

文章编号 1004-924X(2026)13-1993-10

双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉 微位移测量系统

朱 浩, 焦明星*, 杨奕佳, 李广涛, 寇 科, 刘 芸, 邢俊红
(西安理工大学 光电科学与智能仪器学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了提高条纹计数法激光自混合干涉位移测量的分辨率, 设计了一种双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉微位移测量系统。该系统可以输出两路相位相反的自混合干涉信号, 采用最优阈值方法对其进行细分, 以获得具有 $\lambda/8$ 分辨率的可计数特征点, 并通过三次样条插值方法重构被测位移。探究了双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉特性及微位移测量误差, 实验结果表明, 当测量靶镜以频率为 3~9 Hz、振幅在 2~11 μm 内周期振动时, 微位移测量误差在 96~105 nm 内变化, 相应的平均测量误差为 100.2 nm, 平均相对误差为 1.98%。这种双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉微位移测量系统设计方案简单可行, 具有广阔的应用前景。

关 键 词: 光纤激光器; 激光自混合干涉; 双波长单纵模; 条纹细分; 微位移测量

中图分类号: TN242; TN249 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20263413. 1993 **CSTR:** 32169. 14. OPE. 20263413. 1993

Micro-displacement measurement system using dual-wavelength single-longitudinal-mode ytterbium-doped fiber laser self-mixing interference

ZHU Hao, JIAO Mingxing*, YANG Yijia, LI Guangtao, KOU Ke, LIU Yun, XING Junhong

(School of Optoelectronic Science and Intelligent Instrumentation, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710048, China)

* Corresponding author, E-mail: 2237663196@qq.com

Abstract: In order to improve the resolution of the laser self-mixing interference displacement measurement based on the fringe counting method, a micro-displacement measurement system using the dual-wavelength single-longitudinal-mode (DWSLM) ytterbium-doped fiber laser self-mixing interference has been designed, which can output two self-mixing interference signals with opposite phases. An optimal threshold method is used for subdividing the signals to extract the countable feature points with a resolution of $\lambda/8$, and the measured displacement is then reconstructed by employing the cubic spline interpolation method. The self-mixing interference characteristics of the DWSLM ytterbium-doped fiber laser and the micro-displacement measurement errors have been investigated experimentally. The experimental results have indicated that when the target mirror vibrates periodically with a frequency range from 3 Hz to 9 Hz

收稿日期: 2026-04-08; 修订日期: 2026-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51875455, No. 52575640)

and an amplitude range from 2 μm to 11 μm , the micro-displacement measurement error varies within a range from 96 nm to 105 nm, corresponding to an average measurement error of 100.2 nm, and the average relative error is 1.98%. Such a micro-displacement measurement system using the DWSLM ytterbium-doped fiber laser self-mixing interference is simple and feasible, which has a broad application prospect.

Key words: fiber laser; laser self-mixing interference; dual-wavelength single-longitudinal-mode; fringe subdivision; micro-displacement measurement

1 引言

微位移测量技术广泛应用于精密工程测量、高端装备制造及材料科学等领域^[1-5],其重要性日益凸显。作为实现高精度位移测量的关键技术之一,激光自混合干涉测量具有结构简单、易于准直与非接触测量等优点,因此成为研究热点^[6-12]。

自混合干涉测量不受限于激光器类型,常用的激光器包括半导体激光器^[12]、光纤激光器^[13-14]等。双波长单纵模光纤激光器是在多波长激光器的基础上发展起来的一种新型双频光纤激光器,可以产生正交线偏振双频激光输出。相较于传统单波长半导体激光,它能够在 SMI 系统中产生两路相位相反的干涉条纹信号,并包含了比单路信号更丰富的运动信息。其单纵模特性使得光源具有极窄的线宽和优异的相干性^[15],确保了在更长测量距离下依然能获得高信噪比的干涉条纹,为激光自混合干涉测量系统提供了理想光源。

目前,激光自混合干涉位移测量方法主要可分为三类:拍频测量法、相位调制测量法和条纹计数法。其中,拍频测量法通过将微小相位变化转换为拍频信号的频率变化进行检测,而光频变化量与目标物体的振动位移线性相关。该方法具有极高的测量灵敏度和精度,但由于受测量光频率变化的影响,一般测量范围小于半波长振动位移。Chen 等^[16]提出一种基于迈克尔逊结构的合成波自混合干涉仪,成功观测到了两路正交偏振自混合干涉信号及其相位差周期变化,证明了其纳米级的位移测量能力。为了提高测量精度,突破半波长测量限制,研究人员提出了激光自混合干涉相位调制测量法,通过对调制后的干涉信号进行算法解调来得到纳米级精度的振动位移

重构信号。然而,该方法通常需引入调制和解调单元,不能有效应对受噪声干扰的调制信号解调工作,从而使其应用受到了一定限制。Dong 等^[17]提出一种基于相位延迟的位移重构技术,通过在外腔中引入 $\pi/2$ 的相位延迟,对两个自混频信号进行正交解调以重建外部物体的位移,重建位移的绝对误差小于 75 nm。Li 等^[18]提出一种基于楔形结构的正交相位检测激光干涉仪,即在激光外腔中插入一个楔形镜,并配合移动光阑位置,可产生具有 $\pi/2$ 相位差的两路自混合干涉信号,再采用相位解包裹方法实现纳米级位移测量。条纹计数法^[19-20]具有结构简单、测量范围大等优点,当被测目标振动时,每移动半个波长位移对应一个自混合干涉条纹,其测量分辨率较低,需要借助条纹细分技术来进一步提高位移测量分辨率。Ding 等^[21]利用双频激光的偏振态竞争来实现高分辨率位移测量,通过设置信号阈值,将一个完整信号周期划分为 4 个连续的偏振状态,从而获得 $\lambda/8$ 的位移细分能力。但该方法依赖固定阈值,在面对信号幅值起伏时难以继续保持最优细分效果。

本文在条纹计数法的基础上,采用双波长单纵模掺镱光纤激光器作光源,设计一种结构简单、不涉及任何复杂计算的自混合干涉微位移测量系统。该系统利用双波长单纵模激光自混合干涉产生的特殊条纹关系,提出了基于最优阈值条纹细分结合位移重构的测量方法,既保持了激光自混合干涉条纹计数法测量范围大的优点,又突破了八分之一波长测量分辨率的限制。

2 原理

2.1 双波长激光自混合干涉效应

根据 Lang-Kobayashi 理论^[22],当发生自混合

干涉时,激光光强与相位的关系为:

$$I(t) = I_0 [1 + \kappa \cos(\phi(t))]. \quad (1)$$

受反馈光影响,光强变化量可表示为:

$$\Delta I(t) = I_0 \kappa \cos(\phi(t)), \quad (2)$$

其中: I_0 为无外部反馈时的光强, κ 表示自混合干涉的调制系数($0 < \kappa \ll 1$)。受激光器参数、目标表面反射率和光耦合效率影响, $\phi(t)$ 为反馈光相对于腔内激光的相位延迟。

两个正交模式的输出强度同时受到外部腔长的调制,外腔长度变化 $\lambda/2$ 对应一个完整波动周期。其往返相位变化可表示为:

$$\phi(t) = \frac{4\pi L_{\text{ext}}(t)\nu}{c}, \quad (3)$$

其中: $L_{\text{ext}}(t)$ 为激光输出耦合镜到运动物体的距离, ν 为激光频率。

$$\Delta I'_1 = \Delta I_1(t) - \Delta I_2(t) = I_{10}\kappa_1 \cos[4\pi L_{\text{ext}}(t)\nu_1/c] - I_{20}\kappa_2 \cos[4\pi L_{\text{ext}}(t)\nu_2/c], \quad (6)$$

$$\Delta I'_2 = \Delta I_2(t) - \Delta I_1(t) = I_{20}\kappa_2 \cos[4\pi L_{\text{ext}}(t)\nu_2/c] - I_{10}\kappa_1 \cos[4\pi L_{\text{ext}}(t)\nu_1/c]. \quad (7)$$

继续推导可得:

$$\Delta I'_1 = -\Delta I'_2. \quad (8)$$

两个正交线偏振激光模式的输出强度受到外腔长度和模式竞争的影响,从而形成一种相位相反的激光强度变化关系。当其中一个模式的激光强度变化时,另一个模式的激光强度会发生相位相反的变化。

2.2 测量原理

本文采用阈值处理方法对两路相位反相的激光自混合干涉条纹信号进行细分,并提取相应的特征点,在获得高分辨率特征点的基础上,采用三次样条插值方法进行位移重构,从而得到被测微位移值。

对采集到的两路相位相反的激光自混合干涉条纹信号分别进行滤波和归一化处理,然后进行细分,以获得高分辨率的特征点,从而提高位移重构精度。假设双波长单纵模掺铒光纤激光器的初始波长分别为 1 063.8 nm 和 1 064.0 nm,腔外光反馈水平参数 $C=0.1$,激光输出耦合器至被测目标的初始外腔长度 $L=0.15$ m,被测目标以 5 Hz 频率、2 μm 振幅做简谐振动,可以仿真得到如图 1 所示的双波长单纵模掺铒光纤激光器自混合干涉条纹。在归一化幅度范围内预设一

双波长单纵模光纤激光器能够产生正交线偏振双频激光输出,两个激光模式共用相同的增益介质,且二者具有相同的往返光程。振荡激光 λ_1 和 λ_2 的光强调制可分别表示为:

$$\Delta I_1(t) = I_{10}\kappa_1 \cos[4\pi L_{\text{ext}}(t)\nu_1/c], \quad (4)$$

$$\Delta I_2(t) = I_{20}\kappa_2 \cos[4\pi L_{\text{ext}}(t)\nu_2/c], \quad (5)$$

其中: I_{10}, I_{20} 分别为振荡激光 λ_1 和 λ_2 无外部光反馈时的光强, $\phi_1(t), \phi_2(t)$ 分别为回馈光 λ_1 和 λ_2 相对于腔内激光的相位延迟。

由于双波长单纵模光纤激光器内存在模式竞争,两个模式激光共享相同的增益。当双频激光同时振荡时,在弱反馈条件下,一个偏振态模式的强度调制会对其垂直偏振态模式产生几乎相等的负面影响^[23-24]。因此,激光 λ_1 和 λ_2 受到的真实强度调制可表示为:

个阈值(图 1 中平行于横轴的水平虚线),当干涉条纹信号强度等于该阈值时记为特征点,以此可对干涉条纹进行细分。通过调节阈值大小,使相邻特征点间隔的方差为最小,从而可以确定最优阈值。一旦最优阈值确定,即可确定用于干涉条纹细分的多个特征点。每当检测到一个特征点时,被测目标靶镜相应地产生 $\lambda/8$ 的微位移,即微位移的测量分辨率达到 $\lambda/8$ 。

采用窗函数解析方法^[25]对双波长单纵模掺铒光纤激光器自混合干涉条纹信号的反向点进行识别,从而获得正确的位移方向信息以实现微位移重构。该窗函数是基于整个信号段特征一次性生成的,仅用于方向判断,其参数是固定的,不随目标运动状态变化。如图 2 所示,对一路自混合干涉条纹信号求微分,所得微分信号的上包络信号 $env_{\text{max}}(t)$ 和下包络信号 $env_{\text{min}}(t)$ 分别由由红、蓝细实线表示(彩图见期刊电子版),上下包络信号能够反映微分信号的上下偏移状况。对上下包络信号取中值,即:

$$med(t) = env_{\text{max}}(t) - \frac{env_{\text{max}}(t) - env_{\text{min}}(t)}{2}. \quad (9)$$

将中值信号的幅值放大 4 倍,可以得到更加直观的反转点两侧极性的变化规律,该信号带有

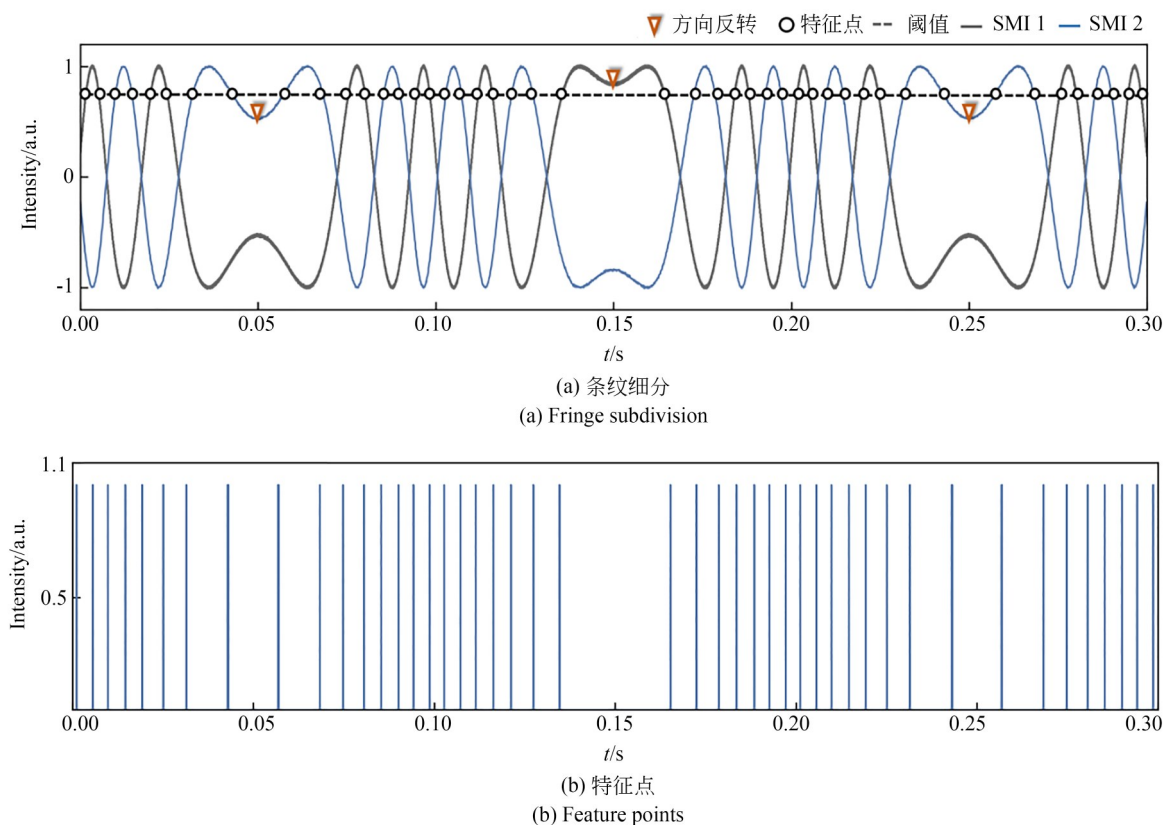


图1 双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉条纹及其细分

Fig. 1 Dual-wavelength single-longitudinal-mode ytterbium-doped fiber laser self-mixing interference fringes and their subdivisions

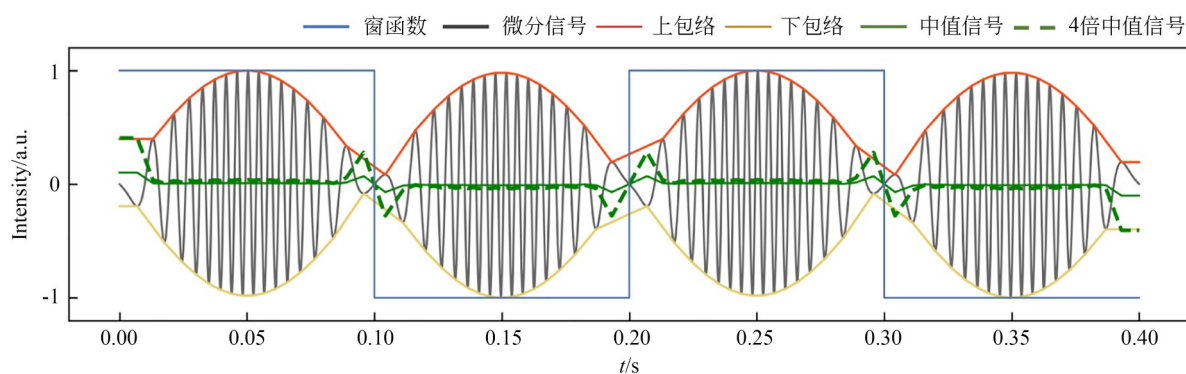


图2 激光自混合干涉信号及其反转点判断

Fig. 2 Laser self-mixing interference signal and its inversion point identification

正确指向性,能够提供可靠的条纹周期定位边界。

根据激光自混合干涉条纹信号携带方向信息的特征点,采用三次样条插值方法重构出被测微位移,得到微位移测量值,并与被测靶镜的参考位移进行比对,获得微位移测量误差。

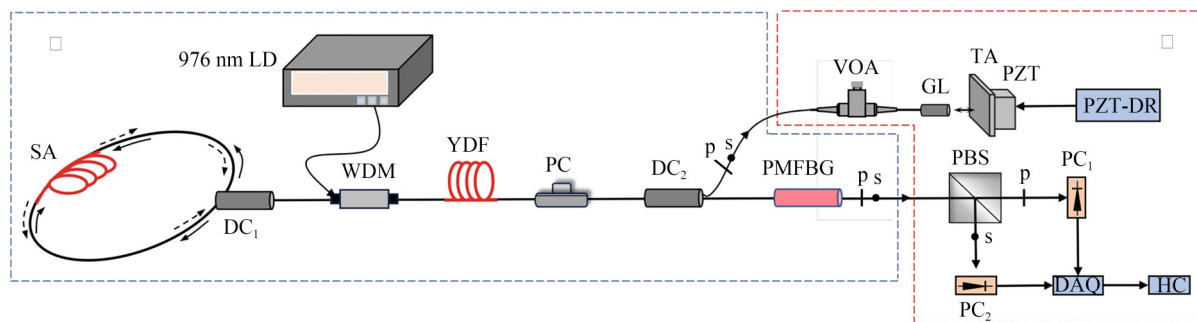
3 测量系统组成

双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉微位移测量系统如图3所示,该系统由激光光源(I)和自混合干涉测量(II)两部分组成。激光光源是一种驻波腔双波长单纵模掺镱光纤激光器,以长度为0.5 m、吸收系数为250

dB/m 的掺镱光纤(YDF)作为激光增益介质,并采用最大输出功率为 500 mW 的 976 nm 半导体激光二极管(LD)对 YDF 进行泵浦;保偏光纤 Bragg 光栅(PMFBG)用作双波长选择元件,其两个 Bragg 反射峰中心波长分别为 1 063.814 nm 和 1 064.096 nm,3 dB 反射带宽均为 0.08 nm;由一个 3 dB 光纤定向耦合器 DC_1 构成 Sagnac 环形反射器,其内接入一段长度为 1.2 m、吸收系数为 80 dB/m 的未泵浦掺镱光纤作为可饱和吸收体(SA)用于激光单纵模选择;PMFBG 与内嵌 SA 的 Sagnac 环形反射器构成激光谐振腔,并通过腔内偏振控制器(PC)调节两种偏振态激光的损耗,从而形成正交线偏振双波长单纵模激光同时振荡输出。该光源采用可饱和吸收体进行选模,虽未直接测量线宽,但采用相同选模技术的文献表明^[26-27],其典型线宽小于 20 kHz,据此保守估计激光器对应的相干长度为 15 km,可完全满足自混合干涉的相干性要求。

在进行自混合干涉微位移测量时,正交线偏

振双波长单纵模激光通过定向耦合器 DC_2 的 10% 端口输出,经过可调光衰减器(VOA)后入射到测量靶镜(TA)的反射表面。由于光纤输出端面距离测量目标非常近,耦合器的尾纤长度加上极小的空气间隙,共同构成了自混合干涉的“外部反馈腔”(实际长度约为 30 cm)。将 TA 固定在 P66. X30S/K 型压电陶瓷(PZT)位移台上以产生高精度微位移振动,PZT 位移台的最大行程为 30 μm ,分辨率为 1 nm;携带 PZT 位移台运动信息的部分反射光返回到光纤激光器的谐振腔内,并与腔内正交线偏振双波长单纵模激光作用而产生自混合干涉,从而对正交线偏振双波长单纵模激光功率进行调制。该调制激光光波由 PMFBG 尾端输出,并被偏振分光棱镜(PBS)分为两路,分别由光探测器 PD_1 和 PD_2 探测两种偏振态激光的自混合干涉信号,PD 的探测带宽为 10 MHz,输出的两路电压信号经过 USB-61210 型数据采集卡采集,并传输至上位机 HC 中进行处理,即可获得被测靶镜的微位移测量结果。



LD: laser diode; WDM: wavelength division multiplexer; YDF: ytterbium-doped fiber; PC: polarization controller; DC: directional coupler; PMFBG: polarization-maintaining fiber Bragg grating; SA: saturable absorber; VOA: variable optical attenuator; GL: gradient lens; TA: target; PZT-DR: piezoelectric transducer-driver; PBS: polarizing beam splitter; PD: photodetector; DAQ: data acquisition; HC: host computer

图 3 双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉微位移测量系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of micro-displacement measurement system based on dual-wavelength single-longitudinal-mode ytterbium-doped fiber laser self-mixing interference

4 实验结果及分析

图 3 为双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉微位移测量实验系统。为了测量由压电陶瓷促动器驱动下的动态微位移,实验主要分为两

个阶段:第一、选取一组频率、峰-峰值作为典型工况,验证系统测量状况;第二、通过 PZT 位移台产生频率与振幅可调的简谐振动,并探究不同振幅或频率下的激光自混合干涉特性及微位移测量误差。

正交线偏振双波长单纵模掺镱光纤激光器的输出波长分别为 1 063.814 nm 和 1 064.096 nm,通过调节光衰减器 VOA,使双波长单纵模掺镱光纤激光器处于弱反馈水平,并以 5 Hz 振动频率、9 μm 峰-峰值的正弦信号驱动 PZT 位移台产生周期振动,使用采样频率为 250 kHz 的数据采集卡实时采集两路激光自混合干涉信号,如图 4 所示。采用截止频率为 800 Hz 的低通滤波器对该信号进行滤波处理,以消除环境噪声等因素的影响,再对其进行归一化处理。双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉微位移测量实验数据

处理及结果如图 5 所示。采用最优阈值细分方法对处理过的干涉条纹信号进行特征点提取,并通过窗函数解析法对运动方向进行判定,得到带有位移方向信息的特征点,如图 5(a)所示。通过三次样条插值方法对所得特征点进行拟合,可以重构出测量靶镜的微位移变化曲线,如图 5(b)所示。其中,虚线为重构的微位移变化曲线,实线为 PZT 工作台产生的已知微位移曲线。以 PZT 位移台的微位移作参考,可以得到微位移测量误差,如图 5(c)所示,其最大绝对误差为 102 nm,相应的最大相对误差为 1.13%。

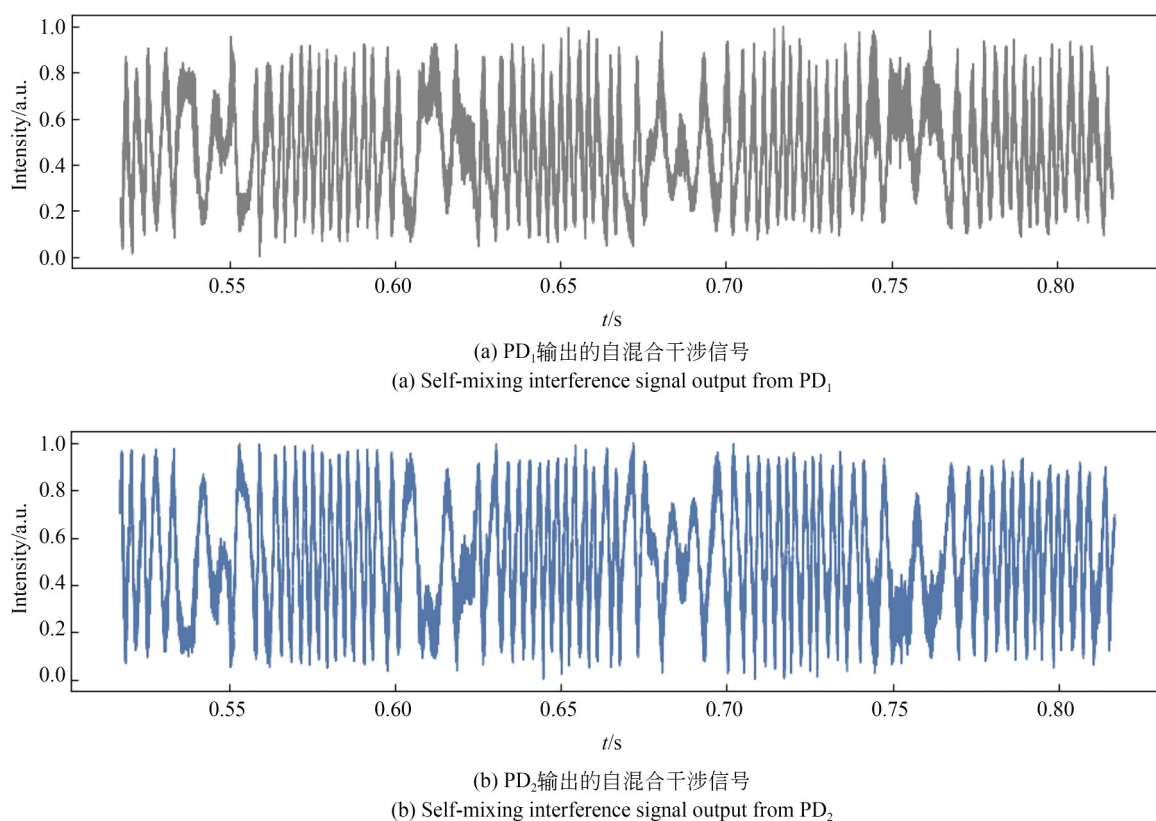


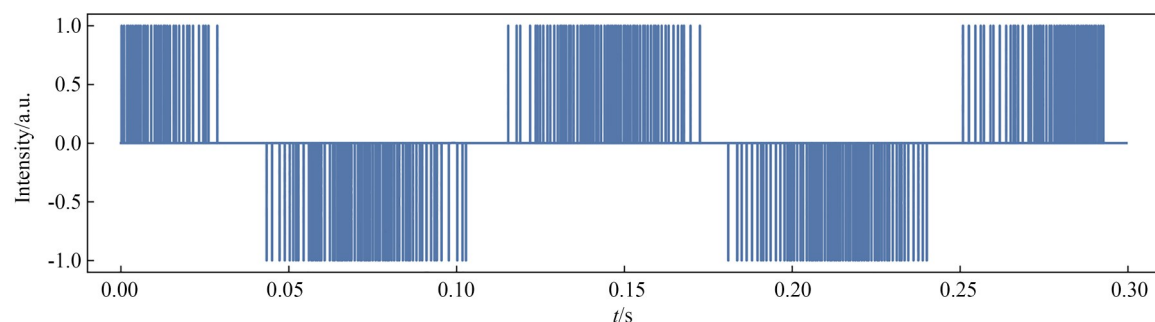
图 4 双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉信号

Fig. 4 Dual-wavelength single-longitudinal-mode ytterbium-doped fiber laser self-mixing interference signals

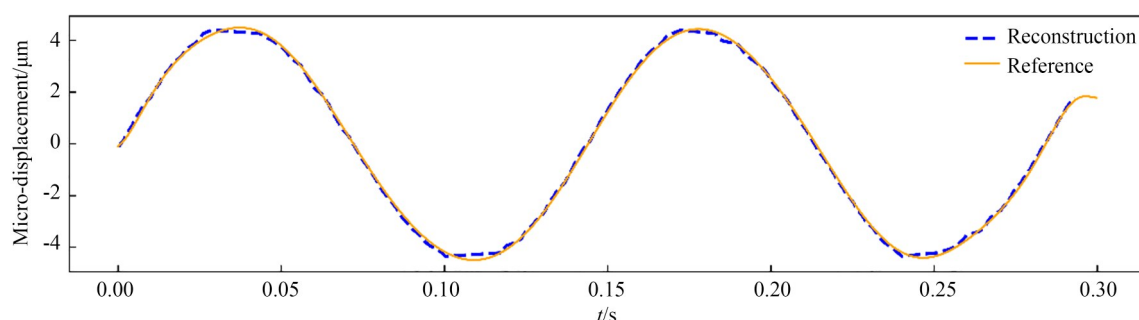
为了进一步说明所提测量方法的可靠性,以 $C=0.1$ 进行重复实验。设定 PZT 位移台的驱动信号频率为 5 Hz,其幅值在 2~11 μm 内以 1 μm 步长进行调节,实验测量靶镜在不同位移条件下的双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉特性,并对相应的微位移进行重构,从而得到微位移测量值及测量误差。微位移测量误差随 PZT 位移台振幅的实验变化规律如图 6 所示。可以看

出,当 PZT 位移台振幅从 2 μm 增加到 11 μm 时,微位移测量误差在 96~105 nm 内变化,其最大变化量为 9 nm,其平均测量误差为 100.2 nm,相应地,微位移测量的相对误差从 4.65% 降至 0.95%。

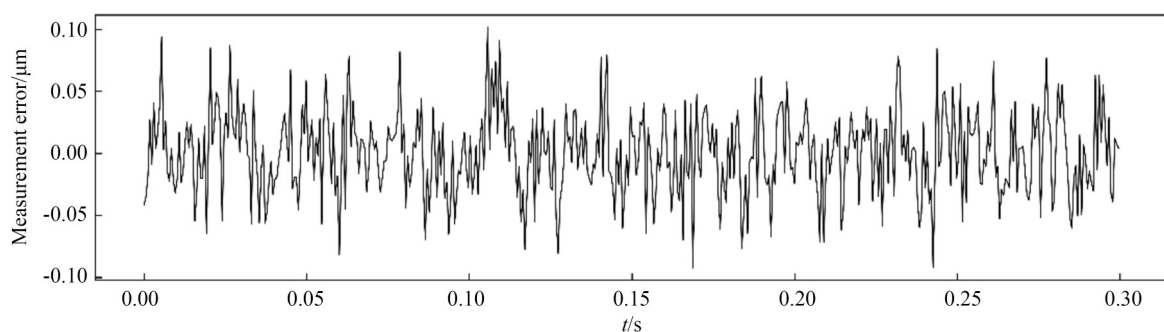
为了探究测量靶镜振动频率对微位移测量系统的影响规律,在保持其他参数不变的条件下,调节 PZT 位移台的驱动信号频率,分别设定多个振



(a) 带方向的特征点
(a) Directional feature points



(b) 微位移重构曲线
(b) Micro-displacement reconstruction curve



(c) 测量误差
(c) Measurement error

图 5 双波长单纵模掺镱光纤激光器自混合干涉微位移测量实验数据处理及结果

Fig. 5 Experimental data processing and results of micro-displacement measurement based on dual-wavelength single-longitudinal-mode ytterbium-doped lasers self-mixing interference

动频率(3,5,7,9 Hz)并依次对 5.0,7.0 和 9.0 μm 峰-峰值微位移进行重复测量,实验获得的微位移测量误差随测量靶镜振动频率的变化情况如图 7 所示。可以看出,当测量靶镜的振动频率从 3 Hz 增加到 9 Hz 时,微位移测量误差在 96~104 nm 内变化,测量误差随频率变化不明显,即在低频范围内,振动频率变化对微位移测量精度不会产生显著影响。

在双波长单纵模激光器自混合干涉微位移

测量实验中,实验结果初步验证了基于最优阈值条纹细分结合位移重构测量方法的可行性,但限于实验条件,该系统目前的测量精度和测量范围尚未达到该方法的理论测量极限。该系统测量范围的本质是基于清晰的条纹信号,其有效测量范围主要受限于以下参数:第一,干涉条纹对比度与光源相干长度,光路的偏移或位移测量达到相干长度极限时,均会影响干涉条纹对比度,从而增加细分难度,导致无法进行位移重构;第二,

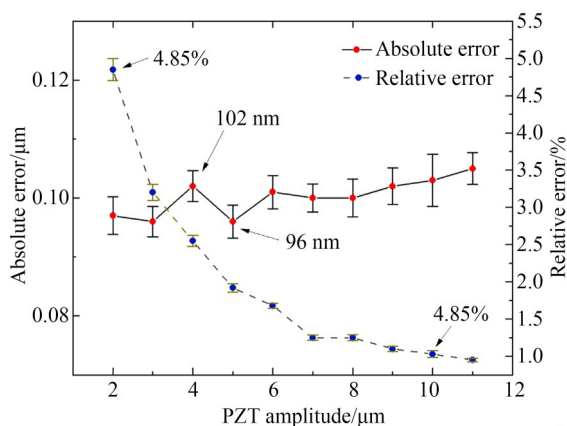


图6 被测靶镜在不同振幅下的微位移重构误差

Fig. 6 Micro-displacement reconstruction error of measured target mirror with different amplitudes

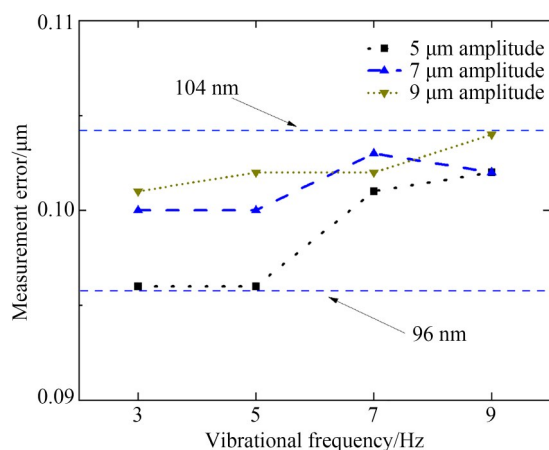


图7 被测靶镜在不同振动频率下的微位移测量误差

Fig. 7 Micro-displacement measurement error of measured target mirror with different vibration frequencies

光反馈水平决定能够返回激光器的光量,使得信号不容易被噪声淹没而造成条纹“丢失”;第三,探测带宽与最大运动速度,大振幅运动往往伴随着更高的运动速度,当目标运动速度过快时,干涉条纹瞬时频率接近或超过光电探测器带宽上限时,条纹信号会出现失真。如进一步扩大测量范围,可通过优化激光器参数,提高输出激光信噪比,增大光电探测器带宽等方法,随着被测位移的逐渐增大,依然能产生足够清晰的条纹数。

系统测量误差来源分析如下:第一,外部环

境扰动会引起激光器频率漂移或模式跳变,从而降低自混合干涉信号的信噪比,并且信号中存在的白噪声、极值处的脉冲噪声等会影响信号的完整性,导致后续信号处理难度增加进而影响测量精度;第二,噪声或波长漂移引起的信号尖峰会导致特征点提取不准确,该误差会反映到三次样条插值位移重构曲线上;第三,三次样条拟合误差,当振动方向发生反转时,物体的瞬时速度为零,对应的干涉条纹在反转处变得极宽,导致相应的特征点也变得稀疏。三次样条插值要求在整个区间上二阶导数连续,这意味着它需要强制拟合曲线在反转点处保持平滑过渡,从而产生“过度拟合”,导致拟合曲线偏离真实轨迹。通过提高双波长单纵模掺铒光纤激光器技术参数、降低噪声干扰、优化信号处理算法等措施,可以进一步提高微位移测量精度。

5 结 论

本文设计了双波长单纵模掺铒光纤激光器自混合干涉微位移测量系统研究方案,实验探究了测量目标靶镜在不同振动频率和振幅条件下的激光自混合干涉特性及微位移测量误差。研究表明,当测量靶镜以3~9 Hz的频率、2~11 μm的振幅作周期振动时,微位移测量误差在96~105 nm内变化,其平均测量误差为100.2 nm,相对测量误差随振幅增大而从4.65%减小至0.95%,平均相对误差为1.98%。本文设计的双波长单纵模光纤激光器自混合干涉微位移测量系统设计方案简单可行,具有广阔的应用前景。

作者贡献声明:

朱 浩:测量方案仿真分析与实验研究,论文撰写;

焦明星:测量方案设计,实验指导,论文审阅及修改;

杨奕佳:测量实验研究及结果分析;

李广涛、寇 科、刘 芸、邢俊红:测量方案设计,论文审阅及修改。

参考文献:

- [1] YAO S, LI H, PANG S Q, *et al.* A review of computer microvision-based precision motion measurement: principles, characteristics, and applications [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 5007928.
- [2] WANG J, GUO X X, YU J L, *et al.* High-precision micro-displacement measurement method based on alternately oscillating optoelectronic oscillators [J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5644.
- [3] LIAO J R, CHENG J M, HSIAO V K S. Enhanced vibration measurement through frequency modulated laser diode self-mixing interferometry [J]. *Applied Physics B*, 2024, 130(10): 173.
- [4] WANG C, KOU K, YAN J. Frequency-shifted nano-particle sizing using laser self-mixing interferometry under linear current tuning [J]. *Laser Physics Letters*, 2022, 19(6): 066202.
- [5] ZHU W, CHEN Q H, WANG Y H, *et al.* Improvement on vibration measurement performance of laser self-mixing interference by using a pre-feedback mirror [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 105: 150-158.
- [6] AMIN S, ORAKZAI M S, KHAN Z A. Simple and high-resolution method for displacement sensing using self-mixing interferometry [J]. *Optics Continuum*, 2024, 3(11): 2116.
- [7] 孔令雯, 蔡文魁, 施立恒, 等. 基于利特罗式激光反馈光栅干涉的微位移测量技术 [J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0404012.
- KONG L W, CAI W K, SHI L H, *et al.* Micro-displacement measurement technology based on Littrow-configured laser feedback grating interference [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0404012. (in Chinese)
- [8] 夏梵华, 王慧鹏, 夏巍, 等. 基于 VCSEL 结电压的自混合干涉位移测量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 171-175.
- XIA F H, WANG H P, XIA W, *et al.* Self-mixing interference displacement measurement based on vertical-cavity surface-emitting laser junction voltage [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 171-175. (in Chinese)
- [9] BARLAND S, GUSTAVE F. Convolutional neural network for self-mixing interferometric displacement sensing [J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11433.
- [10] QIU S, LIU T, LIU Z L, *et al.* Self-mixing rotational Doppler effect for spinning velocity detection [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 174: 110721.
- [11] HUANG Z, XU H Z, WANG X H, *et al.* Self-mixing interference signal analysis based on Lissajous figure convergence algorithm for vibration measurement [J]. *Measurement*, 2024, 229: 114407.
- [12] ZHANG Z H, LI C W, HUANG Z. Vibration measurement based on multiple Hilbert transform for self-mixing interferometry [J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 192-196.
- [13] 郝辉, 夏巍, 王鸣, 等. 光纤激光器自混合干涉效应研究 [J]. *物理学报*, 2014, 63(23): 234202.
- HAO H, XIA W, WANG M, *et al.* Self-mixing interference effect based on fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(23): 234202. (in Chinese)
- [14] MA S, XIE F, CHEN L, *et al.* Development of dual-wavelength fiber ring laser and its application to step-height measurement using self-mixing interferometry [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 5693.
- [15] ZHAO Y, ZHANG B F, HAN L F. Laser self-mixing interference displacement measurement based on VMD and phase unwrapping [J]. *Optics Communications*, 2020, 456: 124588.
- [16] CHEN J B, ZHU H B, XIA W, *et al.* Synthetic-wavelength self-mixing interferometry for displacement measurement [J]. *Optics Communications*, 2016, 368: 73-80.
- [17] DONG T J, GAO B K, CHEN S H, *et al.* Quadrature phase detection based on phase shift of self-mixing interferometer for real-time displacement measurement [J]. *Optics Communications*, 2021, 498: 127202.
- [18] LI D Y, LI Q H, JIN X, *et al.* Quadrature phase detection based on a laser self-mixing interferometer with a wedge for displacement measurement [J]. *Measurement*, 2022, 202: 111888.
- [19] 舒卓, 童斌, 徐春晖, 等. 基于双路比值条纹计数法的法布里-珀罗腔位移传感器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1005003.
- SHU ZH, TONG B, XU CH H, *et al.* Dual-fiber Fabry-Perot displacement sensor based on ratio method fringe counting demodulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(10): 1005003.

- (in Chinese)
- [20] WANG Y F, ZHAO F Y, LUO L B, *et al.* A review on recent advances in signal processing in interferometry[J]. *Sensors*, 2025, 25(16): 5013.
- [21] DING Y C, ZHANG S L, LI Y, *et al.* Displacement sensors based on feedback effect of orthogonally polarized lights of frequency-split HeNe lasers [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(8): 2225.
- [22] DONATI S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(3): 393-417.
- [23] FEI L G, ZHANG S L. Self-mixing interference effects of orthogonally polarized dual frequency laser[J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6100.
- [24] WAN X J, ZHANG S L, LIU G, *et al.* Self-mixing interference in dual-polarization microchip Nd:YAG lasers[J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, 21(11): 2175-2178.
- [25] ZHANG Z H, JIANG C L, SHEN L Q, *et al.* Vibration measurement based on the local maximum detection algorithm for laser self-mixing interferometry [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 63462-63469.
- [26] 高娇, 延凤平, 冯亭, 等. 基于复合双环腔及饱和吸收体的单纵模窄线宽掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2023, 50(23): 2301002.
- GAO J, YAN F P, FENG T, *et al.* Single longitudinal mode narrow linewidth thulium-doped fiber laser based on compound double-ring cavity and saturable absorber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(23): 2301002. (in Chinese)
- [27] QIAO W, FENG Z. 100 MHz frequency-spacing switchable single-dual-frequency laser based on MXene QDs and a phase-shifted FBG [J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43679.

作者简介:



朱 浩(1998—),男,陕西榆林人,博士研究生,2024年于西安理工大学获得硕士学位,主要从事光纤激光器与光电测量技术方面的研究。E-mail: 1131512399@qq.com

通讯作者:



焦明星(1962—),男,陕西西安人,博士,教授,博士生导师,1989年于西安理工大学获得硕士学位,1998年于清华大学获得博士学位,主要从事全固态激光器与光电测量技术及仪器方面的研究。E-mail: 2237663196@qq.com