

基于光学偏振控制的散粒噪声极限微振动光学测量方法

伍凯凯^{1,2}, 谢博娅¹, 陈琳¹, 游淞清^{1,2}, 熊哲文², 杨鹏^{2*}

(1. 湖北工业大学机械工程学院, 湖北武汉 430068;

2. 湖北理工学院电气与电子信息工程学院智能感知与目标识别光电实验室, 湖北黄石 435003)

摘要: 物体微振动信号测量在磁场、建筑、生物成像及航空航天等方面具有重要的应用价值。但是, 物体微振动产生的弱反射光不仅极其微弱, 易受到探测距离、雨雾气等环境因素的干扰, 而且低频振动的振动形式多变, 易受到经典噪声影响, 难以实现极端微弱反射光条件下的振动信号测量。针对以上问题, 文中采用光学偏振控制方法, 对信号光与本振光的偏振性进行控制, 以减少光学噪声的干扰; 采用平衡外差探测, 将低频直流信号转变为高频交流信号, 避免信号被噪声湮没的同时, 克服了光电流共模噪声的影响。在赫兹 (~10 Hz) 频段, 探测器的噪声水平达到了散粒噪声极限, 并实现了阿瓦量级反射光条件下的微振动信号测量, 测得的物体微振动振幅为 11.44 nm, A 类标准不确定度为 0.25 nm, 合成不确定度为 0.34 nm, 测量精度为 ± 0.75 nm。该方案不仅为微弱多普勒频率测量、振动检测等测量领域的研究提供了实验支持, 在弱反光、长距离、雨雾天气等复杂测量环境也具有广阔的应用前景。

关键词: 微振动; 弱反射光; 偏振控制; 散粒噪声极限; 平衡外差探测

中图分类号: O431 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220872

0 引言

物体微振动信号测量是基础科学和工程技术领域的重要分支之一, 在光学磁场测量^[1]、建筑结构建模^[2]、医学成像^[3]及航空航天^[4]等领域具有重要的应用价值。物体微振动因为振动形式多变且振动幅度较小, 直接测量难度较大, 通常利用光学测量非接触、精度高、空间性好的优势来测量物体微振动信号^[5-7], 但是, 由于光学噪声、电子学噪声、热噪声等经典噪声的影响, 在 1 Hz 附近频段, 对微弱物体振动信号的测量, 甚至测量噪声水平达到散粒噪声极限是具有挑战性的^[8-11]。

近年来, 广泛的研究集中在低频率、微位移振动信号的测量。西北工业大学张文定等^[12]提出全光纤声光结构的全光纤外差检测方案, 在几十到几百赫兹频段、皮瓦级反馈条件下测得最小振幅和分辨率分别为 6 pm 和 1 pm。该方案在微振幅测量上具有先进性, 但是振动信号测量的噪声水平在 -100 dBm 附近,

远远没有达到散粒噪声水平, 且全光纤的结构不适用于长距离探测。上海大学张龙坤等^[13]运用基于模式转换移频 (Mode Conversion Frequency Shifter, MCFS) 的光学外差微振测量方案, 在 1 Hz~300 kHz 频段测得最小振幅为 0.019 nm。该方案虽然在 1 Hz 频段的测量达到 0.01 nm 量级, 但是由于信号光的功率需达到几十微瓦的强度, 使得该方案在弱反射光条件下的应用受到限制。安徽大学朱德生等^[14]利用全光纤结构的移频式自差激光反馈装置, 实现了弱反馈条件下亚皮米位移的测量。但是, 实验使用直接探测的方法, 在低频区域因为探测器本身噪声和 $1/f$ 噪声的干扰, 使得位移信号难以测量。因此, 在弱反射光条件下实现低频段物体微振动信号散粒噪声极限的测量是具有潜力的。

笔者课题组利用外差探测、平衡探测、偏振控制等光学原理和技术, 成功探测马赫-曾德尔干涉仪制备的位相信号, 在 1 Hz 频段达到了散粒噪声极限^[15];

收稿日期: 2023-01-10; 修订日期: 2023-02-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12074110); 国家自然科学基金项目 (11947134); 湖北省教育厅科研项目 (B2021251)

作者简介: 伍凯凯, 男, 硕士生, 主要从事精密光学测量方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 杨鹏, 男, 讲师, 博士, 主要从事精密光学测量方面的研究。

成功探测法布里-帕罗干涉仪制备的振幅信号,在 1 Hz 频段接近散粒噪声极限^[6]。在现有研究成果的基础上,文中采用光学偏振控制方法,对信号光与本振光进行光学偏振控制,以减少光学噪声的干扰,并以移频技术^[17]避免信号被噪声湮没;采用平衡外差探测方法,把低频直流信号转变为高频交流光电信号,不但克服了光电流共模噪声的影响,还有效降低了经典噪声的干扰。在赫兹 (~10 Hz) 频段,实现了阿瓦量级反射信号光条件下的测量,测得最小振幅为 11.44 nm, A 类标准不确定度为 0.25 nm, 噪声水平达到散粒噪声极限,合成不确定度为 0.34 nm。除了满足常规行业的要求外,采用光学偏振控制的平衡外差探测在弱反光、长距离、雨雾天气等测量环境也具有广阔的应用前景。

1 理论模型与仿真

基于偏振控制的平衡外差探测法测量物体微振动信号的理论模型如图 1 所示。P 偏振光作为信号光,经 BS 透射至振动物体 OM 后原路返回,二次经过 BS 的反射光入射至 PBS₁, 并与作为本振光的 S 光在 PBS₁ 处耦合输出, 分别入射至两个光电二极管 PD₁ 和 PD₂, 作差分处理后输出光电流信号。

作为信号光的 P 光在入射至 BS 前,利用移频调制器调制为外差角频率等于 Ω 的载波,调制后的信号光 $E_s(t)$ 的电场表达式为:

$$E_s(t) = \alpha_s e^{-i(\omega_s + \Omega)t + i\theta_1} \quad (1)$$

式中: α_s 、 ω_s 、 θ_1 分别表示信号光光场振幅、角频率和

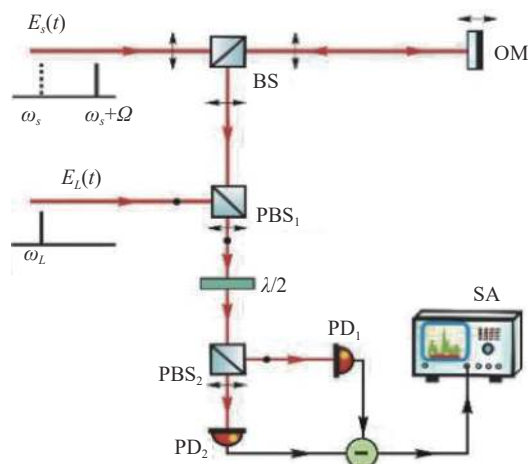


图 1 物体微振动信号测量模型

Fig.1 Measurement model of object micro-vibration signal

初始相位。

信号光经 BS 透射至 OM 后原路返回后入射至 PBS₁ 的反射信号光 $E'_s(t)$ 的电场表达式为:

$$E'_s(t) = \frac{1}{2} \alpha_s e^{-i(\omega_s + \Omega)t + i[\theta_1 + \theta(t)]} \quad (2)$$

式中: $\theta(t)$ 表示物体振动引起的位相随时间的变化。本振光的电场表达式为:

$$E_L(t) = \alpha_L e^{-i\omega_L t + i\theta_2} \quad (3)$$

式中: α_L 、 ω_L 、 θ_2 分别表示本振光光场振幅,角频率和初始相位。反射信号光与本振光经 PBS₁ 合束后,过 $\lambda/2$ 由分束镜 (PBS₂) 50-50 分束, 分别由两个光电二极管接收。产生的光电流作差分处理,得到光电流差为:

$$J_-(t) = \left(\frac{\eta e}{h\nu}\right) \alpha_s \alpha_L \sin[(\Delta\omega + \Omega)t - \Delta\theta + \theta(t)] \quad (4)$$

式中: η 表示探测器的量子效率; e 表示单位电荷量; h 表示普朗克常数; ν 为以 Hz 为单位的信号频率; $\Delta\omega = \omega_L - \omega_s$ 为本振光与信号光的角频率差; $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 为本振光与信号光初始位相之差, 即 $\Delta\omega = 0$, $\Delta\theta = 0$ 。所以,光电流差的表达式变为:

$$J_-(t) = \left(\frac{\eta e}{h\nu}\right) \alpha_s \alpha_L \sin[\Omega t + \theta(t)] \quad (5)$$

当位相变化 $\theta(t)$ 由简单振动调制函数 $u(t)$ 引入, 即 $\theta(t) = (4\pi/\lambda)u(t)$, 则公式 (5) 可以表示为:

$$S(t) = \frac{\eta e}{h\nu} \alpha_s \alpha_L \sin\left[\Omega t + \frac{4\pi}{\lambda}u(t)\right] \quad (6)$$

利用频谱分析仪 (Spectrum Analyzer, SA) 来进行实验观测与数据采集,当信号光调制外差频率为 f_Ω , $u(t)$ 的调制频率为 f 时,实验将获得 $f_\Omega - f$ 、 f_Ω 和 $f_\Omega + f$ 三种频率成分的频谱数据。根据频谱数据可得振动信号 f 的噪声功率 P_{sa} 与 f_Ω 外差信号的功率 P_Ω , 令 $\Gamma = P_{sa}/P_\Omega$, 当输入的信号光功率一定时,比值 Γ 理论上仅受制函数 $u(t)$ 的幅值影响。

为了标定物体振动的位移,根据实验需要合理设定参数,对物体振动的位移 ΔL 进行数值仿真。根据理论模型部分的公式,引入振动调制信号后,探测器输出交流光电信号的表达式如公式 (6) 所示。实验中调制外差频率为 $f_\Omega = 5.5$ MHz, 振动物体为压电陶瓷 (Piezoelectric Transducer, PZT), 其振动位移响应范围在 $0 \sim 5 \mu\text{m}$ 之间, 调制函数 $u(t)$ 为对称的三角波函数, 设置 PZT 响应范围内的振动位移 ΔL 作为对应的 $u(t)$ 的幅值变量,进行数值仿真。利用 MATLAB 对公

式 (6) 做功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD) 分析, 其中 P_{sa} 为振动调制频率信号的功率, P_o 为 5.5 MHz 外差信号的功率, 通过 PSD 的数据得到相应的 Γ 值。改变 ΔL 的取值, 重复仿真, 并使用 Origin 进行曲线拟合, 仿真结果如图 2 所示。图 2 中的小图为局部放大

图, 黑线为截取的一段仿真数据点线图, 红线为使用 Origin 进行曲线拟合的结果, 拟合相关系数 $R=0.9998$, 拟合成功。使用到的拟合函数为:

$$y = [A_0 + A_1(x - C) + A_2(x - C)^2] - [B_0 + B_1(x - C) + B_2(x - C)^2] \cdot \ln(x - C) \quad (7)$$

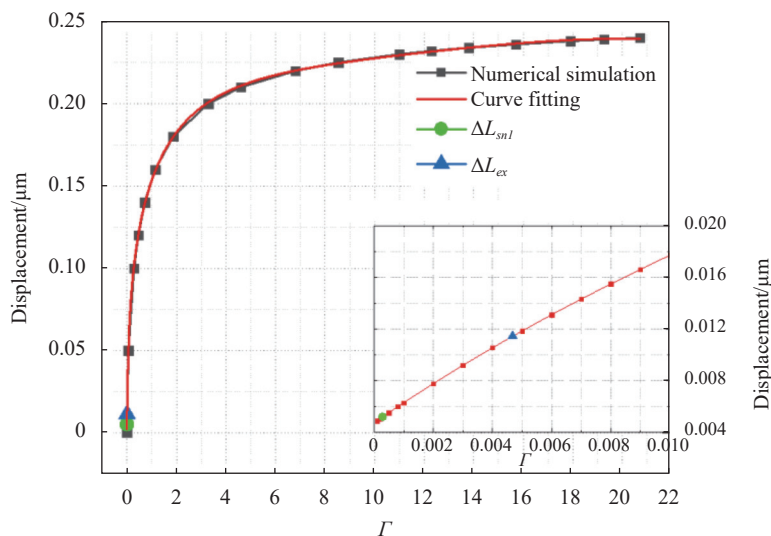


图 2 振动位移数值仿真结果

Fig.2 Numerical simulation results of vibration displacement

由拟合函数的参数得到比值 Γ 与振动位移 ΔL 的拟合函数表达式为:

$$\Delta L = [0.12 + 0.027(\Gamma + 0.02) + 0.0055(\Gamma + 0.02)^2] + [0.03 - 0.02(\Gamma + 0.02) - 0.0011(\Gamma + 0.02)^2] \cdot \ln(\Gamma + 0.02) \quad (8)$$

2 实验设计

根据物体微振动信号测量理论模型搭建的实验

装置, 如图 3 所示。实验装置主要由三部分组成: 移频部分①, PBS_1 分束后的 P 光, 经两个声光调制器 (Acousto-optical Modulators, AOM) 调制移频后作为物体微振动信号测量的载波; 待测振动物体部分②, 利用任意函数发生器加高压电源驱动压 PZT 产生振动信号; 平衡探测部分③, 由二分之一波片、PBS 分束镜和光电探测器组成, 探测器的输出光电流接入频谱分析仪进行实验观测与数据采集。

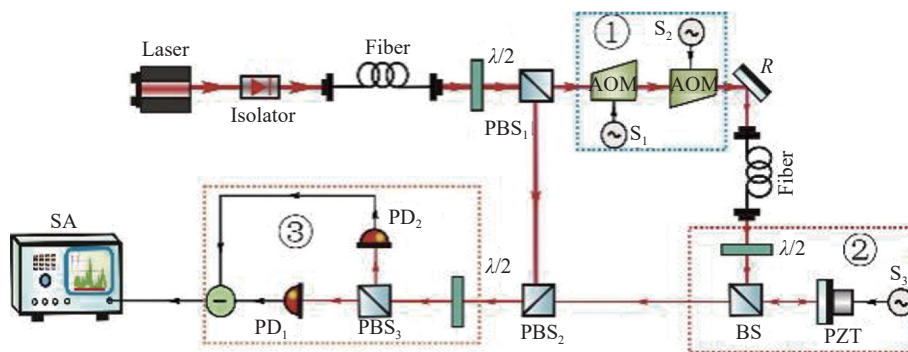


图 3 物体微振动信号测量实验光路

Fig.3 Experimental optical path for measuring micro-vibration signal of object

2.1 搭建移频光

移频光搭建的光路图如图 4(a) 所示, 光束经 PBS₁ 分束后, 反射的 S 光作为参考光, 角频率写作 ω_L ; 透射的 P 光作为信号光, 角频率写作 ω_S 。P 光入射至光纤后进入两个 AOM (AOM_{1,2}), 调制输出移频光。

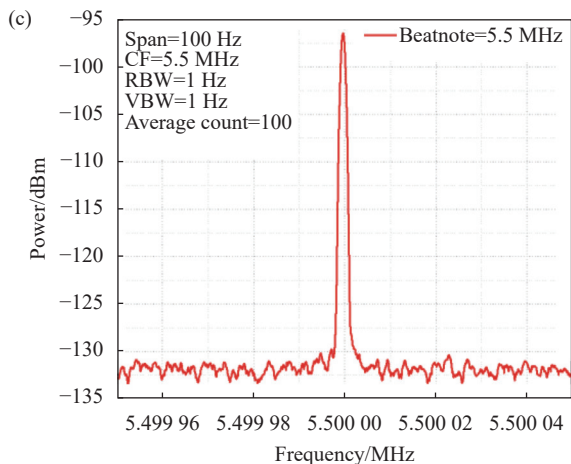
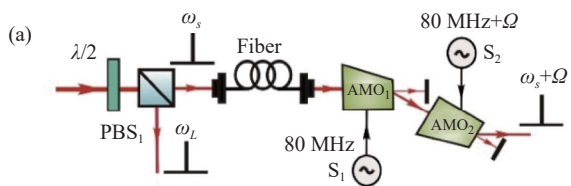


图 4 (a) 移频光光路图; (b) AOM 实物图; (c) 5.5 MHz 拍频实验结果

Fig.4 (a) Optical path of frequency shift optical; (b) Physical diagram of AOM; (c) 5.5 MHz beat frequency test results

实验中用到的 AOM 为 Gooch & Housego-3080-197 系列声光调制器, 实物图如图 4(b) 所示, 工作中心频率为 80 MHz, 工作带宽为 30 MHz; 信号源为 Keysight-33600 系列波形发生器, 调制输出正弦信号。根据 AOM 的衍射效应, AOM₁ 取 -1 级衍射光, 调制频率为 80 MHz; AOM₂ 取 +1 级衍射光, 调制频率为 80 MHz+5.5 MHz。调制后, 中心角频率为 ω_S 的激光转变为 中心角频率为 $\omega_S + \Omega$ ($\Omega = 5.5$ MHz) 的载

波。移频光的拍频结果如图 4(c) 所示。

2.2 微振动信号

如图 5(a) 所示, 移频光经过 BS 后入射至 PZT 上, PZT 采用任意函数发生器调制其振动, 信号 S₃ 为三角波调制信号, 调制幅度为 1 Vpp, 调制频率为 2~10 Hz。PZT 的振动引起入射光发生位相变化, 以 PZT 的反射光作为此次实验测量微振动信号的信号光。实验中 PZT 采用永隆科技 BCS3-252505 系列方形压电陶瓷, 驱动电压阈值为 150 V, 最大响应位移为 $(5 \pm 0.15) \mu\text{m}$ 。PZT 的一端采用 AB 胶固定在钢块底座上, 另一端同样用 AB 胶固定一块直径为 6.3 mm 的介质镜, 将 PZT 的正负电压线焊接一个 BNC 接头, 并将钢块固定在一个三轴位移台上, 实物图见图 5(b)。

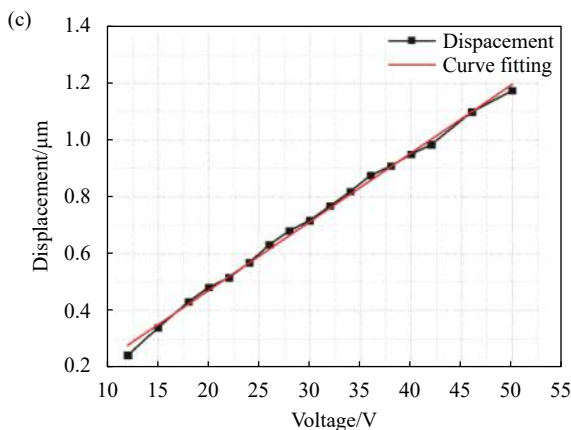
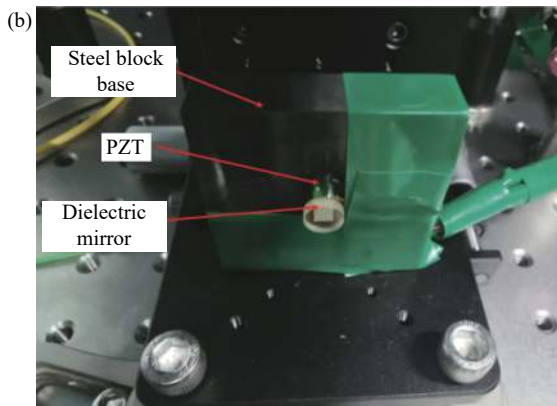
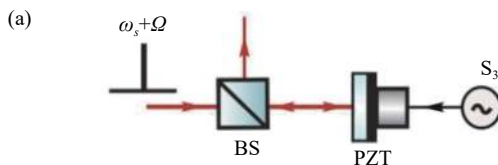


图 5 (a) 微振动信号光路图; (b) PZT 实物图; (c) PZT 振动位移标定
Fig.5 (a) Micro-vibration signal optical path diagram; (b) Physical diagram of PZT; (c) Vibration displacement calibration of PZT

为标定 PZT 振动位移与电压之间的关系,取 PZT 负载电压为 12~50 V 之间,利用示波器进行数据采集,然后使用 Origin 进行 sine 曲线拟合,并根据拟合函数计算出相应的位相 $\Delta\phi$,再利用位移与位相公式 $\Delta L = \Delta\phi \cdot \lambda / 4\pi$ 计算 PZT 标定位移 ΔL_{re} ,结果如图 5(c) 黑线所示。利用 Origin 对 PZT 标定位移进行线性拟合,如图 5(c) 红线所示。其拟合函数为 $\Delta L_{re} = -12.98 + 24.19x$ (单位: nm),拟合相关系数为 $R=0.997$ 。由此可得,当 PZT 负载电压为 1 V_{pp} 时, PZT 振动位移为 $\Delta L_{re} = 11.21$ nm。

2.3 平衡外差探测

图 6(a) 中,平衡外差探测系统由二分之一波片 ($\lambda/2$)、偏振分光棱镜 (PBS₃) 和平衡外差探测器组成。信号光和参考光在 PBS₂ 处耦合,出射光经过 $\lambda/2$ 和 PBS₃ 的作用 50-50 分束,分束后的两束激光分别由平衡外差探测器的 PD₁ 和 PD₂ 接收,产生光电流 J_1 和 J_2 ,作差分处理得到公式 (5) $J_-(t) = (\eta e / h\nu) \alpha_S \alpha_L \sin[\Omega t + \theta(t)]$ 。最后,将探测器输出的光电流信号接入 SA 进行实验观测和数据采集。

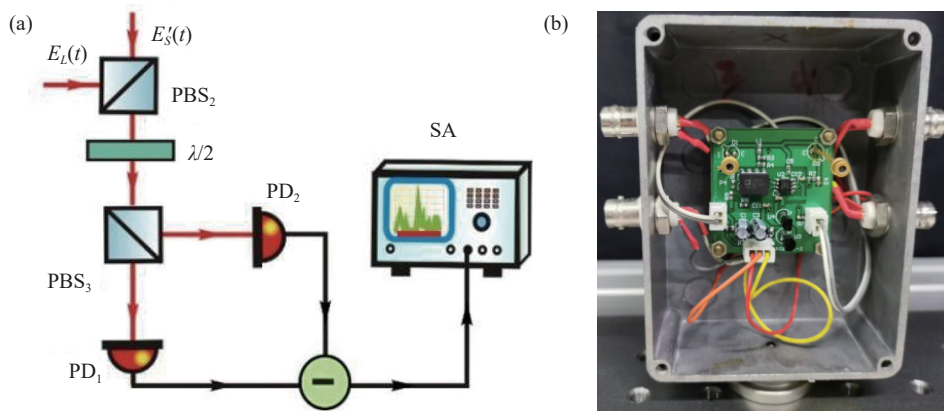


图 6 (a) 平衡外差探测光路; (b) 平衡探测器

Fig.6 (a) Balanced heterodyne detection optical path; (b) Balanced detector

实验所用探测器为相敏外差探测器^[18],适用激光波段为 800~1700 nm,响应带宽为 140 MHz,量子效率为 0.69,具有光频响应快、暗电流噪声低、共模差分效果好的特点,满足该实验需求,实物图见图 6(b)。探测器在 Span=10 MHz 频段范围的噪声水平测量结果见图 7(a),实验搭建的光路实物图见图 7(b)。

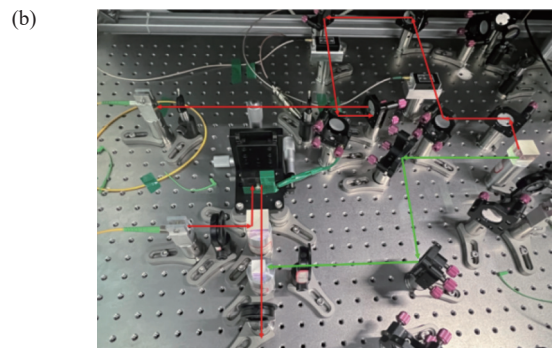
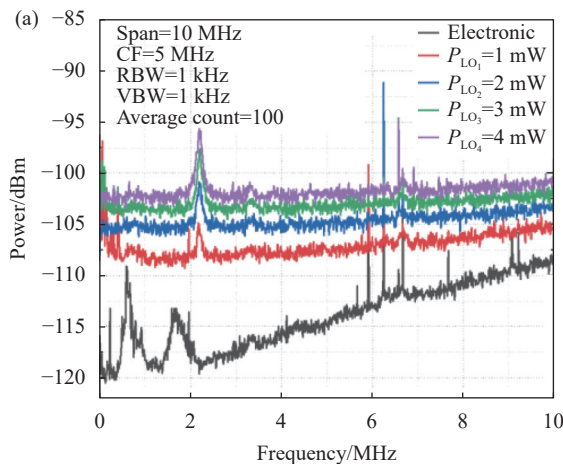


图 7 (a) Span=10 MHz 噪声功率频谱数据; (b) 实验光路图

Fig.7 (a) Noise power spectrum data of Span=10 MHz; (b) Experimental optical path

3 实验结果与分析

根据第 2 节的实验设计搭建实验光路,按表 1 所示的实验条件与参数设置进行实验,并利用频谱分析仪进行实验数据采集。首先,对本振光噪声水平及位移分辨力进行测量,测量结果如 3.1 节所述;然后,对

赫兹量级微振动信号噪声水平及微振动位移进行测量;最后,根据实验数据求得弱反射光条件下输入信号光的光功率值。

表 1 噪声功率测量实验条件

Tab.1 Test conditions for noise power measurement

No.	Test conditions
1	Local-oscillator power: 2 mW/4 mW/8 mW
2	Modulation frequency of AOM1: 80 MHz
3	Modulation frequency of AOM1: 85.5 MHz
4	Center frequency of spectrometer: 5.5 MHz
5	Spectrum analyzer bandwidth: 100 Hz
6	Resolution bandwidth of spectrometer: 1 Hz
7	Video bandwidth of spectrometer: 1 Hz
8	Average count: 100
9	Optical heterodyne contrast: 0.9
10	System optical power correction value: 0.63
11	Detector quantum efficiency: 0.69
12	Receiver feedback resistance: 5 kΩ
13	Receiver load resistance: 50 Ω
14	PZT amplitude modulation: 1 Vpp
15	PZT waveform modulation: Triangle wave
16	PZT frequency modulation: 2-10 Hz

3.1 本振光噪声水平

实验操作中,实验条件及参数是设置见表 1。利用频谱分析仪(10 Hz~4 GHz, ROHDE&SCHWARZ)进行实验数据采集,实验结果如图 8 所示。其中,黑线

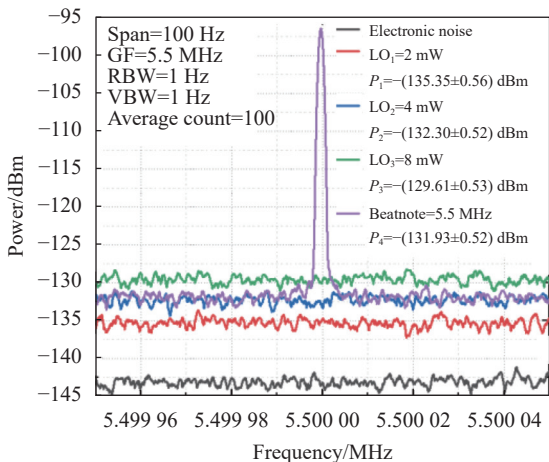


图 8 本振光噪声功率

Fig.8 Noise power of local oscillator light

表示测量系统的电子学噪声;红线表示本振光功率为 2 mW 时的噪声功率;蓝线表示本振光功率为 4 mW 时的噪声功率;绿线表示本振光功率为 8 mW 时的噪声功率;紫线表示在本振光为 4 mW 时, PZT 未加调制信号的外差信号的噪声功率。

因此可知,实验测得的本振光噪声功率值分别为:

$$\begin{aligned}
 P_{ex2} &= -(135.35 \pm 0.56) \text{ dBm} \\
 P_{ex4} &= -(132.30 \pm 0.52) \text{ dBm} \\
 P_{ex8} &= -(129.61 \pm 0.53) \text{ dBm}
 \end{aligned} \tag{9}$$

在平衡探测器中,光电二极管产生的光电流可表示为:

$$i = \sqrt{2e \cdot (\eta e / h\nu) \cdot P \cdot B} \tag{10}$$

式中:η表示探测器的量子效率;e表示电子的电量;h表示普朗克常数;ν=c/λ表示光子频率,c表示真空中的光速;λ表示激光波长;B为探测带宽;P为入射光功率。

光电流经过电路中的反馈电阻R_f=5 kΩ后,产生的电压为U=i·R_f。由于测量仪器的输入电阻为50 Ω,与电路中的负载电阻R_{load}=50 Ω串联而产生分压效果,所以,入射光的散粒噪声功率值为:

$$P_{sn} = \frac{U^2}{4R_{load}} = \frac{\eta^2 P B R_f^2}{2h\nu R_{load}} \tag{11}$$

当平衡探测器接收到的光功率分别为P_{LO1}=2 mW, P_{LO2}=4 mW, P_{LO3}=8 mW 时,得到噪声功率的理论值分别为:

$$\begin{aligned}
 P_{th2} &= -135.33 \text{ dBm} \\
 P_{th4} &= -132.33 \text{ dBm} \\
 P_{th8} &= -129.33 \text{ dBm}
 \end{aligned} \tag{12}$$

对比公式(9)与公式(12)可知,实验测得的本振光噪声功率与理论值基本相符,本振光噪声水平测量达到散粒噪声极限,即探测器的分辨率达到散粒噪声极限。

又因为频谱分析仪获得的信号噪声功率的单位为 dBm,则:

$$P(W) = 10^{\frac{P(dBm)}{10}} / 1000 \tag{13}$$

所以根据公式(13)可将功率单位转换为W。由图 8 可知P₄=(131.93 ± 0.52) dBm, P₂=-96.50 dBm,

再根据公式 (13) 转换后的 P_4 和 P_Ω (单位: W) 计算得到 $\Gamma = P_4/P_\Omega = 0.000\ 29 \pm 0.000\ 03$ 。根据公式 (8) 可知, 平衡外差探测器测量振动位移的分辨力为 $\Delta L_{sml} = (5.2 \pm 0.1)$ nm, 如图 2 中绿色的点所示。

3.2 微振动信号测量

根据表 1 所示实验条件, PZT 振动负载电压为 1 Vpp, 调制频率在 2~10 Hz 的频谱数据如图 9 所示。

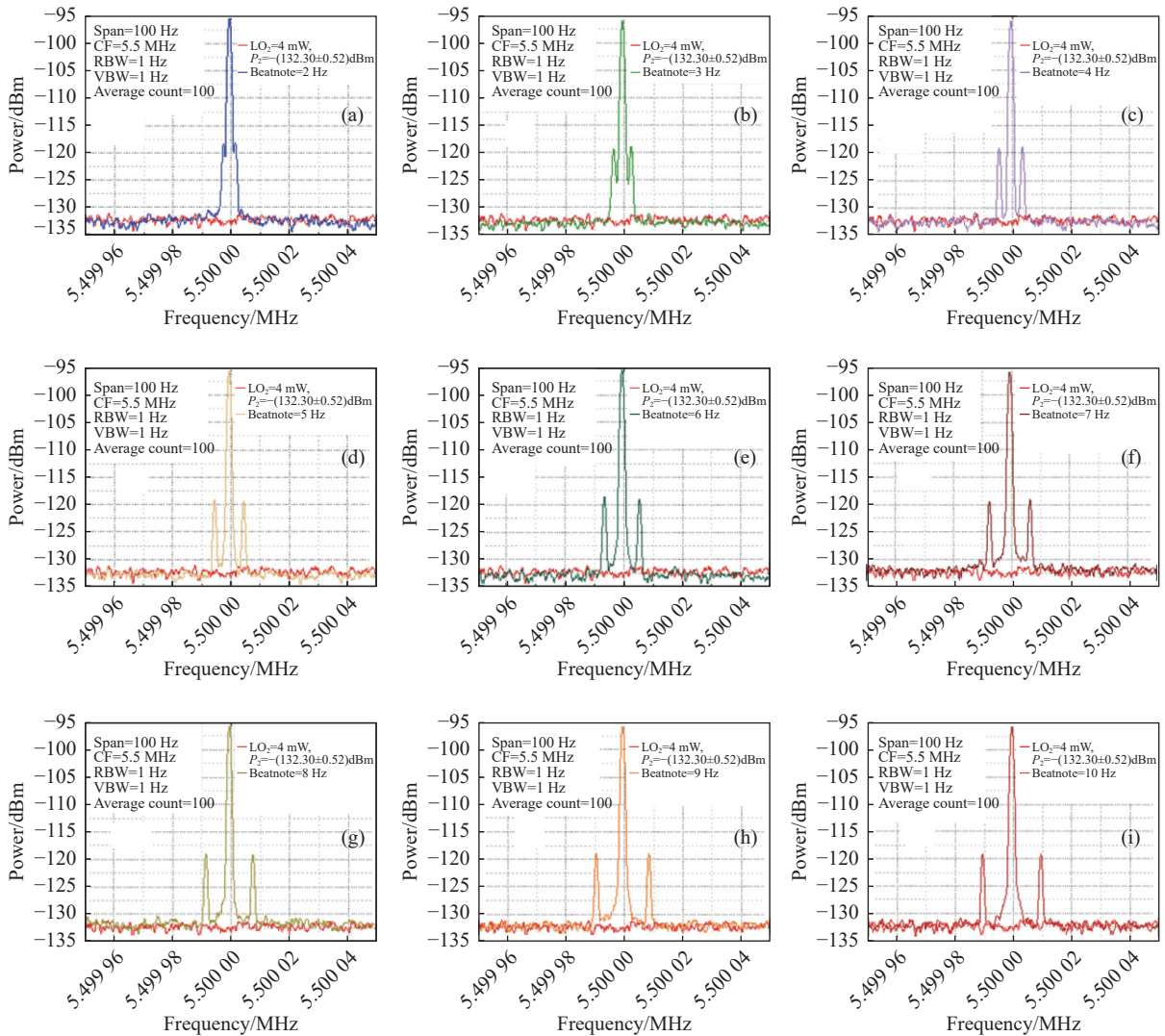


图 9 2~10 Hz 振动信号噪声功率

Fig.9 Noise power of vibration signals from 2-10 Hz

根据图 9 所示数据, 其中红线表示 4 mW 本振光噪声水平, 图 (a)~(i) 分别为 PZT 振动频率在 2~10 Hz 时的频谱数据。根据公式 (13) 将频谱数据中 PZT 振动信号的噪声功率值 P_{sa} 与外差频率 $\Omega = 5.5$ MHz 的噪声功率值 P_Ω 转换为以为 W 单位, 并求出比值 Γ , 根据第 1 节中的数值仿真数据的拟合函数公式 (8), 得到振动位移 ΔL_{ex} 。

因为频谱分析仪测得的信号噪声功率 P_{sa} 满足:

$$P_{sa}(t) = \frac{\alpha_s^2(t)}{2R_{load}} \left(\frac{\eta c \epsilon_0 e R_f \alpha_L}{h\nu} \right)^2 \quad (14)$$

式中: ϵ_0 表示介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$; α_L 表示本振光电场强度; $\alpha_s(t)$ 表示信号光电场强度, 实验中测量的是 $\alpha_s(t)$ 所携带的调制信号。信号光 P_s 与本振光 P_{L_0} 一定满足关系式:

$$P_s \equiv \frac{c\epsilon_0}{2} |\alpha_s|^2 \quad (15)$$

$$P_{L_0} \equiv \frac{c\epsilon_0}{2} |\alpha_L|^2 \quad (16)$$

综上可得信号光功率表达式为:

$$P_S = \frac{(h\nu)^2 P_{sa} R_{load}}{2P_{L_0} (\eta e R_f)^2} \quad (17)$$

代入数值,求得信号光功率 P_S 。实验结果如表 2 所示。

表 2 2~10 Hz 实验结果

Tab.2 Experimental results from 2-10 Hz

f/Hz	Γ	$\Delta L_{ex}/\text{nm}$	$P_S/10^{-18}$ W
2	0.005 1	11.99	1.23
3	0.004 6	11.34	0.97
4	0.004 7	11.47	1.01
5	0.004 6	11.34	1.03
6	0.004 8	11.60	1.18
7	0.004 4	11.08	0.96
8	0.004 7	11.47	1.07
9	0.004 6	11.34	1.09
10	0.004 6	11.34	1.04
Avg	0.004 68	11.44	1.06

3.3 不确定度评定

由于压电陶瓷的振动对温度和气压的短时间影响并不敏感,而实验数据的采集在 20 s 内就已完成,环境温度和气压在 20 s 内变化不大,因此环境温度和气压对实验测量的影响几乎可以忽略。实验所使用的光学平台的共振频率峰值为 0.5 Hz,测量频段为 2~10 Hz,振动抑制大于 20 dB。另外,数据采集在深夜安静的环境下进行,环境干扰较小,系统测量受振动影响较小。根据实验结果可知,实验系统测量微振动位移的分辨力为 $\Delta L_{min} = 5.20$ nm,如图 2 中绿色的点所示。

利用贝塞尔法计算 A 类标准不确定度,不确定度 u_A 满足:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (18)$$

式中: \bar{x} 为观测数据的算术平均值; n 为等精度独立测量次数。将表 2 所得实验数据代入公式 (18),可以得到 A 类标准不确定度为 0.25 nm。标准不确定度 B 类

评定中,被测量的估计值根据与被测量有关的资料、知识和经验等可靠的先验信息进行评定。文中将 PZT 位移标定值与测量值的差值作为 B 类标准不确定度,即 B 类不确定度为 $u_B = 0.23$ nm。

因此,根据合成不确定度公式:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (19)$$

可以得到合成不确定度为 0.34 nm。

一般而言,系统的测量精度等级的定义为平均值附近正负三倍标准差的值与量程之比。公式如下:

$$\delta = \pm 3\sigma / \Phi \times 100\% \quad (20)$$

式中: σ 表示标准差; Φ 表示系统测量量程。根据表 2 中 2~10 Hz 频段的测量结果,统计分析得到此次测量的平均值为 11.44 nm,标准差为 $\sigma = 0.25$ nm,根据图 2 所示的位移仿真曲线可知, $\Phi = 240$ nm,由公式 (20) 计算得到 $\delta \approx \pm 0.31\%$ 。而测量精度的定义为测量精度等级与系统测量量程的乘积,即:该实验系统的测量精度为 ± 0.75 nm。

实验结果表明,在赫兹 (~10 Hz) 频段, PZT 负载电压为 1 Vpp 时,实验测得 PZT 微振动噪声功率比值 $\Gamma = 0.004 68$,振动位移为 $\Delta L_{ex} = 11.44$ nm, A 类标准不确定度为 0.25 nm,合成标准不确定度为 0.34 nm,测量精度为 ± 0.75 nm,如图 2 中蓝色的点所示,与 PZT 标定振动位移值 $\Delta L_{re} = 11.21$ nm 基本一致;输入信号光的光功率为 $P_S = 1.06 \times 10^{-18}$ W。即在阿瓦级信号光的弱反射光条件下,对赫兹 (~10 Hz) 频段物体微振动信号的测量,噪声水平达到散粒噪声极限。

4 结 论

文中采用光学偏振控制的平衡外差探测法,将信号光与本振光进行光学偏振控制,以减少光学噪声的干扰,并以移频技术调制外差频率的激光作为信号的载波,避免信号被噪声湮没;利用平衡外差探测法能克服光电流共模噪声影响的优势,将低频信号转变为高频交流光电信号进行测量。在赫兹 (~10 Hz) 量级频段范围实现了阿瓦弱反射光条件的物体微振动信号散粒噪声极限的测量,测得最小振幅为 11.44 nm, A 类标准不确定度为 0.25 nm,合成标准不确定度为 0.34 nm,测量精度为 ± 0.75 nm,噪声水平达到散粒噪

声极限。该方案不仅为微弱多普勒频率测量、低频振动信号检测等测量领域的研究提供了实验支持,在弱反光、长距离、雨雾天气等复杂测量环境也具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Chen Jie, Qin Ming, Huang Qingan. Detecting magnetic field direction by a micro beam operating in different vibration modes [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(9): 323-328.
- [2] Fa A, Esa B, Mvb C. Computational modelling of dynamic soil-structure interaction in shear wall buildings with basements in medium stiffness sandy soils using a subdomain spectral element approach calibrated by micro-vibrations [J]. *Engineering Structures*, 2022, 252(1): 141-296.
- [3] Che L, Xiao W, Pan F, et al. Exploiting a holographic polarization microscope for rapid autofocusing and 3D tracking. [J]. *Biomedical Optics Express*, 2020, 11(12): 7150-7164.
- [4] Zhi Xiyang, Hu Jianming, Li Wenfeng, et al. Satellite image restoration based on measured vibration information and requirements [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10s): 632-639. (in Chinese)
- [5] Huang Zhen. Research and application on vibration measurement based on laser diode self-mixing interference[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] Fan Yichen, Li Zhongliang, Xu Zhongmin, et al. High-accuracy in-situ detection method of monochromator angular vibration [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 156-164. (in Chinese)
- [7] Chen Jiahian, Miao Lijun, Zhou Yilan, et al. Three-degree-of-freedom micro-vibration measurement system based on dual-frequency laser interference [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1435-1443. (in Chinese)
- [8] Li Jinhui, Ma Hui, Yang Chenye, et al. Research progress of the laser vibration measurement techniques for acoustic-to-seismic coupling landmine detection [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 487-502. (in Chinese)
- [9] Wang Weijie, Li Fan, Li Jianbo, et al. Research on low noise balanced homodyne detection system for space-based gravitational wave detection (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 20220300. (in Chinese)
- [10] David B Cole, Cheryl Sorace-Agaskar, Michele Moresco, et al. Integrated heterodyne interferometer with on-chip modulators and detectors. [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 20210116.
- [11] Yang Peng, Ke Xuezhi, Zhang Fenglei, et al. Research on sub Hertz laser interferometry with sub shot noise [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(1): 0127001. (in Chinese)
- [12] Zhang Wending, Gao Wei, Huang Ligang, et al. Optical heterodyne micro-vibration measurement based on all-fiber acousto-optic frequency shifter [J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17576-17583.
- [13] Zhang Longkun, Lu Jiafeng, Meng Linghao, et al. A lower frequency shift based on mode conversion for optical heterodyne micro-vibration measurement [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(21): 6057-6062.
- [14] Zhu Desheng, Zhao Yuanyang, Tu Yourui, et al. All-fiber laser feedback interferometer using a DBR fiber laser for effective sub-picometer displacement measurement [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(1): 114-117.
- [15] Yang Peng, Xie Boya, Feng Sheng. Subhertz interferometry at the quantum noise limit [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(9): 2366-2369.
- [16] Xie Boya, Feng Sheng. Squeezing-enhanced heterodyne detection of 10 Hz atto-Watt optical signals [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6073-6076.
- [17] Cao Kang, Jiang Chenghao, Zhu Jingguo, et al. Study on laser Doppler frequency shift characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210116. (in Chinese)
- [18] Fan H, He D C, Feng S. Experimental study of a phase-sensitive heterodyne detector [J]. *Opt Soc Am B*, 2015, 32(10): 2172-2177.

Optical measurement method of shot noise limit micro-vibration based on optical polarization control

Wu Kaikai^{1,2}, Xie Boya¹, Chen Lin¹, You Songqing^{1,2}, Xiong Zhewen², Yang Peng^{2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Optoelectronic Laboratory for Intelligent Sensing and Object Recognition, School of Electrical and Electronic Information Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China)

Abstract:

Objective The measurement of micro-vibration signals of objects has important application value in magnetic field, construction, biological imaging and aerospace. However, the weak reflected light generated by the micro-vibration of the object is not only extremely weak, but also susceptible to interference from environmental factors such as detection distance and rain and fog. Moreover, the vibration form of low-frequency vibration is variable and susceptible to classical noise. It is difficult to achieve vibration signal measurement under extremely weak reflected light conditions. In view of the above problems, this paper realizes the measurement of micro-vibration signal in Hertz frequency band and weak reflected light based on polarization control.

Methods Optical polarization control method is used to control the polarization of signal light and local oscillator light to reduce the interference of optical noise. Balanced heterodyne detection is used to convert low-frequency DC signals into high-frequency AC signals to avoid signal annihilation by noise (Fig.1). The power spectral density (PSD) analysis of the photocurrent formula output by the balanced detector is carried out by MATLAB, and the relationship curve between the ratio of the noise power of the vibration signal to the power of the heterodyne signal and the vibration displacement is obtained (Fig.2). Then, the corresponding value is obtained according to the power spectrum of the vibration signal and the heterodyne signal in the Hertz frequency band measured by the experiment (Fig.9). Finally, the measured value of the micro-vibration displacement is obtained.

Results and Discussions In the Hertz frequency band, the noise level of the detector reaches the shot noise limit (Fig.7), and the micro-vibration signal measurement under the condition of Ava-level reflected light is realized. When the PZT load voltage is 1 Vpp, the optical power of the input signal light is 1.06×10^{18} W, the micro-vibration amplitude of the object is 11.44 nm, the class A standard uncertainty is 0.25 nm, the combined uncertainty is 0.34 nm, and the measurement accuracy is ± 0.75 nm (Tab.2).

Conclusions A balanced heterodyne detection method controlled by optical polarization is used to measure the shot noise limit of object micro-vibration signals in the frequency range of Hertz (~10 Hz). The minimum amplitude is 11.44 nm, the standard uncertainty of class A is 0.25 nm, the combined standard uncertainty is 0.34 nm, the measurement accuracy is ± 0.75 nm, and the noise level reaches the shot noise limit. This scheme not only provides experimental support for the research of weak Doppler frequency measurement, low frequency vibration signal detection and other measurement fields, but also has broad application prospects in complex measurement environments such as weak reflected light, long distance, rain and fog weather.

Key words: micro-vibration; weak reflected light; polarization control; shot noise limit; balanced heterodyne detection

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (12074110); National Natural Science Foundation of China (11947134); The Scientific Research Project of Hubei Education Department (B2021251)