



## 基于多光束混合外差干涉的相位增强技术研究

孔新新 张文喜 才启胜 伍洲 戴玉 相里斌

### Multi beam hybrid heterodyne interferometry based phase enhancement technology

Kong Xin-Xin Zhang Wen-Xi Cai Qi-Sheng Wu Zhou Dai Yu Xiang Li-Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 190601 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200281

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200281>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 外差式偏振干涉成像光谱技术研究

Heterodyne polarization interference imaging spectroscopy

物理学报. 2017, 66(16): 160702 <https://doi.org/10.7498/aps.66.160702>

#### 多普勒差分干涉仪干涉图信噪比对相位不确定度研究

A propagation of interferogram signal-to-noise (SNR) and phase uncertainty in Doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer

物理学报. 2020, 69(1): 014202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191179>

#### 基于噪声免疫腔增强光外差分子光谱技术实现光纤激光器到1530.58 nm NH<sub>3</sub>亚多普勒饱和光谱的频率锁定

Frequency locking of fiber laser to 1530.58 nm NH<sub>3</sub> sub-Doppler saturation spectrum based on noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectroscopy technique

物理学报. 2018, 67(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172541>

#### 相敏式激光啁啾色散光谱技术在高吸收度情况下的应用

Phase sensitive chirped laser dispersion spectroscopy under high absorbance conditions

物理学报. 2017, 66(12): 120601 <https://doi.org/10.7498/aps.66.120601>

#### 大孔径空间外差干涉光谱成像技术多谱段成像仿真

Simulation of multiband imaging technology of large aperture spatial heterodyne imaging spectroscopy

物理学报. 2018, 67(23): 234205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180943>

#### 基于多普勒非对称空间外差光谱技术的多普勒测速仿真

Simulation of Doppler velocity measurement based on Doppler asymmetric space heterodyne spectroscopy

物理学报. 2018, 67(14): 140703 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180063>

## 基于多光束混合外差干涉的相位增强技术研究\*

孔新新<sup>1)2)3)</sup> 张文喜<sup>2)3)</sup>† 才啟胜<sup>2)3)</sup> 伍洲<sup>2)3)</sup> 戴玉<sup>2)3)</sup> 相里斌<sup>2)</sup>

1) (北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

2) (中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094)

3) (中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

(2020年2月25日收到; 2020年6月7日收到修改稿)

激光外差干涉测量技术是微振动探测的重要手段, 随着微纳应用的拓展, 人们对精密测量系统的相位检测灵敏度提出了更高的要求. 传统提高测量灵敏度的方法有优化外差干涉系统方案、改进相位重建算法和降低关键器件噪声等. 本文提出了一种多光束混合干涉的相位增强方法, 经过理论推导和实验验证得到如下近似条件: 校正光与信号光的初相位相差  $\pi$  rad 情况下, 两光束的功率越接近, 系统对目标的弱振动振幅响应越大. 实验设计的两光束功率相差 1% 时, 观察到了最大 146 倍的增强效果, 该方法在微振动物体高灵敏度测量上具有较大的应用价值, 在现有器件指标和相位解调算法不变的基础上可大幅提高外差干涉测量系统的探测能力.

**关键词:** 外差干涉, 激光多普勒效应, 相位增强, 混合干涉

**PACS:** 06.20.DK, 06.20.-f, 85.60.-q

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200281

## 1 引言

激光多普勒测振仪 (LDV Laser Doppler Vibrometer) 可测量振动目标的位移、速度和加速度等参量, 具有非接触、高精度和远距离的特点, 在轻薄目标、不易接触和不易靠近等特殊工作环境的振动测量中具有较大优势<sup>[1-5]</sup>. 随着被测目标表面粗糙度的增加、目标表面漫反射率的减小或测量距离的增大, 系统收集的激光能量会迅速下降, 在极端情况下甚至出现回波激光功率小于系统固有杂散光功率的情况, 此时系统杂散光会严重影响微振动目标的探测, 一方面会降低测振仪的测量准确度, 另一方面会影响测振仪对微振动目标的探测能力<sup>[6-12]</sup>. 特别地, 超精密仪器制造、MEMS 微机电系统加工和引力波探测等前沿领域中的近距离、合作微振动目标的探测, 要求测量系统达到皮米量级

的测量精度<sup>[13-20]</sup>.

针对高灵敏探测需求和系统杂散光带来的影响, 研究人员提出了多种解决方法. Cheng 等<sup>[21]</sup>提出一种光学细分的方法, 利用测量镜和参考镜之间多次反射, 实现 8 通道干涉测量, 将常规商业干涉仪的测量灵敏度提高了 4 倍, 在 500 mm 量程下达到了 1.24 nm 的测量精度. Lawall 等<sup>[22]</sup>提出采用空间分离的方法抑制共轴杂散光, 有效降低系统的非线性误差, 在 1 mm 量程下实现了 10 pm 的测量精度. Hu 等<sup>[23]</sup>发现高精度干涉仪产生周期误差的新机制, 提出多阶光束规划的杂散光抑制方法, 进一步提高了测量精度, 在 100 mm 量程下将系统周期误差控制在 0.63 nm. Yarovoi 等<sup>[24]</sup>系统推导了杂散光的影响, 开展了理论仿真和试验研究, 对于杂散光引起的周期噪声和冲击噪声进行量化分析, 但并未对增强方法进行展开分析, 后续人们主

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61605217).

† 通信作者. E-mail: zhangwenxi@aoe.ac.cn

要针对如何降低系统杂散光的影响进行研究. Kong 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于四波混合干涉的激光外差干涉系统杂散光抑制方法, 通过调制校正光的功率和相位, 当校正光与杂散光的功率一致且初相位差为  $\pi$  rad 条件下, 可显著降低系统杂散光的影响. 本文借鉴四波混合抵消干涉的思想, 探索多光束混合增强干涉的相关研究.

本文针对微振动高灵敏的探测需求, 提出了多光束外差干涉的相位增强技术, 在研究多光束干涉的基础上, 发现了可控的多光束干涉可以实现系统探测能力的大幅提升, 详细推导了相位增强的物理机制和近似条件, 分析了在近似条件下解调振幅与调制振幅、校正光功率和校正光初相位等因素的量化关系, 为微振动目标的增强探测提供了技术参考.

## 2 多光束外差干涉理论分析

典型激光外差干涉测振系统的原理如图 1 所示<sup>[6]</sup>.

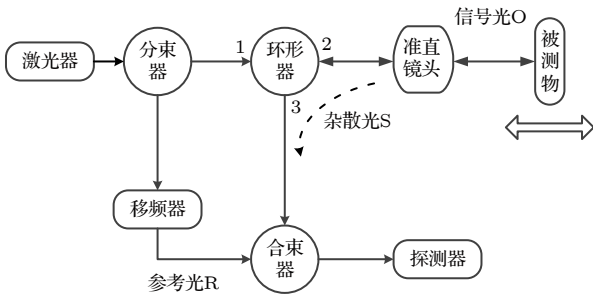


图 1 典型激光外差干涉测振系统

Fig. 1. Typical laser heterodyne interference vibration measurement system.

激光经过分束器 1、移频器和合束器 1 后作为参考光 R 进入光电探测器, 移频器利用布拉格超声衍射实现激光的频率调制, 可实现干涉系统的高信噪比交流探测. 分束器 1 的另一束激光进入环形器端口 1, 环形器端口 2 出射激光经准直镜头照射到被测物上, 被测物漫反射的激光通过准直镜头收集再次进入环形器端口 2, 然后经环形器端口 3 输出进入合束器 1, 最后作为信号光 O 进入探测器.

被测物运动会入射激光产生多普勒频移, 回波信号与参考光进行干涉可得到被调制的外差干涉信号, 通过对外差干涉信号的下变频解调, 结合正交变换可得到多普勒相位信息, 进而得到物体的运动信息. 理想的外差干涉表达式为<sup>[1,2]</sup>

$$I(t) = \left| A_0 e^{i[\omega t + \varphi(t)]} + A_R e^{i(\omega + \omega_0)t} \right|^2 = A_0^2 + A_R^2 + 2A_0 A_R \cos[\omega_0 t - \varphi(t)], \quad (1)$$

其中,  $A_0$  和  $A_R$  分别为信号光和参考光的振幅,  $\omega$  和  $\omega_0$  分别为激光角频率和外差调制角频率,  $\varphi(t)$  是由于目标振动引起信号光的相位变化.

由于器件工艺等因素的限制, 系统发射光路中环行器和准直镜头等光学器件表面会发生后向的反射, 同时光学器件内部杂质和粗糙光学表面会产生各种散射, 为简化推导, 将多种反射和散射光混合成系统杂散光 S 进行表示. 因此, 实际系统的外差干涉表达式将改变为

$$I(t) = \left| A_0 e^{i[\omega t + \varphi(t)]} + A_R e^{i(\omega + \omega_0)t} + A_S e^{i[\omega t + \varphi_S]} \right|^2 = A_0^2 + A_R^2 + A_S^2 + 2A_0 A_R \cos[\omega_0 t - \varphi(t)] + 2A_0 A_S \cos[\varphi_S - \varphi(t)] + 2A_R A_S \cos[\omega_0 t - \varphi_S]. \quad (2)$$

其中,  $A_S$  为杂散光振幅,  $\varphi_S$  为杂散光初相位. 对 (2) 式进行带通滤波, 虽然 (2) 式中的  $2A_0 A_S \cos[\varphi_S - \varphi(t)]$  为时变信号, 但此处分析的目标振动信号一般为低频信号, 其频率范围落在带通滤波器的抑制频段内, 因此  $2A_0 A_S \cos[\varphi_S - \varphi(t)]$  被抑制掉了, 则 (2) 式经带通滤波后可简化为

$$I_B(t) = \text{BPF}[I(t)] = 2A_0 A_R \cos[\omega_0 t - \varphi(t)] + 2A_R A_S \cos[\omega_0 t - \varphi_S] = 2A_R \{ [A_0 \cos \varphi(t) + A_S \cos \varphi_S] \cos \omega_0 t + [A_0 \sin \varphi(t) + A_S \sin \varphi_S] \sin \omega_0 t \} = 2A_R \sqrt{A_0^2 + A_S^2 + 2A_0 A_S \cos[\varphi(t) - \varphi_S]} \times \cos[\omega_0 t - \phi(t)], \quad (3)$$

其中, BPF 表示带通滤波器, 滤波器中频为  $\omega_0$ , 滤波器带宽覆盖  $\varphi(t)$  的频率范围, (3) 式中的  $\phi(t)$  满足:

$$\tan \phi(t) = \frac{A_0 \sin \varphi(t) + A_S \sin \varphi_S}{A_0 \cos \varphi(t) + A_S \cos \varphi_S}. \quad (4)$$

对 (3) 式进行正交下变频处理, 结合低通滤波得到两组正交的低频信号, 利用反正切运算即可解调得到  $I_B(t)$  的解调相位为  $\phi(t)$ , 同时利用解调相位结合激光波长可计算出解调振幅:

$$L(t) = \phi(t)\lambda/4\pi, \quad (5)$$

其中  $\lambda$  为激光的波长.

结合 (4) 式可知, 由于杂散光的影响, 解调相

位  $\phi(t)$  与实际相位信号  $\varphi(t)$  存在非线性关系, 因此对应的解调振幅也会受到非线性的影响. 在满足如下近似条件下, 可将 (4) 式进一步化简.

$$\varphi(t) \rightarrow \varepsilon_1, \quad (6)$$

$$\varphi_S = \pi, \quad (7)$$

$$A_S = A_0 + \varepsilon_2, \quad (8)$$

其中  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  为有限小量, 将 (4) 式利用泰勒展开可化简成如下形式:

$$\begin{aligned} \tan \phi(t) &= \frac{A_0 \sin \varphi(t) + A_S \sin \varphi_S}{A_0 \cos \varphi(t) + A_S \cos \varphi_S} \\ &= \frac{A_0 \sin \varphi(t)}{A_0 [\cos \varphi(t) - 1] - \varepsilon_2} \\ &\approx \frac{A_0 \varphi(t)}{A_0 \frac{-\varphi^2(t)}{2} - \varepsilon_2} = \frac{-1}{\frac{\varphi(t)}{2} + \frac{\varepsilon_2}{A_0 \varphi(t)}}. \end{aligned} \quad (9)$$

当  $|\varepsilon_1| \ll 1$  且  $|A_0 \varepsilon_1| \ll |\varepsilon_2|$  时, 则 (9) 式可进一步化简为

$$\tan \phi(t) = \frac{-A_0 \varphi(t)}{\varepsilon_2}. \quad (10)$$

当  $|\varepsilon_2/A_0| \ll 1$  时, (10) 式中  $\phi(t)$  受到倒数因子  $\varepsilon_2/A_0$  放大的效应, 可实现相位增强的效果, 接下来将结合近似推导结论和数值仿真进行增强效果的量化分析.

结合外差干涉原理和上述公式推导构建一个模拟的外差干涉测量系统, 利用 Matlab 软件进行仿真分析. 首先采用 (2) 式产生量化的时域干涉载波信号, 其中含有载波频率 50 kHz 和目标频率 1 kHz, 然后利用 (3) 式的带通滤波进行交流信号提取, 进而利用正交解调算法得到激光多普勒相位值, 最后利用 (5) 式得到目标的振幅. 设定激光波长为 1550 nm, 信号光功率为 1 nW (此处为设定值, 仅做后续杂散光和校正光功率的相对参考, 忽略探测量子效率和探测噪声的影响), 目标以振幅为 10 nm、频率为 1 kHz 作简谐运动, 杂散光初相位为 0 rad, 图 2 展示了不同杂散光功率对解调振幅的影响.

当系统不存在杂散光时, 测量结果如图 2 中短虚线所示, 解调振幅为 10 nm, 信号频率为 1 kHz, 结果符合给定目标的振动情况. 当杂散光功率为 1 nW 时, 测量结果如图 2 中长虚线所示, 信号频率不变, 解调振幅降至 5 nm. 当杂散光功率为 10 nW 时, 解调出的曲线如图 2 中实线所示, 信号

频率不变, 解调振幅降至 2.4 nm. 经过上述分析, 由于杂散光的存在, 系统的解调振幅受到一定的抑制. 为不失一般性, 图 3 给出了杂散光功率对解调振幅的影响曲线, 仿真中设定杂散光初相位为 0 rad 和  $\pi$  rad. 同时利用 (10) 式进行了解调振幅与杂散光功率的量化计算, 如图 3 中圆圈表示.

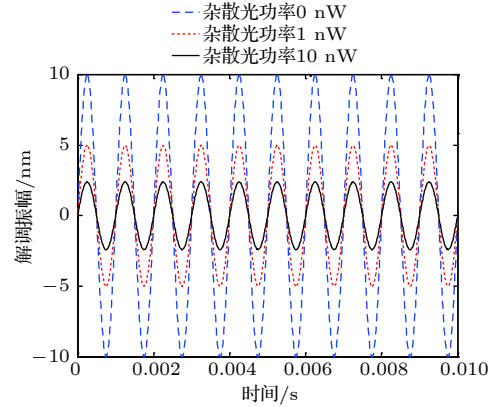


图 2 杂散光对解调振幅的影响

Fig. 2. Influence of stray light on demodulation amplitude.

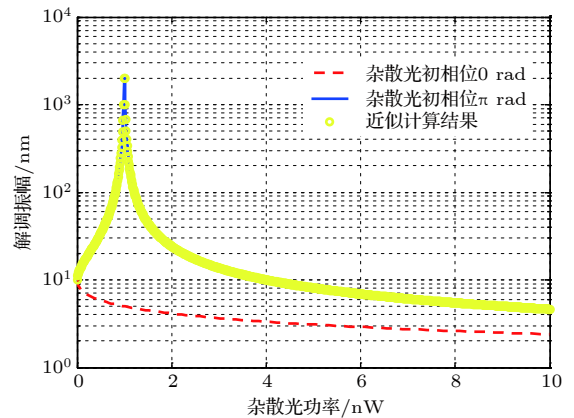


图 3 杂散光功率对解调振幅的影响曲线

Fig. 3. Influence curve of stray light power on demodulation amplitude.

由图 3 可知, 当杂散光初相位为 0 rad 时, 随着杂散光功率的增加, 解调振幅呈非线性下降趋势, 因此系统杂散光的存在严重影响了系统的探测能力. 当杂散光初相位为  $\pi$  rad 时, 解调振幅随着杂散光功率的变化成倒数曲线分布, 与 (10) 式的近似计算结果一致, 如图 3 中圆圈标记所示. 图 3 中峰值处杂散光功率为 1.01 nW 时, 解调振幅达到 2  $\mu$ m, 可实现 200 倍的增强效果.

同时注意到上述仿真都是基于特定的杂散光初相位, 为不失一般性, 仿真分析了在固定杂散光



功率下,不同杂散光初相位对解调信号的影响,结果如图4所示。

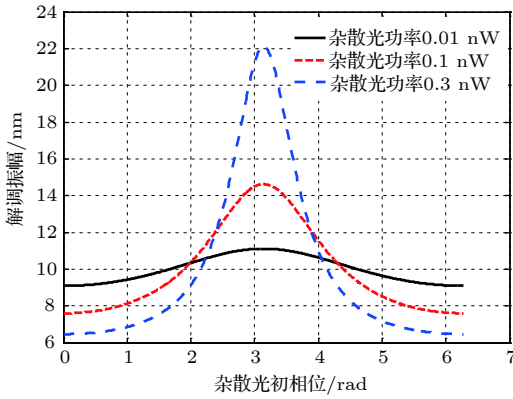


图4 杂散光初相位对解调振幅的影响曲线

Fig. 4. Influence curve of initial phase of stray light on demodulation amplitude.

由图4可知杂散光的初相位同样会对解调振幅产生非线性的调制,总结规律可知当杂散光初相位在 $\pi$  rad附近时会增强解调振幅,当杂散光初相位在0 rad和 $2\pi$  rad附近时会抑制解调振幅,这与(7)式的近似条件结论一致。

由于上述分析均建立在杂散光的基础上,但系统杂散光功率和初相位一般是未知且不可控的,难以满足上述苛刻的近似条件,因此在第3节设计了替代的校正光路,目的不是为了解决系统杂散光的问题,而是分析可控的校正光是否能为增强探测提供可能,开展了仿真分析和初步实验研究。

### 3 三波混合增强技术研究及实验分析

根据上述章节的推导和仿真分析,设计了如图5所示的三波混合外差干涉光路,在图1的基础上增加了一束校正光C,如图5中虚线框内所示,合理地控制校正光的功率和相位,开展相位增强的试验研究。

校正光C由分束器2分出,经功率调制和相位调制后通过合束器2进入外差干涉系统,此时外差干涉表达式可表示为

$$I(t) = \left| A_O e^{i[\omega t + \varphi(t)]} + A_R e^{i(\omega + \omega_0)t} + A_S e^{i[\omega t + \varphi_S]} + A_C e^{i[\omega t + \varphi_C]} \right|^2, \quad (11)$$

其中,  $A_C$  为校正光振幅,  $\varphi_C$  为校正光初相位。

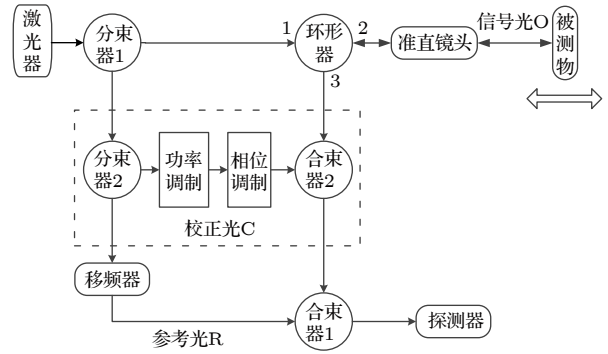


图5 三波混合干涉外差干涉测振系统

Fig. 5. Three-wave hybrid interference heterodyne interference vibration measurement system.

针对合作目标微振动探测过程中,信号光、参考光和校正光均功率可控且能保证远大于杂散光的功率,即

$$A_O \approx A_R \approx A_C \gg A_S. \quad (12)$$

因此在实际应用中可采用强信号光功率和强校正光功率的工作模式,两光束功率与参考光功率相当,构造可控三光束外差干涉系统.为验证三光束混合干涉的相位增强技术,按照图5搭建了实验装置,开展了三光束外差干涉实验,如图6所示.为了降低不可控杂散光的影响,采取了强信号光、强参考光和强校正光的工作模式,设计校正光功率比杂散光功率高3个数量级以上,因此杂散光对测量结果的影响可忽略。

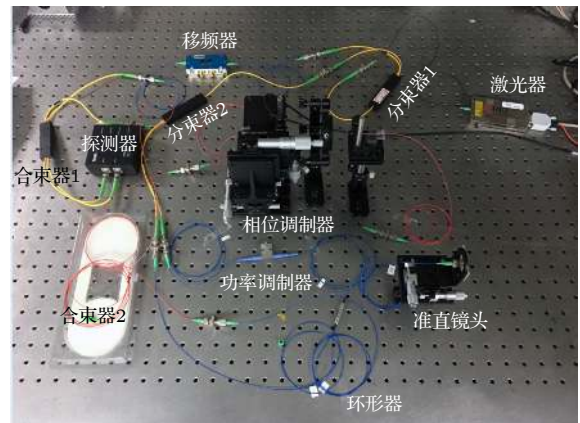


图6 三光束外差探测实验结构

Fig. 6. Experimental structure of three-wave heterodyne detection.

三光束外差探测实验采用光纤分光和合束的光路形式,最大程度降低空间光路的激光重合度和夹角对干涉效率的影响.光源采用波长为1550 nm的窄线宽光纤激光器,参考光路的移频调制采用两

级移频低差频模式, 上移频 40.05 MHz 然后下移频 40 MHz, 这样可产生 50 kHz 的外差载波频率, 根据奈奎斯特采样定理可知, 较低的载波频率可以降低后端采样频率的需求. 信号光路采用光纤环形器实现收发分离. 校正光路分别采用强度调制器 (VOA50 PM-APC) 和相位调制器 (LCC25、LCC-1413-C) 实现光功率和初相位的调制. 信号光路与校正光路首先经过合束器 2 进行混合, 再与参考光路合束进入合束器 1, 合束器 1 的输出端连接光电探测器 (PDB450 C-AC), 采用平衡探测方式降低共模强度噪声.

光路中参考光功率设置为  $10 \mu\text{W}$ , 信号光路通过反射镜反射回波, 准直镜头与反射镜的距离为 3 m, 信号光功率控制在  $10 \mu\text{W}$ , 校正光路通过功率调制器和相位调制器进行功率和相位调节, 校正光功率控制在  $9.9 \mu\text{W}$ , 相位调制器实现  $0-2\pi$  rad 遍历扫描. 目标反射镜利用被动激励的形式, 受到 800 Hz 的单频声源激励, 产生纳米量级振幅的微振动. 光束干涉后经光电探测和数字采集后采用正交解调方法实现目标反射镜振动数据的反演. 图 7 为未加校正光情况下的目标振幅反演结果, 采集并分析了三组实验数据.

图 7 左侧 3 幅图分别为 3 次实验的解调振幅

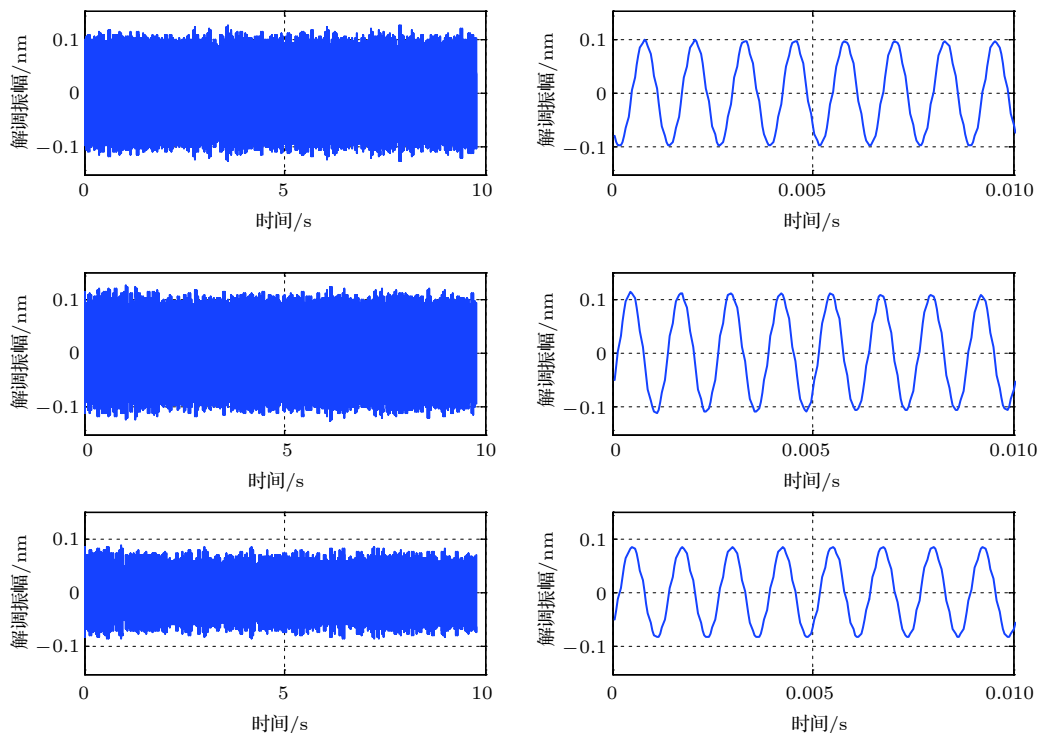


图 7 无校正光下两光束干涉实验数据

Fig. 7. Interference data without corrected light.

反演结果, 数据采集时间为 10 s, 由于环境振动和光纤抖动等因素影响, 解调振幅并不是理想的正弦信号, 长时间幅值具有一定的抖动, 但解调振幅均在 0.1 nm 附近. 图 7 右侧 3 幅图分别是左侧对应数据的时间维局部拉伸, 观察可知 800 Hz 单频信号的信噪比较高, 短时周期的信号质量和多次试验的一致性均较好.

图 8 为有校正光情况下的三光束干涉实验结果, 开展了多次实验以验证增强效果的可行性, 图 8(a) 为校正光的初相位随时间变化的曲线, 以步进的形式在 10 s 时间内遍历  $0-2\pi$  rad, 多次实验的解调振幅结果如图 8(b)、图 8(c) 和图 8(d) 所示.

多次实验均在校正光相位调整的过程中同步采集了 10 s 的实验数据, 图 8(b) 为系统反演的解调振幅, 发现在 4.48 s 处出现了明显增强的现象, 于是将其中的  $0-0.01$  s 和  $4.48-4.49$  s 的数据进行时域拉伸显示, 分别如图 9(a) 和图 9(b) 所示, 两个时间段内的最大振幅分别为 0.058 nm 和 8.478 nm, 解调振幅提高了 146 倍. 同样针对图 8(c) 和图 8(d) 的数据进行计算, 解调振幅分别提高了 87 倍和 72 倍, 实验结果基本符合三光束理论推导和仿真结果.

通过实验可以发现, 多次实验的解调振幅放大

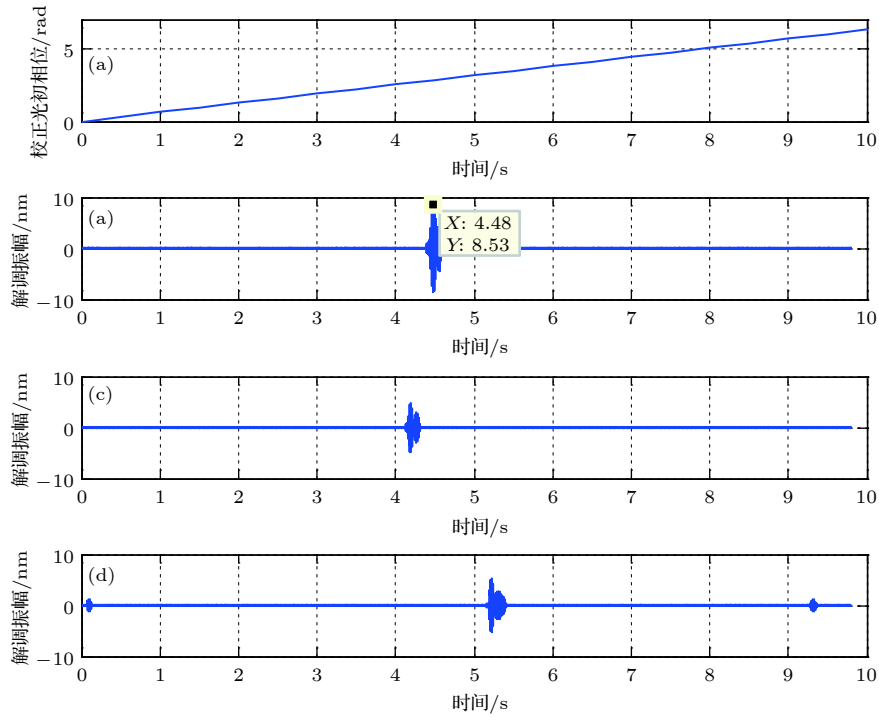


图 8 三光束混合干涉试验数据  
Fig. 8. Three-wave mixed interference data.

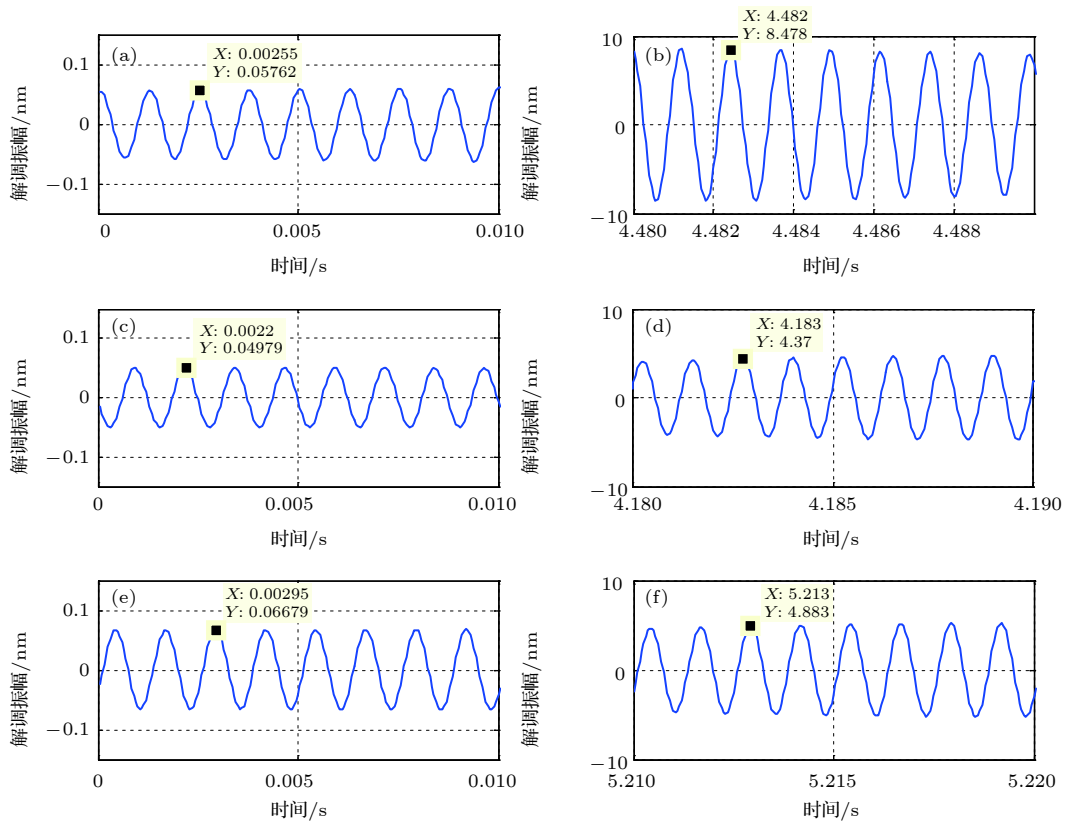


图 9 试验数据拉伸显示  
Fig. 9. Test data tensile display.

倍数差异较大, 主要是由于远距离回波信号光的功率受环境影响而变化, 导致放大因子  $\varepsilon_2/A_0$  不稳定, 因此如何监测回波功率并实时调节校正光功率, 是实现稳定放大的前提条件; 同时注意到 3 次实验的增强时刻分别是 4.48, 4.18, 5.21 s, 并未出现在同一时刻, 主要是由于远距离回波信号光的相位受环境影响随时间变化, 导致校正光和信号光的初相位差为  $\pi$  rad 时, 出现在较为随机的位置, 因此如何监测回波相位并实时调整校正光相位也是实现稳定放大的必要条件. 由于实测结果与理论分析结果存在偏差和时域变化扰动, 后续将通过共光路传输、减小工作距离和降低环境干扰等手段提高实验的准确性; 同时寻找闭环自适应调整的技术方案, 例如以载波信号峰峰值为判断依据, 通过合理的调制校正光的功率和相位保证载波信号峰峰值锁定在一个固定值, 是实现稳定放大输出的一种技术途径.

## 4 结 论

本文提出一种基于多光束混合外差干涉的相位增强方法, 开展了相位增强理论推导、数值仿真和实验分析, 初步验证了该方法的有效性.

研究发现, 在三光束混合干涉情况下, 当合理控制校正光的功率和初相位, 可实现解调相位几个数量级的增强, 其近似条件可总结为: 校正光与信号光的初相位相差  $\pi$  rad 情况下, 两光束的功率越接近, 系统对目标的振动振幅响应越大. 实验设计的两光束功率相差 1% 时, 观察到了最大 146 倍的增强效果, 基本符合理论分析结果, 该方法可用于微振动目标的高灵敏度探测. 同时该近似条件会造成外差载波信号的调制度下降, 给光电探测和数据采集造成了一定压力, 因此在近似条件的具体选择时需综合考虑其相位增强能力和系统探测采集能力, 实现高灵敏外差干涉探测系统的优化设计.

## 参考文献

- [1] Castellini P 2006 *Mech. Syst. Signal Pr.* **20** 1265
- [2] George W.K., Lumley J.L 1973 *Fluid Mech.* **60** 321
- [3] Sriram, S. Hanagud, J. I. 1992 *Modal Anal.* **7** 169
- [4] Baker J R, Laming R I, Wilmshurst T H 1990 *Opt. Laser Technol.* **22** 4 241
- [5] Brunet A R, Turon P, Lacoste F. A 1985 *Proc. SPIE Optics in Engineering Measurement* **599** 391
- [6] Kong X X, Xiang L B, Zhang W X, Wu Z, Zhang D D 2019 *Proc. SPIE Security Defence* **111600** 1
- [7] Yuichi F, Daisuke, Tomohiro K, Toyohiko Y 2010 *Opt. Lett.* **35** 101548
- [8] He Y Z, Zhao S J, Wei H Y, Li Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 060601 (in Chinese) [贺寅竹, 赵世杰, 尉昊赞, 李岩 2017 物理学报 **66** 060601]
- [9] Jackson D A, Posada-Roman J E, Garcia-Souto J A 2015 *Ele. Lett.* **51** 1100
- [10] Aranchuk V, Aranchuk I, Carpenter B, Hickey C 2019 *OSA Laser Con.* **4** 1
- [11] Li Y L, et al. 2018 *OSA CLEO* **5** 1
- [12] Du J, Yang N, Li J L, Qu Y C, Li S M, Ding Y H, Li R 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 064204 (in Chinese) [杜军, 杨娜, 李峻灵, 曲彦臣, 李世明, 丁云鸿, 李锐 2018 物理学报 **67** 064204]
- [13] Liu Y R 2016 *M. S. Thesis* (Hangzhou: China Jiliang University) (in Chinese) [刘亚睿 2016 硕士学位论文 (杭州: 中国计量大学)]
- [14] Dang W J 2015 *Ph. D. Dissertation* (Xian: Xidian University) (in Chinese) [党文佳 2015 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [15] Ken Y, Fumiya N 2017 *Micro. opt. Conference* **1** 48
- [16] Zhao J L 2016 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [赵金龙 2016 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [17] Hossam K, Dongkyu K, Joonsik N, Kyihwan P 2016 *Measurement* **94** 883
- [18] Wu Z, Zhang W X, Xiang L B, Li Y, Kong X X 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 020601 (in Chinese) [伍洲, 张文喜, 相里斌, 李杨, 孔新新 2018 物理学报 **67** 020601]
- [19] Yan C H, Wang T F, Zhang H Y, Lv T, Wu S S 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 234208 (in Chinese) [晏春回, 王挺峰, 张合勇, 吕韬, 吴世松 2017 物理学报 **66** 234208]
- [20] Paul K, Flügge J, Weichert C 2012 *Meas. Sci. Technol.* **25** 1
- [21] Cheng Z G 2006 *Appl. Opt.* **45** 2246
- [22] Lawall J 2000 *Rev. of Sci. Instr.* **71** 2669
- [23] Hu P C. 2017 *Opt. Exp.* **25** 3605
- [24] Yaravoi L, Siegmund G 2004 *Meas. Sci. Technol.* **15** 2150



# Multi beam hybrid heterodyne interferometry based phase enhancement technology\*

Kong Xin-Xin<sup>1)2)3)</sup> Zhang Wen-Xi<sup>2)3)†</sup> Cai Qi-Sheng<sup>2)3)</sup> Wu Zhou<sup>2)3)</sup>  
Dai Yu<sup>2)3)</sup> Xiang Li-Bin<sup>2)</sup>

1) (*College of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*)

2) (*Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

3) (*Aerospace Information Innovation Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

( Received 25 February 2020; revised manuscript received 7 June 2020 )

## Abstract

Laser Doppler vibrometer can measure the displacement, velocity, acceleration and other parameters of vibration target. It has the characteristics of non-contact, high precision and long distance. So, it has a great advantage for the vibration measurement in a special working environment, where the target is light and thin, hard to contact, hard to approach. Laser heterodyne interferometry is an important means of detecting the micro vibration. With the development of micro vibration application, the sensitivity of phase measurement is highly required. Traditionally, there are several ways of improving the measurement sensitivity, such as optimizing the heterodyne interference scheme, improving the phase reconstruction algorithm and reducing the noise of key devices and so on. However, based on the analysis of the influence of stray light in the system, it is found that the controllable multi-beam interference can greatly improve the detection capability of the system. Therefore, a phase enhancement technique of multi-beam hybrid interference is proposed to meet the needs of high sensitivity detection of micro vibration. In this paper the physical mechanism and boundary conditions of phase enhancement are investigated in detail, and the quantitative relationship between the boundary conditions and phase enhancement is also analyzed thereby providing a technical reference for the enhancement detection of micro vibration targets. Through the numerical simulation and experimental verification, the following boundary conditions are obtained: the initial phase difference between the correction light and the signal light is  $\pi$  rad and the closer the power values of the two beams, the greater the enhancement effect of the demodulation phase is. The power difference between the two beams designed in the experiment is 1%, which means that detection capability is enhanced by 146 times. It has great application value in the high sensitivity measurement of micro vibration objects. This technology can also enhance the detection capability of heterodyne interference measurement system without changing the existing device index or phase demodulation algorithm.

**Keywords:** heterodyne interferometry, Laser Doppler effect, phase enhancement, hybrid interferometry

**PACS:** 06.20.DK, 06.20.-f, 85.60.-q

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200281

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61605217).

† Corresponding author. E-mail: [zhangwenxi@aoe.ac.cn](mailto:zhangwenxi@aoe.ac.cn)