:

$$\varphi_a(t) = \arctan \frac{(AB - \alpha\beta)\sin\varphi(t)}{(AB + \alpha\beta)\cos\varphi(t) + A\beta + B\alpha} \quad (4)$$

与待测相位 $\varphi(t)$ 相比,上述解调结果中包含的非线性误差可表示为^[16]:

$$\delta[\varphi_a(t)] \approx -\frac{A\beta + B\alpha}{AB}\sin\varphi(t) - \frac{\alpha\beta}{AB}\sin[2\varphi(t)] \quad (5)$$

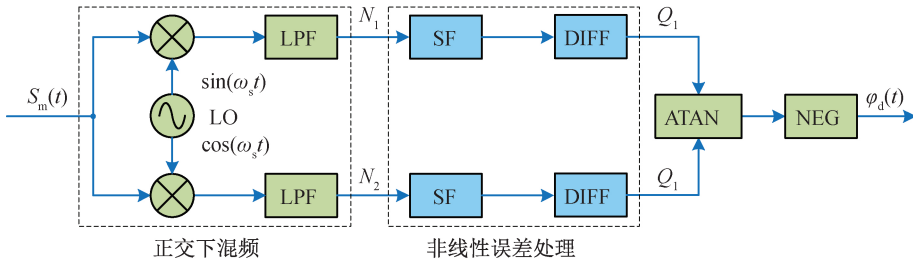


图 3 基于微分运算的非线性误差补偿算法原理示意图

平滑滤波可减小信号噪声、提高稳定性,通过微分运算可将畸变正交信号中的直流偏移消除,获得不包含直流偏移的正交信号 Q_1 、 Q_2 :

$$Q_1 = \frac{AB - \alpha\beta}{2} \varphi'(t) \cos\varphi(t) \quad (6)$$

$$Q_2 = -\frac{AB + \alpha\beta}{2} \varphi'(t) \sin\varphi(t) \quad (7)$$

显然,由频率混叠引入的非线性误差可分为两部分,其中: $\sin[\varphi(t)](A\beta + B\alpha)/AB$ 的周期为 2π rad,为一阶非线性误差; $\sin[2\varphi(t)]\alpha\beta/AB$ 的周期为 π rad,为二阶非线性误差。一阶非线性误差来自 N_2 信号的直流偏移,二阶非线性误差由 N_1 和 N_2 信号幅值不相等引起。由于 α 、 β 远小于 A 和 B ,因此一阶非线性误差远大于二阶非线性误差。

1.2 基于微分运算的非线性误差补偿算法

为补偿一阶非线性误差,本文从消除 N_2 信号中直流偏移角度提出了一种基于微分运算的激光外差干涉非线性误差补偿算法,算法原理如图 3 所示。该算法可分为正交下混频与非线性误差处理两部分。正交下混频包括与本振参考信号相乘以及低通滤波两个步骤,非线性误差处理包括平滑滤波 (SF) 与微分运算 (DIFF) 两个步骤。最后通过反正切和取反运算 (NEG),得到相位解调结果。

进一步利用反正切和取反运算,最终相位解调结果为:

$$\varphi_d(t) = -\arctan \frac{Q_2}{Q_1} = \arctan \frac{(AB + \alpha\beta)\sin\varphi(t)}{(AB - \alpha\beta)\cos\varphi(t)} \quad (8)$$

此时,相位解调结果的非线性误差为:

$$\delta[\varphi_d(t)] \approx \frac{\alpha\beta}{AB}\sin[2\varphi(t)] \quad (9)$$

对比式(5)和式(9)可知,本文提出的算法可以消除激光外差干涉信号中由频率混叠引起的一阶非线性误差,提高鉴相精度。

当频率混叠比例 $A/\alpha=B/\beta=9$ 时,由式(5)和式(9)表示的两种算法非线性误差大小理论值如图4所示。

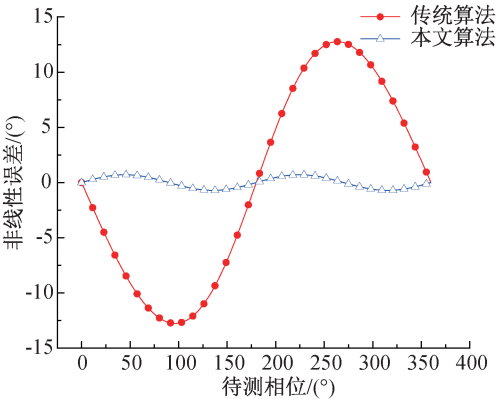
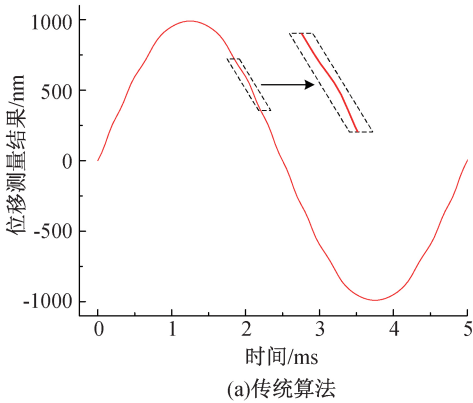


图4 传统算法与本文算法的非线性误差理论值曲线

由图4可知,传统算法的非线性误差近似以周期为 360° 的正弦规律波动,幅值达到 $\pm 13^\circ$,以一阶非线性误差为主。本文算法的非线性误差近似以周期为 180° 的正弦规律波动,幅值仅为 $\pm 0.8^\circ$,主要为残留的二阶非线性误差。



分析两种算法的解调原理可知,本文算法无需预先获得大量数据,通过简单运算即可消除一阶非线性误差,仅残留极小的二阶非线性误差,可有效提高激光外差干涉信号相位解调精度。

2 算法仿真与分析

为验证本文算法非线性误差补偿的可行性,使用 Matlab 对传统相位解调算法和本文基于微分运算的解调算法进行仿真。结合相关文献^[4,14,16-17],频率混叠比例设置为 $A/\alpha=B/\beta=9$,表示两偏振态激光均包含 10% 的泄露成分;设置待测对象以正弦形式运动,频率为 200 Hz,振幅为 $1\text{ }\mu\text{m}$,并叠加标准差为 0.03 的高斯白噪声;同时采用两种算法进行相位解调。进一步根据相位解调结果 $\varphi(t)$ 和激光波长 $\lambda=633\text{ nm}$,换算得到待测对象位移测量结果 $D(t)$,公式为:

$$D(t)=\frac{\varphi(t)}{4\pi}\lambda \tag{10}$$

两种算法位移测量仿真结果如图5所示。由图5可知,传统算法的位移测量仿真结果并非平滑的正弦曲线,存在一定的畸变,本文算法对非线性误差进行了补偿,对应位移测量仿真结果为平滑的正弦曲线。

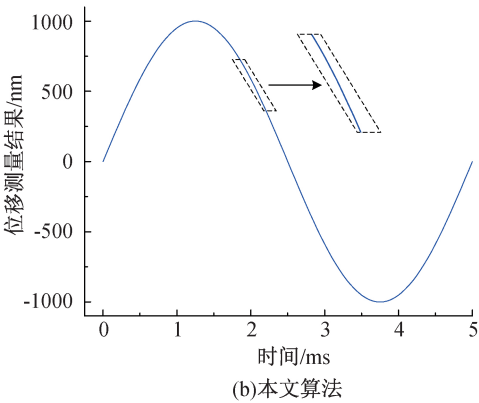


图5 传统算法与本文算法位移测量仿真结果

为进一步对比非线性误差补偿效果,对两种算法的位移结果进行加窗(Hanning 窗)快速傅里叶变换(FFT),FFT 点数为 2048(对应 64 个周期的正弦运动测量结果),FFT 分析结果如图6所示。

理想情况下,FFT 分析结果中应仅包含正弦运动对应的 200 Hz 频率成分,但由于非线性误差的存在,频谱中将出现谐波成分。由图6可知,传统算法位移测量结果中既包含 200 Hz 的基频信号,也包含 400、600 Hz 和 800 Hz 等谐波成分,本文算法中谐波成分明显削弱,各谐波成分的幅值大小如表1所示。

由表1可知,传统算法测量结果中各谐波分量

幅值介于 0.958 nm 至 2.555 nm 之间,本文算法对非线性误差进行了补偿,测量结果中各谐波分量幅值介于 0.012 nm 至 0.178 nm 之间,明显小于传统算法。分别对比各阶谐波幅值,可知本文算法谐波幅值为传统算法的 0.81% 至 6.97% 之间,具有明显的补偿效果。为进一步分析总体谐波失真情况,计算两种算法 FFT 分析结果的信纳比(SINAD,表示基频功率与所有噪声和谐波功率之和的比率^[18-19],SINAD 数值越大表示谐波失真越小)。结合图6所示 FFT 分析结果计算 SINAD,传统算法的 SINAD 仅为 38.74 dB,本文算法的 SINAD 高达 66.77 dB。

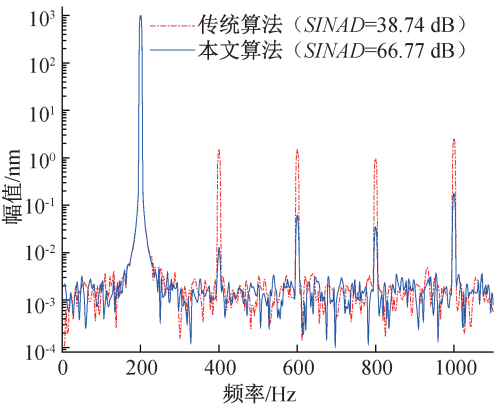


图 6 位移测量仿真结果 FFT 分析频谱

表 1 位移测量仿真结果中 FFT 分析谐波幅值

谐波频率/Hz	幅值/nm		比例/%
	传统算法	本文算法	
400	1.483	0.012	0.81
600	1.524	0.061	4.00
800	0.958	0.035	3.65
1000	2.555	0.178	6.97

上述仿真结果均验证了本文算法非线性误差补偿的可行性。

3 实验结果与讨论

为满足信号处理的实时性,实现快速非线性误

差补偿,采用 FPGA 开发板(SDRlab 122-16, Red Pitaya)实现本文所提出的算法。FPGA 开发板具有双通道同步采样的模数转换器(ADC),采样频率为 122.88 MHz,位数为 16 位,电压输入范围为 ±0.25 V,可满足外差干涉信号采样的要求。采样后的外差干涉信号传输至 FPGA,在 FPGA 内使用直接数字频率合成器(DDS)产生本振信号,采用硬核乘法器单元实现外差干涉信号与本振信号的有符号乘法运算,采用 CIC 低通滤波器(抽取系数为 1920)进行低通滤波,采用滑动均值模块进行平滑滤波,并通过数据缓冲与减法运算单元实现微分计算,最后经坐标旋转数字计算(CORDIC)进行四象限反正切计算求得相位,相位刷新速率为 6.4 kHz,相位传输至计算机后换算为位移结果。

为了对比非线性误差补偿效果,同时在该 FPGA 中实现了传统算法,两种算法可同时进行,互不干扰。为验证基于 FPGA 实现的算法的可行性,先对模拟干涉信号进行相位解调实验;为了验证本文算法的实际性能,进一步搭建激光外差干涉位移测量实验装置,进行实际位移测量实验。

3.1 模拟干涉信号位移测量实验

采用 FPGA 开发板生成模拟干涉信号,并同时利用两种算法进行相位解调,系统结构如图 7 所示。

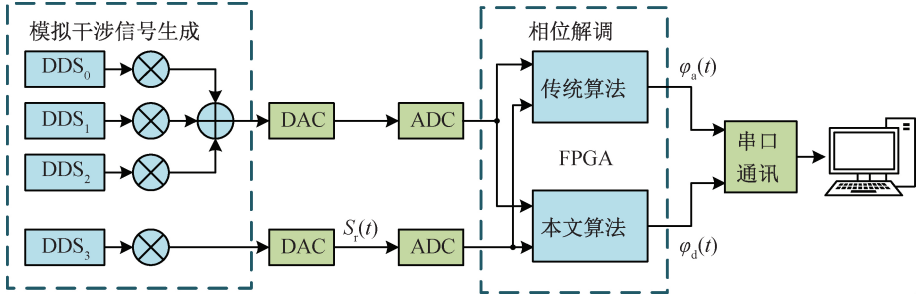


图 7 模拟干涉信号位移测量实验示意图

在模拟干涉信号生成 FPGA 内,通过 $\text{DDS}_0 \sim \text{DDS}_2$ 模块生成测量干涉信号,通过 DDS_3 生成参考干涉信号,其中频率和相位可通过 DDS 模块的频率控制字与相位控制字进行设置,信号幅值以及混叠相关参数可通过乘法器对各 DDS 输出的正弦信号进行乘法运算来实现,最终模拟的测量与参考干涉信号可分别表示为:

$$S_m(t) = \Gamma_0 \cos[\omega_s t + \varphi(t)] + \Gamma_1 \cos(\omega_s t) + \Gamma_2 \cos[\omega_s t - \varphi(t)] \quad (11)$$

$$S_r(t) = \Gamma_0 \cos(\omega_s t) \quad (12)$$

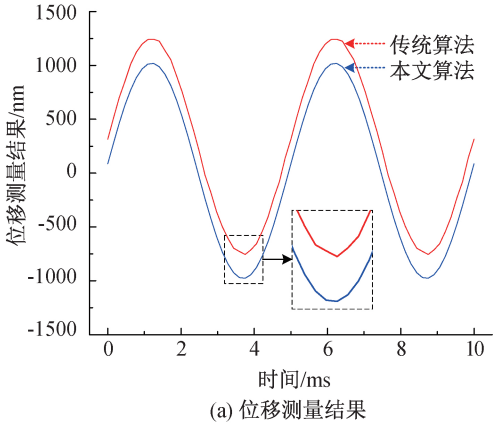
其中:干涉信号频率 $\omega_s = 3.84 \text{ MHz}$; $\Gamma_0 = AB$, $\Gamma_1 = A\beta + B\alpha$, $\Gamma_2 = \alpha\beta$,表示各分量电压幅值;待测相位

$\varphi(t) = 4\pi D(t)/\lambda$;待测位移 $D(t) = D_A \sin(2\pi f_{\text{sin}} t)$,其中 D_A 和 f_{sin} 分别为待测位移的幅值和频率。

模拟的干涉信号经双通道 14 位数模转换器(DAC)转换后输出,经 ADC 采样后传输至相位解调 FPGA,采用本文算法和传统算法同时进行相位解调,分别获得相位解调结果 $\varphi_d(t)$ 与 $\varphi_a(t)$,数据打包后经串口通讯模块传输至计算机,数据解包后换算为位移结果并进行显示、存储、分析,完成位移测量。

实验中,设置 $\Gamma_0 = 162 \text{ mV}$, $\Gamma_1 = 36 \text{ mV}$, $\Gamma_2 = 2 \text{ mV}$,即 $A/\alpha = B/\beta = 9$,设置 $f_{\text{sin}} = 200 \text{ Hz}$, $D_A = 1 \text{ }\mu\text{m}$,即将模拟待测位移设置为频率等于 200 Hz,

振幅等于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的正弦位移运动。实验时,对两种算法均以 6.4 kHz 的速率记录 2048 点的位移测量



结果,对应 64 个周期的正弦运动,其中部分位移测量结果与 FFT 分析频谱如图 8 所示。

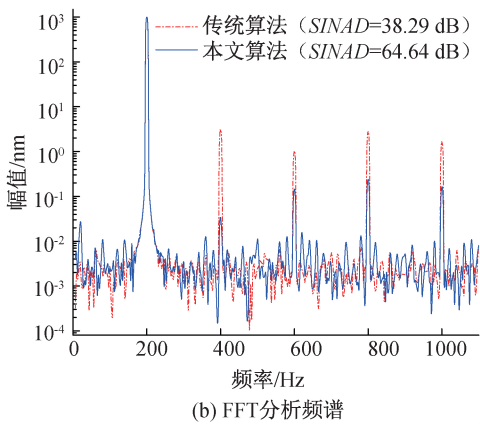


图 8 模拟干涉信号位移测量结果与 FFT 分析频谱

如图 8 所示,为避免波形重叠,其中传统算法位移测量结果波形向上平移了约 $0.25\text{ }\mu\text{m}$,由位移测量结果的波形可知,传统算法的位移测量结果受非线性误差影响而存在一定的畸变,本文算法对非线性误差进行了补偿,对应位移测量结果无明显畸变。由 FFT 分析频谱可知,传统算法的测量结果存在明显的谐波,各谐波成分的幅值大小如表 2 所示。

谐波频率/Hz	幅值/nm		比例/%
	传统算法	本文算法	
400	3.209	0.034	1.06
600	1.029	0.145	14.09
800	2.818	0.240	8.52
1000	1.696	0.165	9.73

由表 2 可知,传统算法各阶谐波分量幅值介于 1.029 nm 至 3.209 nm 之间, $SINAD$ 仅为 38.29 dB ,而本文算法各阶谐波明显减小,各阶谐波分量幅值介于 0.034 nm 至 0.240 nm 之间, $SINAD$ 高达 64.64 dB 。分别对比各阶谐波幅值,可知本文算法谐波幅值为传统算法的 1.06% 至 14.09% 之间,补偿效果显著。与算法仿真结果相比,模拟干涉信号位移测量实验中 $SINAD$ 从 66.77 dB 下降至 64.64 dB ,这是因为算法仿真中均为理想的信号,各运算环节均为理想运算,而实际相位解调中,干涉信号会受 ADC 与 DAC 的噪声等因素影响,导致略微下降。

上述模拟干涉信号位移测量实验结果表明,本文算法具有良好的非线性误差补偿效果。

3.2 激光外差干涉位移测量实验

为验证本文算法在实际位移测量中的补偿效

果,搭建了如图 9 所示的激光外差干涉位移测量实验装置,包括双频激光器、偏振分光镜、测量和参考角锥棱镜、偏振片和光电探测器。双频激光器 (Agilent 5517 D) 中心波长为 632.991354 nm ,频差为 3.87 MHz 。测量角锥棱镜安装在行程为 $15\text{ }\mu\text{m}$,分辨率为 0.05 nm 的纳米位移平台 (P-753.1CD) 上。光电探测器 (PDA36A2) 带宽 12 MHz ,用于探测测量干涉信号,参考干涉信号探测装置集成在激光器内部。

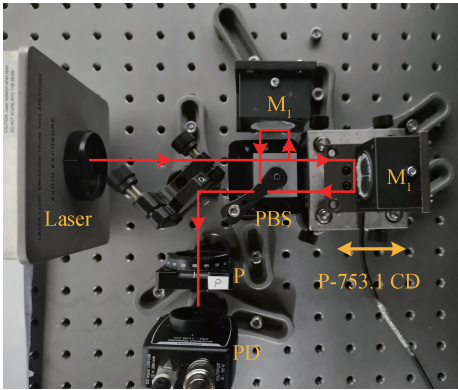


图 9 激光外差干涉位移测量实验装置图

实验时,参考角锥棱镜 (M_1) 静止不动,测量角锥棱镜 (M_2) 在纳米位移平台驱动下进行频率为 200 Hz 、振幅为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的正弦运动,提供待测位移。测量和参考干涉信号分别经 ADC 模块采集,在 FPGA 上同时采用传统算法和本文算法进行相位解调,相位测量结果传输至计算机后计算位移测量结果,再进一步通过 FFT 分析,评估非线性误差补偿效果。实验时,对两种算法均以 6.4 kHz 的速率记录 2048 点的位移测量结果,对应 64 个周期的正弦运动,其中部分位移测量结果与 FFT 分析频谱如图 10 所示。

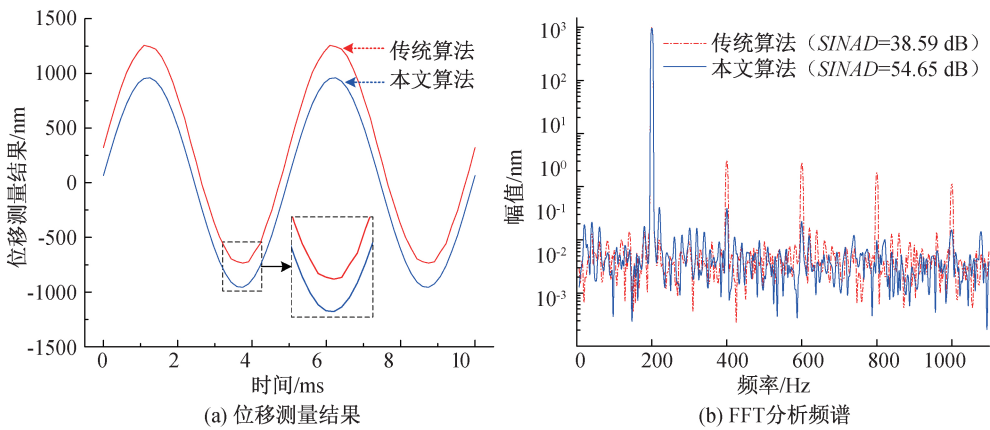


图 10 两种算法位移测量结果与 FFT 分析频谱

如图 10 所示,为避免波形重叠,其中传统算法位移测量结果波形向上平移了约 $0.25\text{ }\mu\text{m}$,由位移测量结果的波形可知,传统算法的位移测量结果受非线性误差影响而存在一定的畸变,本文算法对非线性误差进行了补偿,对应位移测量结果无明显畸变。由 FFT 分析频谱可知,传统算法的测量结果存在明显的谐波,各谐波成分的幅值大小如表 3 所示。

表 3 激光外差干涉位移测量结果中 FFT 分析谐波幅值			
谐波频率/Hz	幅值/nm		比例/%
	传统算法	本文算法	
400	3.081	0.382	12.40
600	2.799	0.221	7.90
800	1.841	0.097	5.27
1000	1.199	0.153	12.76

由表 3 可知,传统算法各阶谐波分量幅值介于 1.199 nm 至 3.081 nm 之间, $SINAD$ 仅为 38.59 dB ,而本文算法各阶谐波明显减小,各阶谐波分量幅值介于 0.097 nm 至 0.382 nm 之间, $SINAD$ 提升至 54.65 dB 。分别对比各阶谐波幅值,可知本文算法谐波幅值为传统算法的 5.27% 至 12.76% 之间,具有明显的补偿效果。与模拟干涉信号位移测量实验相比,实际位移测量实验中 $SINAD$ 从 64.64 dB 下降至 54.65 dB ,这是因为实际位移测量中,受温度漂移、气流扰动等影响,干涉信号中会包含额外的波动,导致测量结果 $SINAD$ 下降,但实际位移测量实验中各阶谐波分量幅值仍为亚纳米量级,仍验证了本文算法的补偿效果。

综合上述仿真实验,模拟干涉信号仿真和激光外差干涉位移测量实验结果,与传统方法相比,本文所提出的算法测量结果波形无明显畸变,并且谐波失真更小, $SINAD$ 更高,这表明本文算法可有效补偿激光外差干涉位移测量中的非线性误差。

4 结 语

本文针对激光外差干涉测量中由频率混叠引起的一阶非线性误差,提出了一种基于微分运算的非线性误差补偿算法。通过 FPGA 对下混频后的正交信号进行微分运算,消除正交信号中的直流偏移,经反正切运算求得待测相位,实现了一阶非线性误差的补偿与待测相位的精确解调。与其他补偿方法相比,所提出方法无需改变光路结构,所需数据量小,运算速度快,可实现一阶非线性误差实时补偿,满足动态测量的需求。开展了理论分析、模拟干涉信号解调、激光外差干涉位移测量实验来综合验证本文算法的可行性与性能。与传统方法相比,模拟干涉信号位移测量仿真实验结果显示,该算法可将 $SINAD$ 从 38.74 dB 提升至 66.77 dB ;在激光外差干涉位移测量实验中,该算法可将 $SINAD$ 从 38.59 dB 提高至 54.65 dB ,各阶谐波失真减小了约一个数量级;有效补偿了激光外差干涉位移测量中存在的一阶非线性误差,提高了测量精度,可广泛应用于光纤传感、振动测量等领域。

参考文献:

[1] Nozato H, Kokuyama W, Ota A. Improvement and validity of shock measurements using heterodyne laser interferometer[J]. Measurement, 2016, 77: 67-72.

[2] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 061102.

[3] Bai Y, Hu P C, Lu Y F, et al. A six-axis heterodyne interferometer system for the joule balance [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(6): 1579-1585.

[4] 王越, 胡鹏程, 付海金, 等. 外差激光干涉仪周期非线性误差形成机理与补偿方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,

- 2020, 52(6): 126-133.
- [5] 张鹏, 崔建军. 外差干涉仪非线性误差补偿抑制与测量研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 38-50.
- [6] 陈洪芳, 钟志, 丁雪梅. 激光外差干涉的非线性误差补偿[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1043-1047.
- [7] 侯文玫, 张运波, 乐燕芬, 等. 外差激光干涉测长非线性误差的消除[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 162-167.
- [8] Fu H J, Hu P C, Tan J B, et al. Simple method for reducing the first-order optical nonlinearity in a heterodyne laser interferometer [J]. Applied Optics, 2015, 54(20): 6321-6326.
- [9] 贺寅竹, 赵世杰, 尉昊赞, 等. 跨尺度亚纳米分辨的可溯源外差干涉仪[J]. 物理学报, 2017, 66(6): 43-49.
- [10] Fu H J, Wu G L, Hu P C, et al. Highly thermal-stable heterodyne interferometer with minimized periodic nonlinearity[J]. Applied Optics, 2018, 57(6): 1463-1467.
- [11] Le Y F, Jin S J L, Jin T. Simple heterodyne interferometer using a polarizing beam displacer [J]. Optics Letters, 2021, 46(9): 2015-2018.
- [12] Eom T B, Choi T Y, Lee K H, et al. A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer [J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(2): 222-225.
- [13] Lu C, Troutman J R, Schmitz T L, et al. Application of the continuous wavelet transform in periodic error compensation [J]. Precision Engineering, 2016, 44: 245-251.
- [14] Fu H J, Wang Y, Hu P C, et al. Real-time compensation of nonlinearity in heterodyne interferometers based on quadrature demodulation and extremum operation[J]. Optical Engineering, 2020, 59(4): 044101.
- [15] Wang C, Burnham-Fay E D, Ellis J D. Real-time FPGA-based Kalman filter for constant and non-constant velocity periodic error correction[J]. Precision Engineering, 2017, 48: 133-143.
- [16] Xie J D, Yan L P, Chen B Y, et al. Iterative compensation of nonlinear error of heterodyne interferometer [J]. Optics Express, 2017, 25(4): 4470-4482.
- [17] 乐燕芬, 句爱松. 外差激光干涉仪非线性误差分析及测量[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 209-218.
- [18] He J, Wang L, Li F, et al. An ameliorated phase generated carrier demodulation algorithm with low harmonic distortion and high stability [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3258-3265.
- [19] Zhang S H, Chen Y P, Chen B Y, et al. A PGC-DCDM demodulation scheme insensitive to phase modulation depth and carrier phase delay in an EOM-based SPM interferometer[J]. Optics Communications, 2020, 474: 126183.

(责任编辑:康 锋)