

引用格式: JIANG Yichao, GU Shaojie, ZHANG Gang, et al. Improved Phase Generated Carrier Demodulation Algorithm for Laser Vibration Measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(1):0114005

蒋翌超, 顾劭傑, 张刚, 等. 面向激光测振应用的改进相位生成载波解调算法[J]. 光子学报, 2024, 53(1):0114005

面向激光测振应用的改进相位生成载波解调算法

蒋翌超¹, 顾劭傑¹, 张刚², 许林广², 葛强², 吴许强³, 俞本立³

(1 安徽工程大学 电气工程学院, 芜湖 241000)

(2 安徽工程大学 数理与金融学院, 芜湖 241000)

(3 安徽大学 信息材料与智能感知安徽省实验室, 合肥 230601)

摘要:为了解决相位生成载波解调方案应用于激光测振技术时,系统中存在的非线性失真问题,提出一种改进相位生成载波解调算法。该算法采用低频、大幅值的相位调制和迭代重加权椭圆特殊拟合对两路含有非线性误差的正交信号进行校正以抑制非线性失真。其中,低频相位调制由三角波信号驱动压电换能器生成,确保小信号情况下椭圆拟合结果的准确性。迭代重加权椭圆特殊拟合可以减小离群数据的影响并避免拟合结果退化为双曲线,具有精度高、鲁棒性好和计算效率高的优点。实验结果表明改进相位生成载波解调算法可以有效抑制激光测振实验系统的非线性失真,在不同相位调制深度(0.8~3.4 rad)下解调信号的信纳比和总谐波失真稳定,对应的标准差分别为 0.55 dB 和 0.03%。系统的响应线性度优于 99.99%,动态范围可达 103.9 dB @ 500 Hz,总谐波失真为 1%且工作频宽为 20~8 000 Hz。与传统相位生成载波解调方案相比,该算法不仅显著抑制了非线性失真,还克服了椭圆拟合算法在小信号下无法工作的缺点。

关键词:激光测振技术;相位生成载波解调算法;低频调制;迭代重加权椭圆特殊拟合;非线性失真

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20245301.0114005

0 引言

激光相干测振技术具有测量精度高、非接触测量和动态范围大等优点^[1],在引力波探测、发动机诊断、语音监听和结构安全监测等领域得到了应用^[2-4]。该技术将被测物体的振动信号转化成激光干涉仪的相位变化,利用光电探测器将干涉光的光强变化转化为电信号,然后进行相位解调处理,进而提取出相位变化,获得振动信息。相位解调方案是激光相干测振技术的核心技术之一,主要包括零差解调和外差解调两种方案类型。在零差解调方案类型中,美国海军实验室 DANDRIDGE A 等^[5]首次提出的相位生成载波(Phase Generated Carrier, PGC)解调方案具有灵敏度高、动态范围大、线性度高和硬件开销小等优点,已成为最常用的解调技术之一^[6]。但是在 PGC 解调方案中,光强扰动、载波相位延迟、相位调制深度(C 值)偏差和器件的非理想性能会引起非线性误差,影响解调方案的稳定性和准确性。因此,在激光相干测振应用中迫切需要一种可以抑制非线性失真的 PGC 解调算法。

PGC 解调方案主要采用微分交叉相乘法(Differential and Cross Multiplying, DCM)和反正切法(Arctangent, Arctan)对正交信号中的相位变化进行提取。PGC-DCM 解调方案对 C 值偏差和载波相位延迟不敏感,但易

基金项目:安徽省高校自然科学基金项目(No. 2022AH050964),安徽工程大学引进人才科研启动基金项目(Nos. 2021YQQ057, 2022YQQ098),信息材料与智能感知安徽省实验室开放课题(Nos. IMIS202104, IMIS202212),国家自然科学基金(No. 51627804),国家级大学生创新创业训练项目(No. 202210363096)

第一作者:蒋翌超,jiang_yichao@foxmail.com

通讯作者:张刚,zg211987@163.com

收稿日期:2023-05-22;**录用日期:**2023-08-14

<http://www.photon.ac.cn>

受光强扰动的影响。相比之下,PGC-Arctan解调方案可以克服光强扰动的影响,但易受C值偏差和载波相位延迟的影响。当C值偏离2.63 rad或存在载波相位延迟时,解调出的信号会存在严重的谐波失真,甚至会出现相位解调失败情况。为了消除非线性失真,许多学者对PGC解调算法进行了改进研究。CHEN Benyong等^[7]提出了一种融合了PGC-Arctan和PGC-DCM两种方案的主动线性PGC解调算法,可以有效消除C值波动和相位载波延迟引起的非线性失真,但是系统较为复杂。常天英团队^[8-9]在PGC-DCM解调算法的基础上引入了微分自相乘和除法器,消除了光强扰动的影响。NIKITENKO A N等^[10]对PGC-Arctan解调算法进行了改进,引入了载波相位延迟补偿模块,可以消除载波相位延迟引起的非线性失真。孙抗等^[11]在PGC-Arctan解调算法中加入了微分自相除、相除和开方运算,消除了C值偏差引起的非线性失真。但是,以上算法均无法同时消除所有因素引起的非线性失真。近年来,由于椭圆拟合算法可以同时消除各种因素引起的非线性失真,被越来越多地应用于相位解调方案以改善系统的性能^[12-17]。POZAR T等^[12]提出将椭圆特殊拟合算法应用于零差正交激光干涉仪以抑制系统的非线性失真,该算法计算效率高且输出的参数不会给出损坏的、非椭圆的二次曲线。严利平等^[13]利用基于卡尔曼滤波的椭圆拟合算法对PGC解调中正交分量的幅值和偏置进行最优估计和修正,减小了正弦相位调制激光干涉仪的非线性误差。畅楠琪等^[14]提出了一种基于扩展卡尔曼滤波参数估计的PGC解调方案,总谐波失真降低了19.25 dB,信噪谐波比提高了17.16 dB,系统性能显著提升。QU Zhiyu等^[15]使用基于最小二乘法的椭圆拟合算法和比例、积分和微分闭环控制模块对PGC解调进行了改进,不仅保证系统工作在最佳相位调制深度,还进一步抑制了系统的非线性失真,输出信号的信纳比可以达到61.57 dB。HOU Changbo等^[16]利用高斯-牛顿迭代实现的椭圆拟合改进了PGC解调算法,该算法具有良好的抗噪声和抗伴生调制能力,输出信号的信纳比波动小于3 dB。程坤等^[17]将时分复用与椭圆拟合参考补偿技术应用于PGC解调方案,实现了高分辨率的静态应变传感。然而,在被测信号幅值较小的情况下,以上改进相位解算法中的椭圆拟合均无法正常工作,甚至会导致解调失败,这限制了算法的小信号解调能力和鲁棒性。

本文提出一种面向激光测振应用的改进PGC解调算法,该算法使用迭代重加权优化技术提高椭圆特殊拟合的精度,减小离群数据的影响。而椭圆特殊拟合是在直接最小二乘法的基础上引入椭圆约束矩阵以避免拟合结果退化为双曲线的算法,鲁棒性好,计算效率高。此外,通过低频三角波驱动压电换能器引入低频相位调制,确保在小信号情况下椭圆拟合结果的准确性,克服传统椭圆拟合算法的缺点。经过混频和低通滤波后的两路含有非线性误差的正交信号,经迭代重加权椭圆特殊拟合算法处理后被校正为一对完全正交的信号,可以显著抑制解调信号中的非线性失真。

1 原理与仿真

1.1 基本原理

面向激光测振应用的改进PGC解调算法如图1所示,算法在高频载波调制信号上加一个低频三角波调制信号,经数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)输出后作用在压电换能器(Piezoelectric Transducer, PZT) 2上而促动反射镜M2,进而额外引入一个低频、大幅值的相位变化。与此同时,外部激励通过驱动PZT1引起反射镜M1的振动,进而模拟待测的振动信号。迈克尔逊干涉仪输出的干涉光被光电探测器(Photodetector, PD)转化为电压信号并被模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)采集,采集到的信号被送入改进PGC解调算法,经过乘法器(Multiplier, MUL)、低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)、迭代重加权椭圆特殊拟合、DCM和高通滤波器(High Pass Filter, HPF)处理后,最终输出与激励信号线性相关的期望信号 $\varphi_1(t)$ 。

激光干涉仪输出的干涉光被PD探测后,输出的信号可以表示为^[18]

$$I(t) = A + B \cos [C \cos(\omega_0 t + \theta) + \varphi(t)] \quad (1)$$

式中,A和B是与输入激光功率相关的常数,此外,B还与激光干涉仪的混合效率相关;C是载波调制深度, ω_0 是载波频率, θ 是载波相位延迟; $\varphi(t) = \varphi_1(t) + \varphi_m(t) + \varphi(t)$,包括与振动信号线性相关的期望信号 $\varphi_1(t)$,低频调制引起的相位变化 $\varphi_m(t)$ 和环境扰动 $\varphi(t)$ 。

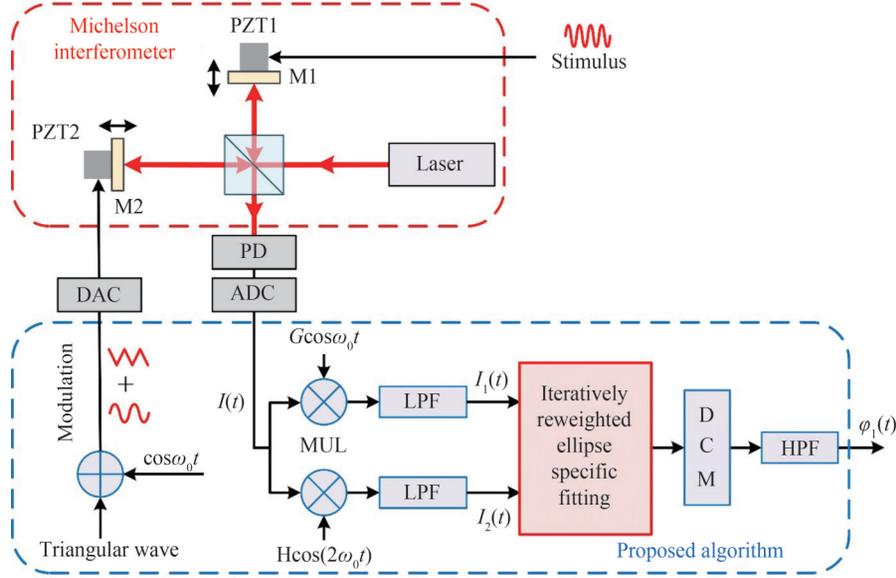


图1 面向激光测振应用的改进PGC解调算法的示意图

Fig. 1 Schematic of the improved PGC demodulation algorithm for laser vibrometers

ADC采集到的干涉信号被分成两路,分别与幅值为 G 的基频信号和幅值为 H 的倍频信号混频,然后经LPF低通滤波后,得到一对正交信号,即^[19]

$$\begin{cases} I_1(t) = \text{LPF} [I(t) \times G \cdot \cos \omega_0 t] = -BG \cos \theta J_1(C) \sin \varphi(t) \\ I_2(t) = \text{LPF} [I(t) \times H \cdot \cos 2\omega_0 t] = -BH \cos 2\theta J_2(C) \cos \varphi(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $J_1(C)$ 和 $J_2(C)$ 分别是一阶贝塞尔函数和二阶贝塞尔函数。

由于光强扰动、相位载波延迟、电子元器件的噪声以及 C 值偏差等非线性因素的存在,式(2)可以改写为^[20]

$$\begin{cases} I_1(t) = h + a \cos \varphi(t) \\ I_2(t) = k + b \cos [\varphi(t) - \delta] \end{cases} \quad (3)$$

式中, h 和 k 是直流偏置, a 和 b 是交流幅值, δ 是 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 之间的相位差。

经过混频和低通滤波而获得的两路正交信号的李萨如图通常是一个椭圆弧,可以拟合为一个椭圆。以 x 、 y 代替 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$,椭圆方程的一般式可表示为^[21]

$$A_1 x^2 + 2B_1 xy + C_1 y^2 + 2D_1 x + 2E_1 y + F_1 = 0 \quad (4)$$

式中, A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 和 F_1 是椭圆拟合参数。对ADC采集的 N 组 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 的数据点进行椭圆拟合,拟合得到的目标函数可以用向量内积形式表示^[22]

$$(\xi, \theta) = A_1 x^2 + 2B_1 xy + C_1 y^2 + 2D_1 x + 2E_1 y + F_1 = 0 \quad (5)$$

式中,矩阵 $\xi = [x^2, xy, y^2, 2x, 2y, 1]^T$,向量 $\theta = [A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1]^T$ 。

定义 6×6 矩阵 $M = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^N \xi_a \xi_a^T$,引入拉格朗日乘子 λ 以求解特征向量问题。由于最小二乘法的椭圆拟合容易退化为双曲线,所以为了保证式(5)为椭圆,施加椭圆约束条件 $4A_1 C_1 - B_1^2 = 1$ 以约束椭圆拟合结果。将求解特征向量方程 $W_a \cdot M \cdot \theta = \lambda \cdot D \cdot \theta$ 写成矩阵形式为^[23]

$$W_a \cdot M \cdot \theta = \lambda \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \theta \quad (6)$$

式中, D 为 6×6 的椭圆约束矩阵, 令初始权重 $W_a = 1$, $\theta_0 = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$, 求解式(6)可以得到广义特征向量 θ , 即为椭圆特殊拟合算法的解。

迭代重加权椭圆特殊拟合算法将椭圆特殊拟合算法的解 θ 作为下次迭代的输入, 比较 θ 和 θ_0 , 若两次解的差值大于设置的阈值, 则将 θ 值赋给 θ_0 , 更新权重, 然后求解更新后的式(6)。特征向量 θ_0 和更新之后的权重 W_a 可以表示为^[20]

$$\begin{cases} W_a \leftarrow \frac{1}{(\theta, V_0[\xi_a]\theta)} \\ \theta_0 \leftarrow \theta \end{cases} \quad (7)$$

式中, $V_0[\xi_a]$ 为 ξ_a 的协方差矩阵, 含有数据点的噪声信息。数据点的噪声越大, 点乘的结果也越大, 相应的倒数则越小。在迭代过程中, 高噪声点的权重逐渐减小, 降低了噪声对椭圆拟合结果的影响。若两次解的差值小于设置的阈值, 则停止迭代, 返回迭代重加权椭圆特殊拟合的解 θ 。迭代重加权椭圆特殊拟合算法是在椭圆特殊拟合算法的基础上结合了迭代重加权优化技术, 其初始解是椭圆特殊拟合算法的解, 然后进行迭代优化。

将式(4)中正交信号的参数 h, k, a, b 和 δ 用迭代重加权求解得出的返回特征向量 θ 的参数表示为^[19]

$$\begin{cases} h = (C_1 \cdot D_1 - B_1 \cdot E_1) / (B_1^2 - C_1) \\ k = (E_1 - B_1 \cdot D_1) / (B_1^2 - C_1) \\ a = \left(\frac{A_1 \cdot C_1 \cdot h^2 + C_1 \cdot k^2 + 2B_1 \cdot C_1 \cdot h \cdot k - C_1 \cdot F_1}{A_1 \cdot C_1 - B_1^2} \right)^{1/2} \\ b = (A_1 \cdot a^2 / C_1)^{1/2} \\ \delta = \arccos[-B_1 / (A_1 \cdot C_1)^{1/2}] \end{cases} \quad (8)$$

接着, 用式(8)计算得到的参数 h, k, a, b 和 δ 对正交信号 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 进行校正, 得到一对新的正交信号, 即^[22]

$$\begin{cases} I_1'(t) = \cos \varphi(t) = \frac{I_1(t) - h}{a} \\ I_2'(t) = \sin \varphi(t) = \left[\frac{I_2(t) - k}{b} - \cos \varphi(t) \cos \delta \right] / \sin \delta \end{cases} \quad (9)$$

最后, 使用微分交叉相乘法(DCM)对校正后的正交信号进行处理并经过高通滤波器滤除低频调制信号和环境干扰, 即可得到期望信号 $\varphi_1(t)$ 。

1.2 算法仿真

为了验证提出的迭代重加权椭圆特殊拟合算法的性能, 使用MATLAB软件进行仿真。令 $I_1(t) = 3\cos\varphi(t)$, $I_2(t) = 2\cos[\varphi(t) - \pi/2]$, 然后在数据中加入高斯噪声以模拟式(3)中的正交信号。其中, $\varphi(t)$ 是一个频率为 1 kHz 的正弦波信号, 当 $\varphi(t)$ 幅值分别为 $\pi/4$ 和 $\pi/2$ 时, 正交信号对应的李萨如图分别为 1/4 弧长和 1/2 弧长。椭圆特殊拟合算法使用式(5)和(6)对数据进行拟合(每个数据点的权重 $W_a = 1$), 迭代重加权椭圆特殊拟合算法使用式(5)、(6)和(7)对数据进行拟合。两种算法求得的解 θ 是椭圆方程的参数, 代入式(5)即可得到拟合椭圆, 拟合结果如图 2 所示。在添加 $\sigma = 0.02$ 的高斯噪声情况下, 两种算法对 1/4 弧长和 1/2 弧长的数据拟合结果如图 2(a) 和 (b) 所示; 在添加 $\sigma = 0.05$ 的高斯噪声情况下, 两种算法对 1/4 弧长和 1/2 弧长的数据拟合结果如图 2(c) 和 (d) 所示。根据两种算法拟合出的椭圆和真实椭圆的偏差来判断更优的算法。由图 2 可知: 信号 $\varphi(t)$ 的幅值越大, 李萨如图的弧长越大, 两种算法拟合得到的椭圆与真实椭圆相差越小, 但迭代重加权椭圆特殊拟合算法的拟合结果优于椭圆特殊拟合算法的拟合结果。高斯噪声越大, 迭代重加权椭圆特殊拟合算法的拟合结果越优。此外, 迭代重加权椭圆特殊拟合算法迭代 3 至 4 次即可得到收敛结果。

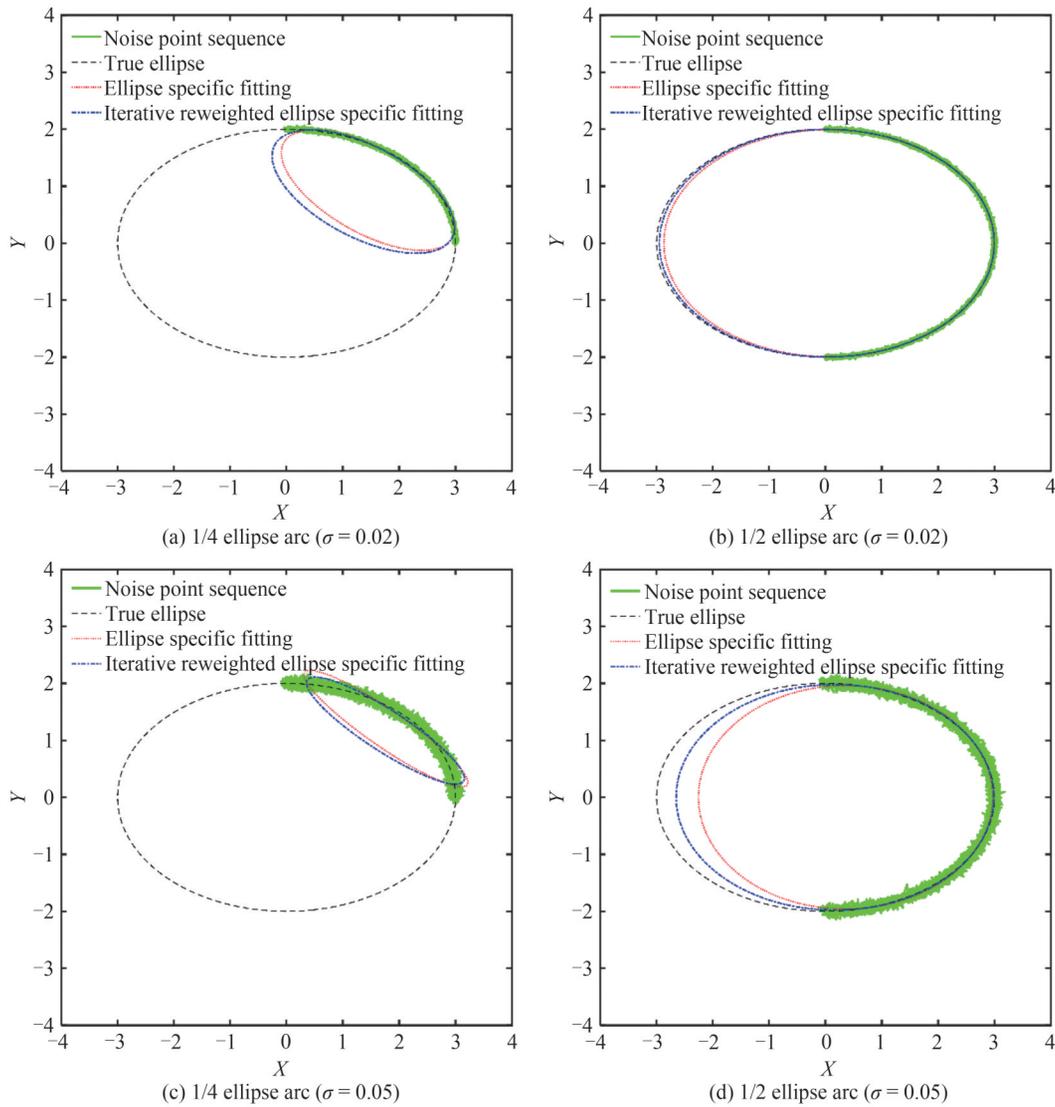


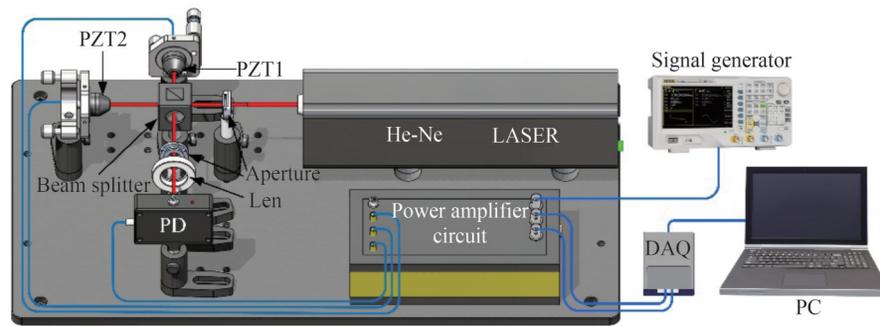
图2 两种算法对模拟数据的拟合结果

Fig. 2 Fitting results of the two algorithms for the simulated data

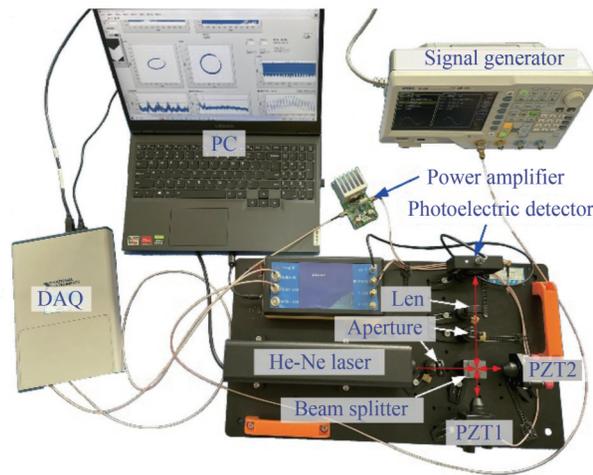
2 实验装置与结果

2.1 实验装置

实验装置如图3所示,主要由氦氖激光器(He-Ne laser)、迈克尔逊干涉仪、PD、数据采集卡(Data Acquisition, DAQ)、信号发生器(Signal generator)、功率放大电路(Power amplifier circuit)和写入解调算法的计算机(Personal Computer, PC)组成。迈克尔逊干涉仪由光阑(Aperture)、分光棱镜(Beam splitter)、聚焦透镜(Len)和两个顶部安装有反射镜的PZT组成,其中光阑用于控制光束直径和消除杂散光对干涉光的影响,分光棱镜用于将入射激光分成光强相等的反射和透射激光,聚焦透镜用于将干涉光汇聚于PD的探测窗口。氦氖激光器出射的激光经过光阑后被分光棱镜分成两束,分别到达安装在PZT1和PZT2顶端的反射镜后被反射回来。改进PGC解调算法利用计算机控制DAQ(NI USB 6363)中的DAC输出一个包含1 Hz三角波和20 kHz载波的复合调制信号,信号发生器(Rigol DG4202)输出一个正弦激励信号,功率放大电路用于放大调制信号和激励信号的电压幅值,从而驱动PZT以产生振动。调制信号经功率放大电路放大了100倍用于驱动PZT2,以产生低频相位调制和高频相位载波。正弦激励信号经功率放大电路放大了10倍用于驱动PZT1,以模拟激光测振仪的待测信号。调制后的两束反射激光再次汇聚在分光棱镜处并发生干涉,最后干涉光经过光阑和聚焦透镜到达PD。PD探测到的干涉光强被DAQ中的ADC采集并送入计算机,经基于LabVIEW软件编写的解调程序处理而得到解调信号。



(a) Schematic of experimental setup



(b) Picture of experimental setup

图3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

2.2 实验结果

2.2.1 低频调制幅值和算法影响

在不对PZT1施加激励信号的情况下,设置DAQ输出的载波电压幅值为0.16 V,根据文献[5]可知,通过椭圆拟合输出的参数可以计算出此时的相位调制深度(C 值)为1.9 rad。调节1 Hz三角波信号的幅值,不同低频调制(Low Frequency Modulation, LFM)幅值下混频滤波后的正交信号的李萨如图如图4所示。当LFM的幅值分别为0.035 V、0.085 V、0.013 5 V和0.185 V时,正交信号合成的李萨如图约为四分之一椭圆、二分之一椭圆、四分之三椭圆和整个椭圆。从图4可以看出,改变低频三角波的调制电压幅值可以有效引入不同大小的相位变化幅值,使正交信号合成的李萨如图的椭圆弧长发生改变,进而确保椭圆拟合结果的准确性。

使用信号发生器对PZT1施加一个频率为1 kHz、幅值为100 mV的正弦激励信号,与此同时,将LFM的电压幅值设置为0.185 V。ADC采集到的干涉信号如图5所示,图5(a)是干涉信号的时域波形图,干涉信号的最大电压为2.41 V,最小电压为0.12 V,根据 $(V_{\max} - V_{\min}) / (V_{\max} + V_{\min})$ 可以算出迈克尔逊干涉仪的条纹衬比度为0.91,具有较好的干涉效率;图5(b)是干涉信号的频谱图,从图中可以清晰地看出待测信号被转换到了载波(20 kHz)及倍频(40 kHz)的两侧边带上,与低频噪声实现了分离。

接着,干涉信号分别与基频信号和倍频信号进行混频,然后经LPF低通滤波后得到一对正交信号 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$,它们的时域波形如图6所示。从图6可以明显看出,这对信号的直流偏置 h 和 k 不为零且交流幅值 a 和 b 也不相等,在信号中存在非线性误差。

在不同LFM幅值的情况下,分别对正交信号 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 进行迭代重加权椭圆特殊拟合,其原始李萨如图和拟合后的李萨如图如图7所示。图7(a)显示此时LFM的幅值为0 V,拟合前正交信号的李萨如图是一小段椭圆弧,说明待测信号的幅值较小;拟合后的李萨如图与标准圆有较明显的偏差,这是在小信号情况下

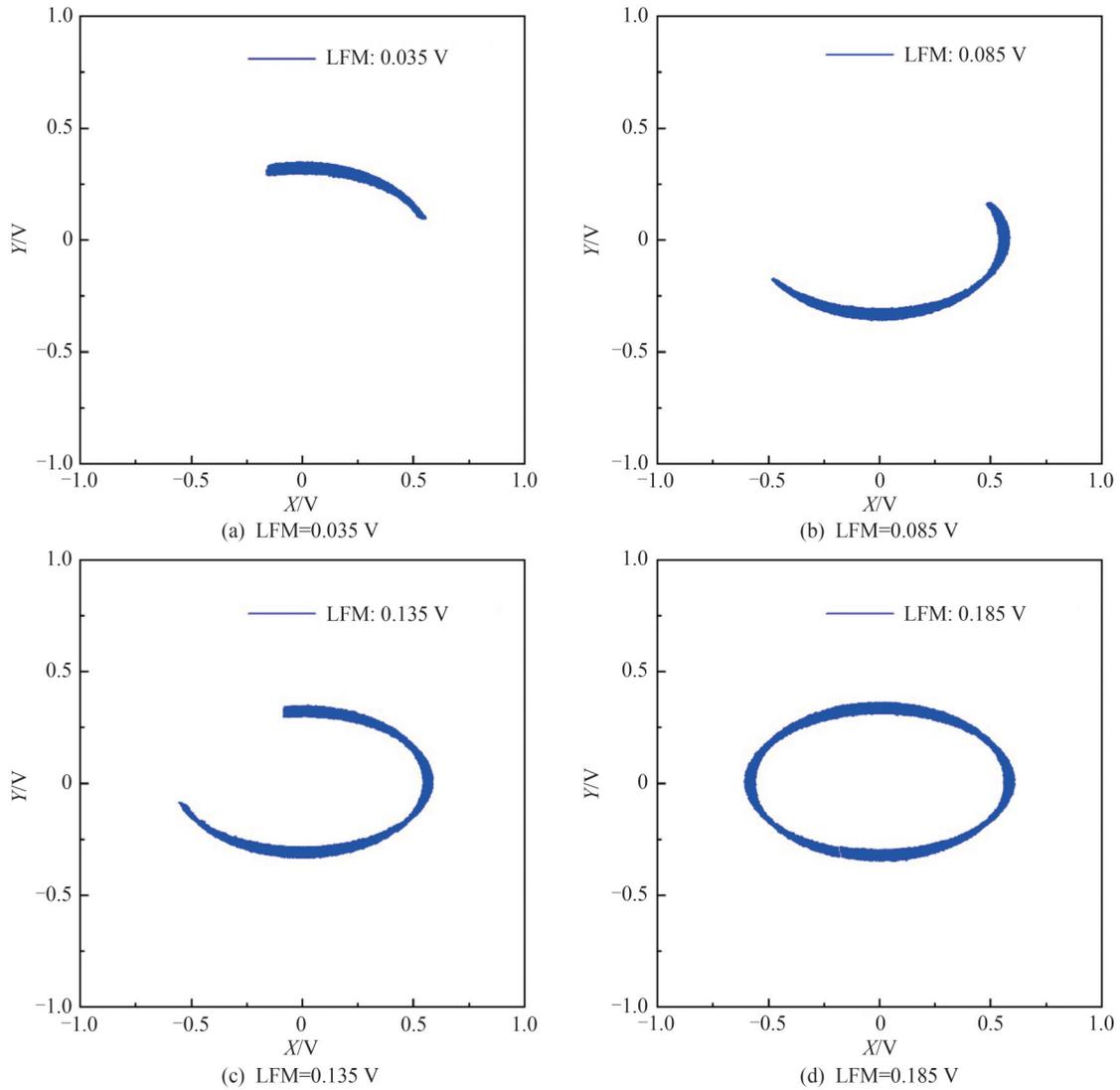


图4 不同低频调制幅值下的李萨如图

Fig. 4 Lissajous figures under different amplitudes of the LFM

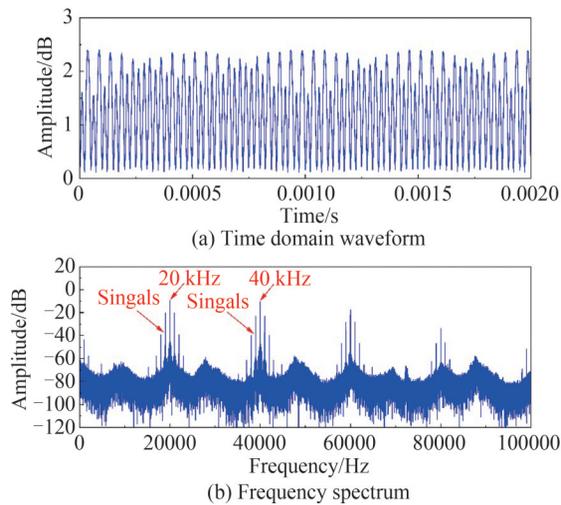


图5 PD探测的干涉光对应的电压信号的波形和频谱

Fig. 5 Waveform and spectrum of the voltage signal corresponding to interference light detected by PD

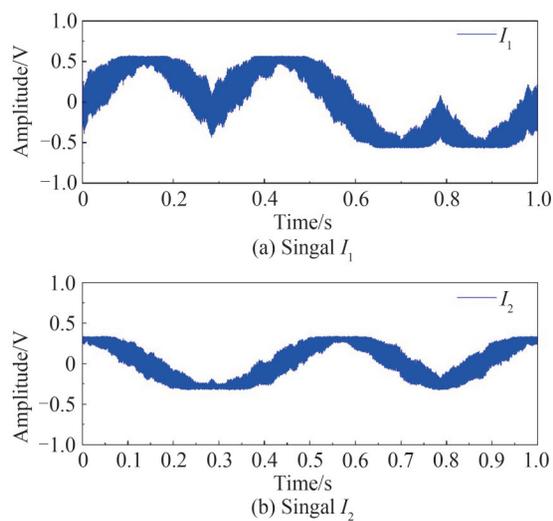


图6 低通滤波后两路正交信号的时域波形
Fig. 6 Time domain waveform of two quadrature signals after low pass filtering

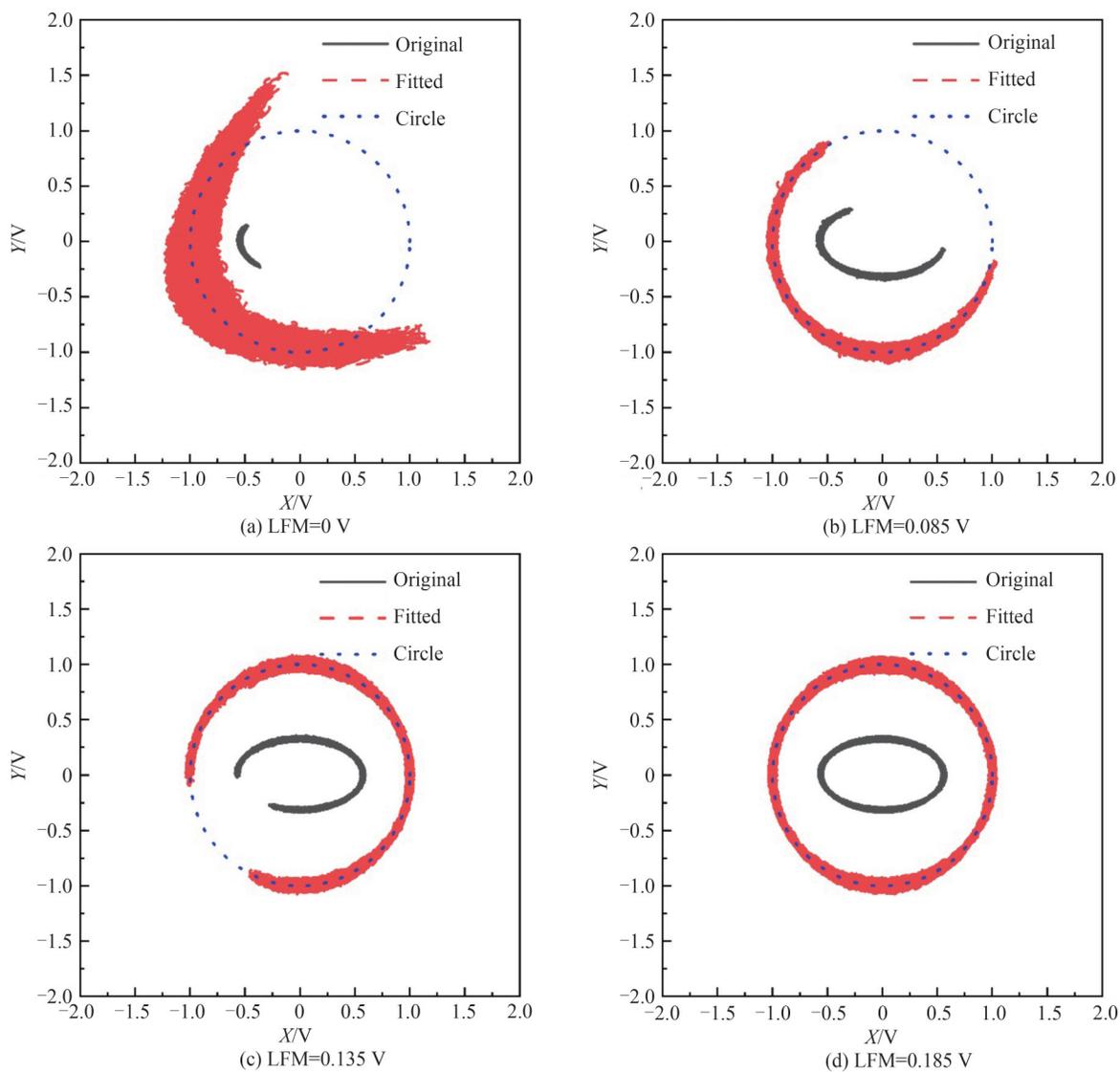


图7 不同低频调制幅值下椭圆拟合前后的李萨如图
Fig. 7 Lissajous figures before and after ellipse fitting under different LFM

椭圆拟合结果不精确而导致的结果;虽然有偏差,但是迭代重加权椭圆特殊拟合总会输出一组最优的椭圆拟合参数,不会出现解调失败的情况,算法的健壮性强。图7(b)~(d)显示迭代重加权椭圆特殊拟合前后正交信号的李萨如图,由于不同幅值LFM的存在,迭代重加权椭圆特殊拟合校正后圆弧的弧度大小不一,但它们都与幅值为1 V的标准圆重叠,拟合结果具有较高的精确度。

迭代重加权椭圆特殊拟合算法校正后的正交信号被送入DCM和HPF,输出解调信号的频谱如图8所示。从图8可以看出在无LFM的情况下,解调信号存在明显非线性失真,其信纳比(Signal to Noise and Distortion Ratio, SINAD)和总谐波失真(Total Harmonics Distortion, THD)分别为27.49 dB和3.88%;加入LFM后,当LFM幅值分别为0.085 V、0.135 V和0.185 V时,改进PGC解调算法输出解调信号的SINAD和THD分别为41.66 dB和0.600%,41.60 dB和0.593%,和42.45 dB和0.535%。从实验结果可知,LFM的加入可以有效改善解调算法的性能,但当正交信号原始李萨如图的图形大于半个椭圆后,SINAD和THD相差不大。因此,LFM的电压幅值可以设置在0.085~0.185 V范围内,在后续实验中,LFM的幅值被设置为0.135 V。

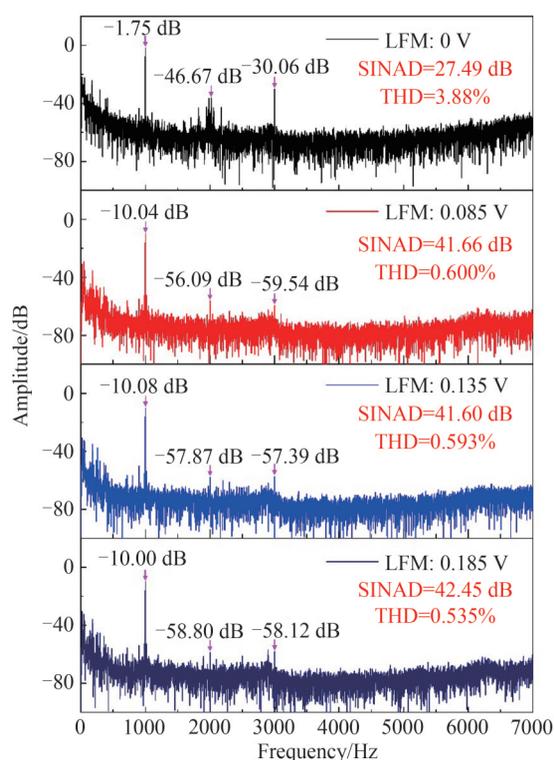


图8 在100 mV激励幅值、不同低频调制幅值下解调信号的频谱

Fig. 8 Spectra of demodulated signals under the stimulating amplitude of 100 mV and different amplitudes of LFM

保持PZT1的激励电压为100 mV,基于椭圆特殊拟合和迭代重加权椭圆特殊拟合的两种改进PGC解调算法的输出信号的频谱如图9所示。由于LFM的幅值为0.135 V,此时正交信号的李萨如图大于半个椭圆,两种椭圆拟合算法的拟合结果均具有较高的精度。但迭代重加权椭圆特殊拟合算法是在椭圆特殊拟合算法的基础上使用迭代重加权优化技术减小了高噪声点的权重,减小了噪声对椭圆拟合结果的影响,具有更高的精度,进而可以更好地抑制非线性失真。从图9可以看出:基于迭代重加权椭圆特殊拟合的PGC解调算法输出信号的SINAD和THD均优于基于椭圆特殊拟合的PGC解调算法,分别提升了1.99 dB和0.27%,与仿真结果相符。

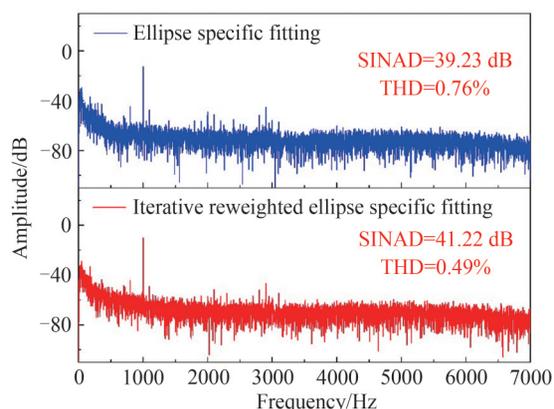


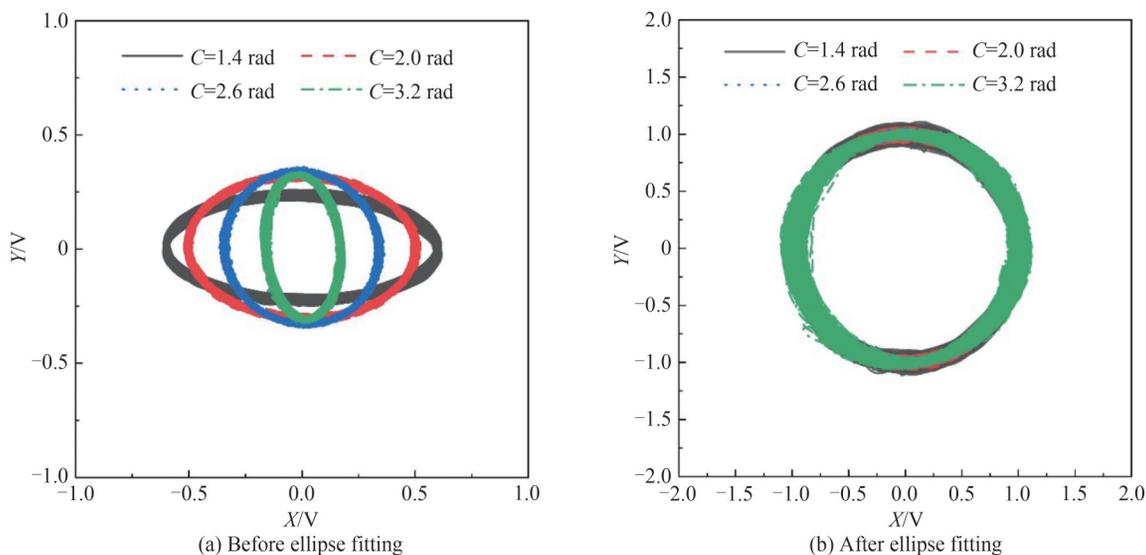
图9 两种算法的解调信号频谱对比

Fig. 9 Spectrum comparison of demodulated signals of two algorithms

2.2.2 解调信号稳定性测试

载波调制幅值直接和 C 值线性相关, PGC-Arctan 解调算法受 C 值偏差影响显著, 当 C 值偏离最佳值 2.63 rad 时, 正交信号的交流幅值会不相等, 其李萨如图会由正圆变为椭圆, 进而导致解调结果中出现严重的谐波失真^[8]。从式(2)可知, 相位载波延迟也影响着正交信号的交流幅值, 从而影响解调结果。利用迭代重加权椭圆特殊拟合实时对正交信号的幅值进行归一化, 消除 C 值偏差和相位载波延迟等对解调结果的影响。此外, 还采取了 DCM 方法从校正后的正交信号中提取期望信号, 使得算法对正交信号交流幅值的波动更加不敏感。将信号发生器的激励信号幅值从 100 mV 增加到 400 mV。接着, 调整载波调制信号的幅值, 以 0.2 rad 为间隔逐渐增大 C 值, 使其由 0.8 rad 增大至 3.4 rad。不同 C 值下正交信号的李萨如图和拟合校正后正交信号的李萨如图如图 10 所示。图 10(a) 是正交信号 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 的原始李萨如图, 此时 C 值分别为 1.4 rad、2.0 rad、2.6 rad 和 3.2 rad, 随着 C 值增加, 李萨如图由椭圆变为正圆, 然后再变为椭圆; 从图中也可以看到当 C 值为 3.2 rad 时, 椭圆向左侧倾斜, 表明两路信号的相位差不是严格的 $\pi/2$ 。图 10(b) 是经过迭代重加权椭圆特殊拟合算法校正后的李萨如图, 由图可以看出不同 C 值下的李萨如图均被校正为一个完整的正圆, 这说明正交信号的直流偏置被消除, 交流幅值被归一化, 相位差被校正为 $\pi/2$ 。实验结果表明: 迭代重加权椭圆特殊拟合算法可以有效消除正交信号中由于 C 值偏差和相位延迟引起的非线性误差。

不同 C 值下输出的解调信号的正交信号的李萨如图如图 11 所示。改进 PGC 解调算法在不同 C 值下 SINAD 的平均值为 42.99 dB, 对应的标准差为 0.55 dB; THD 的平均值为 0.44%, 对应的标准差为 0.03%。

图10 不同 C 值下正交信号的李萨如图Fig. 10 Lissajous figures of the quadrature signals with different C values

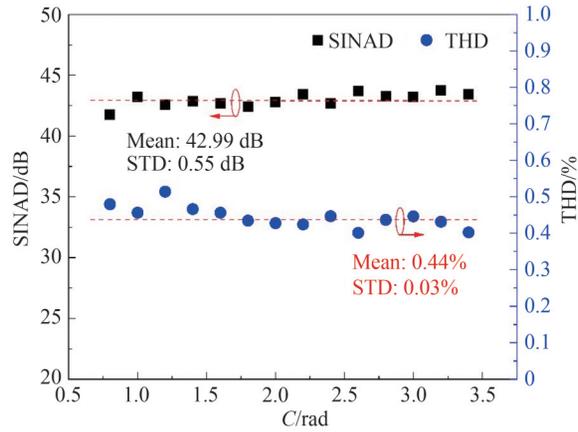


图 11 不同 C 值下解调信号的 SINAD 和 THD

Fig. 11 SINAD and THD of demodulated signal under different C values

实验结果表明:提出的改进 PGC 解调方案具有优秀的稳定性,可以有效消除 C 值偏移和载波相位延迟的影响,在 $0.8\sim 3.4$ rad 的 C 值范围内, SINAD 和 THD 波动很小。

2.2.3 动态范围、频率响应和振动信号实测

设置载波信号幅值和 LFM 幅值分别为 0.16 V 和 0.135 V,使用 500 Hz 的正弦激励电压调制 PZT1,电压幅值由 5 mV 逐渐增大直至解调信号的总谐波失真(THD)达到 1% 。当激励电压幅值为 700 mV 时,输出解调信号的 THD 达到 1.00% 。系统的响应结果如图 12 所示,图 12(a)为系统输出的解调相位幅值对激励电压幅值的响应,响应线性度为 99.991% 。此后关闭激励电压,在没有任何激励信号的情形下系统输出信号的

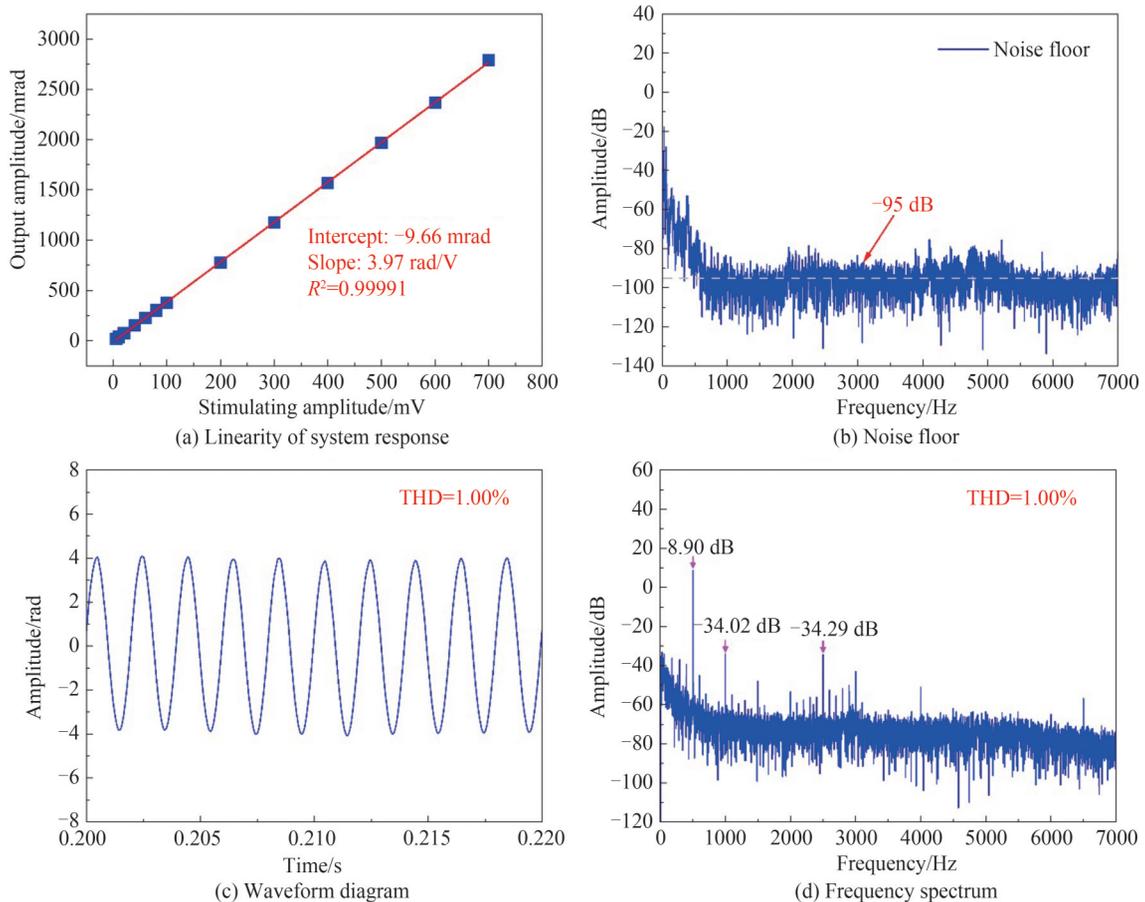


图 12 系统的响应线性度、底噪及 $\text{THD}=1.00\%$ 情况下解调信号的波形和频谱

Fig. 12 Response linearity and noise floor of the system and waveform and spectrum diagrams of the demodulated signal when $\text{THD}=1\%$

频谱如图 12(b)所示,系统的底噪约为 $-95 \text{ dB re rad}/\sqrt{\text{Hz}}$,对应的系统最小可检测位移为 0.9 pm 。图 12(c)和(d)是系统输出解调信号的波形和频谱,此时解调信号的 THD 为 1% , 500 Hz 处的电压幅值为 8.90 dB 。综上可得该激光测振实验系统的动态范围为 $103.90 \text{ dB @ } 500 \text{ Hz \& THD}=1\%$ 。

在载波频率为 20 kHz 的 PGC 解调系统中,理论最大可探测信号的频率为 10 kHz 。为了防止信号混叠,将信号的最大可探测频率设计为 8 kHz ,因此 LPF 的截至频率设置为 8 kHz 。考虑到系统中 HPF 的截止频率为 20 Hz ,系统可探测信号的频率范围为 $20 \sim 8000 \text{ Hz}$ 。设置载波信号幅值、LFM 幅值和 PZT1 上激励信号幅值分别为 0.16 V 、 0.135 V 和 100 mV ,调节 PZT1 上激励信号的频率并记录下解调信号的幅值,实验结果如图 13 所示。由图可知:在 $1000 \sim 6000 \text{ Hz}$ 的频率范围内系统的输出幅值波动较小;在 $6000 \sim 8000 \text{ Hz}$ 的频率范围内,由于受到 LPF 过渡带的影响,系统的输出幅值有较小的下降。此外,对两种椭圆拟合算法的运行时间进行了 800 次连续测试,它们运行时间的均值分别为 0.010 s 和 0.031 s ,与仿真结果中的迭代次数基本相符。迭代重加权椭圆特殊拟合算法虽然延长了计算时间,但是 0.021 s 的延时对信号的实时解调影响不大,仍能满足动态信号的解调需求。

关闭驱动 PZT1 的激励电压,先后对 M1 施加振动信号 1 和振动信号 2,系统解调出信号的波形和频谱如图 14 所示。对比图 14(a)和(b)中解调信号的波形,可以看出两个振动信号存在明显差异,振动信号 1 的幅

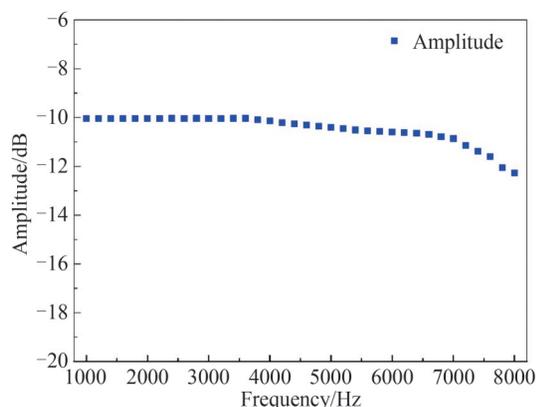


图 13 系统输出幅值的频率响应

Fig. 13 Frequency response of the system's output amplitude

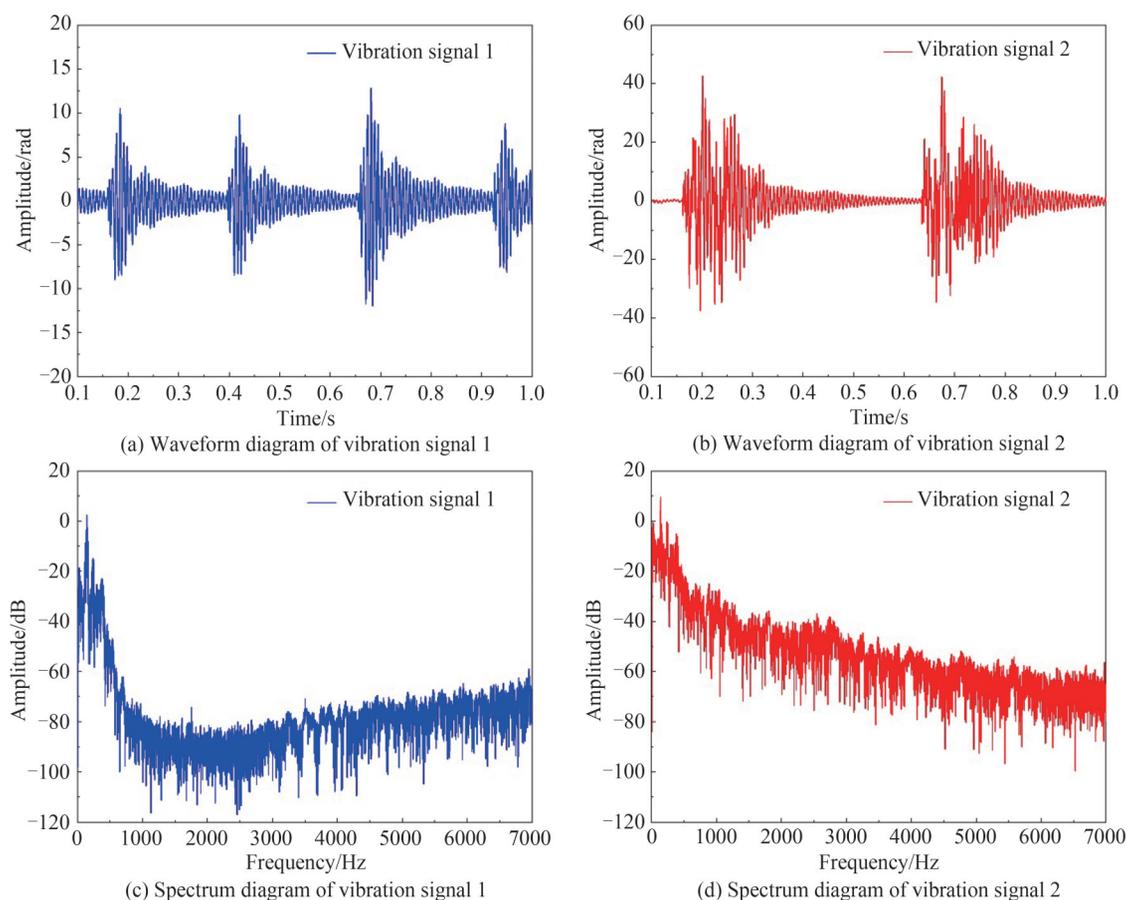


图 14 系统解调出的两种振动信号的波形和频谱

Fig. 14 Waveform and spectrum diagrams of the two demodulated vibration signals of the system

值和周期小于振动信号2的幅值和周期。对比图14(c)和(d)中解调信号的频谱,可以发现振动信号1包含更多的高频成分而振动信号2存在较多的低频成分。实验结果表明,提出的改进PGC解调算法结合低频调制和迭代重加权椭圆特殊拟合算法消除了正交信号中的非线性误差,提高了系统响应的稳定性、线性度和动态范围,具备解调不同幅值和频率的振动信号的能力,可以较好地恢复出振动信号。

3 结论

本文提出了一种面向激光测振应用的改进PGC解调算法,利用低频调制技术和迭代重加权椭圆特殊拟合算法改善PGC解调算法的性能。低频调制的加入确保了算法在小信号场景下正常工作,迭代重加权椭圆特殊拟合算法减小离群数据对椭圆拟合结果的影响,提高了椭圆特殊拟合的准确度。实验结果表明:低频调制电压大于0.085 V可以有效保证拟合结果的准确性;改进的PGC解调算法在不同C值下(0.8~3.4 rad)测得的平均SINAD和THD分别为42.99 dB和0.44%,对应的标准差分别为0.55 dB和0.03%,输出解调信号具有高稳定性;激光测振实验系统的响应线性度优于99.99%且动态范围达到了103.90 dB @ 500 Hz & THD=1%。提出的改进PGC解调算法精度高、鲁棒性强且计算效率高,在激光测振领域具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] ZHANG Lieshan, LI Rongsen, LAN Yicheng, et al. Detection of solid surface microvibration excited via acoustic radiation using sinusoidal phase modulation interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 43-55.
张烈山,李荣森,兰益成,等.利用正弦相位调制干涉仪探测声辐射激励的固体表面微振动[J].中国激光,2022,49(3):43-55.
- [2] LI Xincong, LIU Junyan, ZHANG Qiyuan, et al. Research on laser interferometric signal demodulation algorithm integrating adaptive filtering and normalized PGC-Arctan [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(13): 115-122.
李昕聪,刘俊岩,张启元,等.融合自适应滤波和归一化PGC-Arctan的激光干涉测振信号解调算法研究[J].电子测量技术,2022,45(13):115-122.
- [3] LEI Ming, FENG Zhihui, NAN Yaming, et al. Research of phase-sensitive-detection algorithm based on adaptive filtering [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 193-198.
雷铭,冯志辉,南亚明,等.基于自适应滤波的相敏检测算法研究[J].激光与光电子学进展,2022,59(1):193-198.
- [4] ANTOŃCZAK A J, KOZIOŁ P, SOTOR J Z, et al. Laser Doppler vibrometry with a single-frequency microchip green laser[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(11): 115306.
- [5] DANDRIDGE A, TVETEN A B, GIALLORENZI T G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982, 30(10): 1635-1641.
- [6] ZHANG Gang, WU Xuqiang, WANG Hui, et al. Air-backed mandrel fiber optic microphone with a resonant photoacoustic tube[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 34-42.
张刚,吴许强,汪辉,等.共光声池腔芯轴型空气衬底光纤麦克风[J].光学学报,2021,41(2):34-42.
- [7] CHEN Benyong, JIANG Jiancheng, LOU Yingtian, et al. Active linearized PGC demodulation with fusion of PGC-Arctan and PGC-DCM schemes for nonlinear error elimination in SPM interferometer[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 22999.
- [8] LANG Jinpeng, CHANG Tianying, CHENG Jiandong, et al. Improved phase generated carrier modulation and demodulation method[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(12): 1207004.
郎金鹏,常天英,陈建冬,等.改进式相位生成载波调制解调方法[J].光子学报,2016,45(12):1207004.
- [9] SUN Wei, YU Miao, CHANG Tianying, et al. Research and improvement based on PGC demodulation method[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 0806004.
孙韦,于淼,常天英,等.相位生成载波解调方法的研究[J].光子学报,2018,47(8):0806004.
- [10] NIKITENKO A N, PLOTNIKOV M Y, VOLKOV A V, et al. PGC-Atan demodulation scheme with the carrier phase delay compensation for Fiber-Optic interferometric sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(5): 1985-1992.
- [11] SUN Kang, HE Mengyang, HAN Yu. Phase generated carrier demodulation method eliminating modulation depth influence[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6): 0606003.
孙抗,何梦阳,韩毓.消除调制深度影响的相位生成载波解调方法[J].光子学报,2022,51(6):0606003.
- [12] POŽAR T, MOŽINA J. Enhanced ellipse fitting in a two-detector homodyne quadrature laser interferometer [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(8): 085301.
- [13] YAN Liping, ZHOU Chunyu, XIE Jiandong, et al. Nonlinear error compensation method for PGC demodulation based on Kalman filtering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 142-149.

- 严利平, 周春宇, 谢建东, 等. 基于卡尔曼滤波的PGC解调非线性误差补偿方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 142-149.
- [14] CHANG Nanqi, HUANG Xiaodi, WANG Haibin. Phase generated carrier demodulation approach in fiber-optic hydrophone based on extended Kalman filter parameter estimation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 118-129.
畅楠琪, 黄晓砥, 王海斌. 基于EKF参数估计的光纤水听器PGC解调方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 118-129.
- [15] QU Zhiyu, GUO Shuai, HOU Changbo, et al. Real-time self-calibration PGC-Arctan demodulation algorithm in fiber-optic interferometric sensors[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 23593.
- [16] HOU Changbo, ZHANG Jie, YUAN Yonggui, et al. Reliability demodulation algorithm design for phase generated carrier signal[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2022, 71(1): 127-138.
- [17] CHENG Kun, ZHANG Wentao, HUANG Wenzhu, et al. High-resolution optical fiber time-division multiplexing static strain sensing technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(5): 506004.
程坤, 张文涛, 黄稳柱, 等. 高分辨率光纤时分复用静态应变传感技术[J]. 中国激光, 2023, 50(5): 506004.
- [18] ZHANG Gang, GE Qiang, WANG Huisheng, et al. Novel design of phase demodulation scheme for fiber optic interferometric sensors in the advanced undergraduate laboratory[J]. European Journal of Physics, 2022, 43(6): 065301.
- [19] GE Qiang, ZHU Jianhui, ZHANG Gang, et al. High stability PGC-EFA-DCM demodulation algorithm integrated with a PID module[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(24): 7961-7968.
- [20] ZHANG Gang, XU Linguang, GE Qiang, et al. Ameliorated PGC demodulation scheme using Taubin least squares fitting of ellipse in fiber optic interferometric sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 80: 103374.
- [21] MU Shengquan, YU Benli, GUI Lei, et al. High-stability PGC demodulation technique with an additional sinusoidal modulation based on an auxiliary reference interferometer and EFA[J]. Optics Express, 2022, 30(15): 26941.
- [22] FANG C X, SHI J H, FU Z Y, et al. Improved ellipse-fitting phase demodulation technique to suppress the effect of light source intensity noise in interferometric system[J]. Optics Letters, 2023, 48(7): 1690-1693.
- [23] KENICHI K, PRASANNA R. Hyper least squares fitting of circles and ellipses[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2011, 55(6): 2197-2208.

Improved Phase Generated Carrier Demodulation Algorithm for Laser Vibration Measurement

JIANG Yichao¹, GU Shaojie¹, ZHANG Gang², XU Linguang², GE Qiang²,
WU Xuqiang³, YU Benli³

(1 School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

(2 School of Mathematics Physics and Finance, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

(3 Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Phase Generated Carrier (PGC) demodulation algorithm has been widely used in laser coherent vibration measurement and gained widespread interest due to its high accuracy, large dynamic range, good linearity, and low hardware overhead. However, the PGC demodulation technology is always accompanied by nonlinear distortions induced by phase modulation depth deviation, light intensity disturbance, carrier phase delay, etc. Therefore, an improved PGC demodulation algorithm is urgently required, which can effectively suppress the nonlinear distortions.

In this study, we propose an improved PGC demodulation algorithm based on low frequency modulation and iteratively reweighted ellipse specific fitting, which suppresses the nonlinear distortions in the laser vibration measurement. The ellipse specific fitting is realized by introducing a 6×6 ellipse constraint matrix in the direct least square fitting of ellipse, which avoids getting a hyperbola solution, consequently. The iteratively reweighted ellipse specific fitting uses iteratively reweighted optimization technology to improve the precision of the ellipse specific fitting and reduce the weight of the outlier data, it has the advantages of ellipse-specificity, high robustness and high precision. In the improved demodulation algorithm, the iteratively reweighted ellipse specific fitting is used to correct the original quadrature signals into a pair of perfect quadrature signals, which eliminates the nonlinear errors. Furthermore, to overcome

the drawback of the ellipse fitting algorithm that it fails to work correctly under small phase signals, a low frequency modulation with a large amplitude is added in the carrier modulation and it guarantees the ellipse fitting accuracy regardless of the desired signal amplitudes. Finally, differential cross multiplying is used to extract the desired phase shift signal from the corrected quadrature signals.

The simulations of ellipse specific fitting and iteratively reweighted ellipse specific fitting are performed and the results show that the iteratively reweighted ellipse specific fitting is superior. Then the proposed algorithm is verified in a Michelson interferometer and the experimental results show that the Lissajous figure of the quadrature signals without a stimulus is observed to be a 1/4 ellipse arc, a 1/2 ellipse arc, a 3/4 ellipse arc and a full ellipse when the amplitude of the low frequency modulation is set as 0.035 V, 0.085 V, 0.013 5 V, and 0.185 V, respectively. Then, a 1 kHz stimulus with the amplitude of 100 mV is set, it is found that the fitted Lissajous figure deviates from the standard circle when there is no low frequency modulation while it overlaps well with the circle when the low frequency modulation amplitude is larger than 0.085 V. Thus, the accuracy of the ellipse fitting results can be guaranteed by introducing an appropriate low frequency modulation. The frequency spectra of the demodulated signals under the low frequency modulation of 0 V, 0.085 V, 0.0135 V, and 0.185 V are compared, nonlinear distortions are well suppressed when the low amplitude is larger than 0.085 V. The demodulation algorithms based on ellipse specific fitting and iteratively reweighted ellipse specific fitting are also compared in the experiment, the Signal-to-Noise-And Distortion ratio (SINAD) and Total Harmonic Distortion (THD) of the demodulated signal based on iteratively reweighted ellipse specific fitting are improved by 1.99 dB and 0.27%, respectively. The demodulated signals of the improved algorithm at the phase modulation depth range of 0.8~3.4 rad show a high stability, the mean SINAD and THD are 42.99 dB and 0.44% with the corresponding standard deviations of 0.55 dB and 0.03%, respectively. The stimulating response linearity of the system is better than 99.99% and the dynamic range reaches 103.90 dB @ 500 Hz & THD=1%. The operating frequency band of the system is 20~8 000 Hz and two vibration signals are successfully demodulated in the experiment.

The improved PGC demodulation algorithm has a promising application prospect in the field of laser vibration measurement because of the advantages of high precision, good linearity, strong robustness and high computational efficiency.

Key words: Laser vibration measurement technology; Phase generated carrier demodulation algorithm; Low frequency modulation; Iteratively reweighted ellipse specific fitting; Nonlinear distortions

OCIS Codes: 120.3180; 120.5050; 120.5060; 060.2920