

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于质心寻峰的调频连续波激光干涉位移传感器

张登攀, 闫猛超, 施安存, 李高超, 赵贤, 王永杰, 李芳

引用本文:

张登攀, 闫猛超, 施安存, 等. 基于质心寻峰的调频连续波激光干涉位移传感器[J]. 光电工程, 2023, 50(6): 220315.

Zhang D P, Yan M C, Shi A C, et al. Frequency-modulated continuous-wave laser interferometry displacement sensor based on centroid peak-finding[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(6): 220315.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220315>

收稿日期: 2022-11-28; 修改日期: 2023-02-03; 录用日期: 2023-02-08

相关论文

频率调制连续波激光雷达测量技术的非线性校正综述

李超林, 刘俊辰, 张福民, 曲兴华

光电工程 2022, 49(7): 210438 doi: 10.12086/oe.2022.210438

用于检测激光棒的变倾角马赫-曾德尔干涉仪

孔璐, 陈磊, 丁煜, 吴志飞, 郑东晖, 朱文华

光电工程 2020, 47(2): 190254 doi: 10.12086/oe.2020.190254

全视场外差白光干涉测量技术

汝洪武, 吴玲玲, 张文喜, 李杨

光电工程 2020, 47(2): 190617 doi: 10.12086/oe.2020.190617

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal

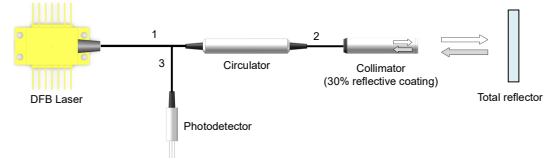


Website



DOI: 10.12086/oe.2023.220315

基于质心寻峰的调频连续波激光干涉位移传感器



张登攀¹, 闫猛超^{1,2}, 施安存², 李高超²,
赵贤^{1,2}, 王永杰^{2*}, 李芳²

¹河南理工大学机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000;

²中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083

摘要: 调频连续波激光干涉技术在精密测量领域中应用广泛, 针对其高精度位移解调问题, 本文将质心法应用于其拍频信号的解调中, 提出了一种基于质心寻峰法的相位解调算法并进行实验与分析。提出的算法在对截取的拍频信号进行平滑滤波与分峰截幅等处理基础上, 通过质心坐标公式得到拍频信号的质心, 质心横坐标即为峰值位置, 最后通过相位鉴别算法解调出位移。在仿真中设置信噪比 (SNR) 为 15 dB, 算法的相位误差为 0.016 rad, 位移误差为 2.04 nm。搭建调频连续波激光干涉位移测量系统进行实验验证, 实验结果表明: 当固定距离为 44 mm 时, 位移随机误差标准差为 2.18 nm。与常规的过零点检测法进行对比分析, 结果表明该算法的测量误差降低了 49%, 分辨率获得了提高, 具有广泛的应用前景。

关键词: 干涉测量; 调频连续波; 相位解调; 质心寻峰; 分布式反馈激光器

中图分类号: TN247

文献标志码: A

张登攀, 闫猛超, 施安存, 等. 基于质心寻峰的调频连续波激光干涉位移传感器 [J]. 光电工程, 2023, 50(6): 220315

Zhang D P, Yan M C, Shi A C, et al. Frequency-modulated continuous-wave laser interferometry displacement sensor based on centroid peak-finding[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(6): 220315

Frequency-modulated continuous-wave laser interferometry displacement sensor based on centroid peak-finding

Zhang Dengpan¹, Yan Mengchao^{1,2}, Shi Ancun², Li Gaochao²,
Zhao Xian^{1,2}, Wang Yongjie^{2*}, Li Fang²

¹School of Mechanical & Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

²Laboratory of Optoelectronic System, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract: The frequency-modulated continuous wave laser interferometry is widely used in the field of precision measurement. Aiming at its high-precision displacement demodulation problem, this paper applies the centroid method to the demodulation of its beat signal, proposes a phase demodulation algorithm based on the centroid peak-seeking method, and carries out experiments and analysis. Based on the smooth filtering and peak clipping of the intercepted beat signal, the proposed algorithm obtains the centroid of the beat signal through the centroid

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2023-02-03; 录用日期: 2023-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42276194)

*通信作者: 王永杰, wjy@semi.ac.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

coordinate formula. The abscissa of the centroid is the peak position. Finally, the phase discrimination algorithm demodulates the displacement. In the simulation, the SNR is set to 15 dB, the phase error of the algorithm is 0.016 rad, and the displacement error is 2.04 nm. A frequency-modulated continuous wave laser interference displacement measurement system was built for experimental verification. The experimental results show that when the fixed distance is 44 mm, the standard deviation of random displacement error is 2.18 nm. Compared with the conventional zero crossing detection method, the measurement error of the algorithm is reduced by 49%, the resolution is improved, and the algorithm has broad application prospects.

Keywords: interferometry; frequency-modulated continuous wave; phase demodulation; centroid peak searching; distributed feedback laser

1 引言

在现代工业生产中, 大动态范围、高精度、实时位移测量在航空航天和现代制造等领域具有广泛的应用需求。在这一背景下调频连续波激光干涉测量技术发展迅速, 该技术结合调频连续波雷达技术与光学干涉技术, 将调频连续波激光器与光学领域中的迈克尔逊 (Michelson, M) 干涉仪、法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot, F-P) 或马赫-增德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, M-Z) 耦合, 对参考信号与测量信号发生干涉时产生的拍频信号进行解调, 即可获得测量信息。与传统的光学干涉测量^[1]相比, 调频连续波干涉测量具有更高的精度与更大的测量范围。

迈克尔逊干涉仪与马赫-增德尔干涉仪的调频连续波位移传感器的信号光与参考光沿着不同光纤臂传播, 容易受到环境因素影响^[2-4], 测量精度较低。基于法布里-珀罗干涉仪的位移传感器信号光与参考光沿着相同光纤臂传播, 并且对位移信息极为敏感, 对拍频信号进行相位测量可精确地得到 F-P 腔的位移^[5-7]。

如今光纤传感技术凭借其高精度、高可靠性、配置灵活等特点, 广泛应用于传感通信、航天航空等多个领域^[8], 在激光测量中也有广泛应用。光纤传感领域中的环形器、耦合器和准直器等光纤器件与调频连续波干涉测量技术结合组成调频连续波光纤维位移传感器, 该传感器继承了调频连续波干涉技术与光纤传感技术的优点, 呈现出轻量化、抗干扰能力强、精度高和测量范围大等特点^[9]。

相位的高精确检测是提高调频连续波光纤维位移传感器精确度的关键^[10]。目前常规的相位解调算法有: (1) 过零点检测法。在文献 [11-12] 中, 王欢与白浪等人使用过零点检测法进行传感器设计, 主要通过将零点位置平均值作为初相位特征值进行相位解调, 降低了随机误差; (2) 固定点法。在文献 [13] 中, 郭媛等

人使用了固定点法进行位移解调, 该算法通过反余弦法求得多个固定点的相位平均值, 通过相位变化量可进行位移解调, 该算法在固定点数少时精度不高, 点数多时运算速度较慢; (3) 黄金分割峰值估计法。在文献 [14] 中, 张雄星与郑刚等人设计了一种新型相位检测位移传感器, 主要使用黄金分割法估计峰值位置, 将峰值位置平均值作为初相位特征值进行相位解调, 可实现固定距离的位移随机误差标准差为 4.5 nm 的测量精度。

综合来看, 上述算法都有必要对拍频信号进行幅值归一化, 个别算法还需进行线性拟合或互相关滤波等步骤, 算法复杂度较高。本文的质心寻峰相位鉴别算法不需要进行幅值校正等处理, 避免了由于幅值校正而引入的各种误差, 实验结果表明位移随机误差标准差可达到 2.18 nm, 相对于常规算法误差减小, 分辨率获得了提高, 在精密测量领域中有着较为广泛的应用前景。

2 调频连续波激光干涉测量原理

调频连续波通俗上来讲是频率或角频率连续调制的光波^[15]。使用锯齿波调制同一相干光源的两个光波, 并且沿着不同的路径传播, 最终在空间中的一个点相遇形成干涉。如图 1 所示, 实线曲线代表参考波的频率, 虚线曲线代表信号波的频率, 点划线曲线对应拍频信号的频率。

由图 1 可知, 参考光的频率在时间段 $(-T_m/2 + \tau, T_m/2)$ 内可表示为

$$f_i(t) = \alpha t + f_0, \quad (1)$$

式中, f_0 表示调制周期中心位置处的频率, 也称之为中心频率, $\alpha = B/T_m$ 表示调频速率, B 表示频率调制范围, T_m 表示调制信号周期, $f_m = 1/T_m$, f_m 表示调制信号的频率。则参考光的波动函数可表示为

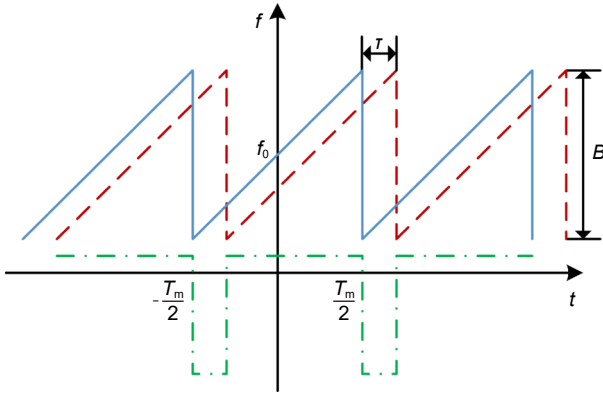


图 1 锯齿波调制时参考波与信号波的频率关系

Fig. 1 Frequency relationship between reference wave and signal wave in sawtooth wave modulation

$$E_1(t) = E_{01} \exp \left[j2\pi \left(\frac{1}{2} \alpha t^2 + f_0 t + \frac{\phi_0}{2\pi} \right) \right], \quad (2)$$

式中, E_{01} 表示参考光的电场振幅, ϕ_0 表示光源的初相位。在信号光相对于参考光延迟时间 τ 后, 信号光的波动函数 $E_2(t)$ 可表示为

$$E_2(\tau, t) = E_{02} \exp \left[j2\pi \left(\frac{1}{2} \alpha (t - \tau)^2 + f_0 (t - \tau) + \frac{\phi_0}{2\pi} \right) \right], \quad (3)$$

式中, E_{02} 表示信号光的电场振幅。当信号光与参考光再次相遇时, 两光波干涉所产生的拍频信号可表示为

$$\begin{aligned} I(\tau, t) &= |E_1(t) + E_2(\tau, t)|^2 \\ &= [E_1(t) + E_2(\tau, t)][E_1(t) + E_2(\tau, t)]^* \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[\phi_1(t) - \phi_2(\tau, t)] \\ &= I_0 [1 + V \cos(2\pi\alpha\tau t + 2\pi f_0\tau)] \end{aligned}, \quad (4)$$

式中, I_1 、 I_2 分别表示参考光和信号光的光强, I_0 表示拍频信号的平均光强, $V = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2)$ 表示拍频信号的对比度。将光程差 $l_{OPD} = c\tau$ 代入式(4)中, 可以得到光程差与频率、相位等关系的表达式, 每个调制周期内的拍频信号为

$$\begin{aligned} I(l_{OPD}, t) &= I_0 \left[1 + V \cos \left(\frac{2\pi B f_m l_{OPD}}{c} t + \frac{2\pi}{\lambda_0} l_{OPD} \right) \right] \\ &= I_0 [1 + V \cos(2\pi f_b t + \phi_{b0})] \end{aligned}, \quad (5)$$

式中, c 表示光在真空中传播的速度, λ_0 为中心波长, f_b 和 ϕ_{b0} 分别为拍频信号的频率与初相位。

由于法布里-珀罗干涉仪采用的是反射式的光学测量结构, 光程差为 $l_{OPD} = 2nd$, 因此拍频信号的初相位 ϕ_{b0} 可表示为

$$\phi_{b0} = \frac{2\pi}{\lambda_0} l_{OPD} = \frac{4\pi nd}{\lambda_0}, \quad (6)$$

式中, n 为空气折射率, d 为部分反射镜与待测目标

之间的距离。目标的相对位移 Δd 就可以表示为

$$\Delta d = \frac{\lambda_0}{4\pi n} \Delta\phi_{b0}, \quad (7)$$

式中, $\Delta\phi_{b0}$ 表示相邻调制周期拍频信号的初相位变化量, 可根据整个位移过程的相位差累加得出相对位移。

3 常规过零点检测法的相位解调算法

相位解调算法中通常以拍频信号在一个周期内的极值点位置为参考零点, 该位置变化可转换成初相位的变化, 最终实现位移解调。因此, 如何确定峰值精确位置是位移解调的关键问题。

过零点检测法是相位解调中经常使用的一种方法。该算法首先对拍频信号进行幅值校正, 并使用平滑滤波滤除信号中高频噪声, 通过“冒泡法”进行极小值点与极大值点定位, 通过线性拟合确定拍频信号的零点位置, 将零点位置的均值作为拍频信号的初相位特征值, 根据初相位特征值进行相位探测, 最后解调出位移变化量。常规过零点检测法算法流程图如图2所示。

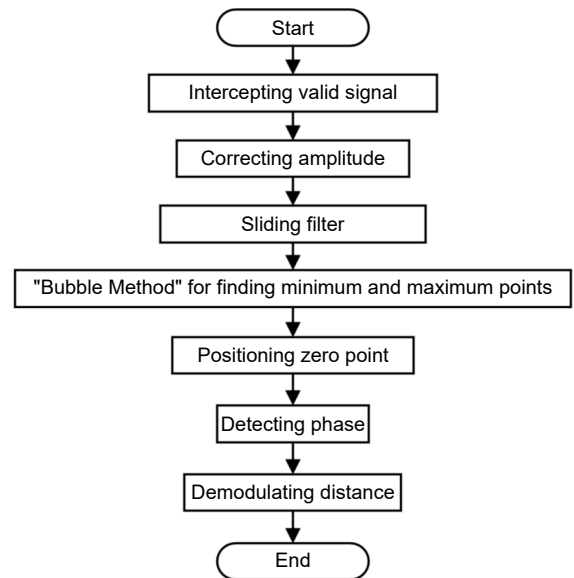


图 2 基于过零点检测法的相位解调算法流程图

Fig. 2 Flow chart of phase demodulation algorithm based on zero-crossing detection method

这种相位解调算法原理简单, 易于实现。但需要先对拍频信号进行幅值校正才能较为准确地估计出极值点位置, 该步骤会增大相位解调的误差。寻找极大极小值点的方法只使用常规的“冒泡法”, 原理简单但精度较低。并且该算法通过线性拟合的方法进行零点定位, 算法繁琐, 耗时较长。

4 基于质心寻峰的相位解调算法

4.1 质心寻峰

质心寻峰算法通过对采集到的信号数据进行分峰截幅, 设置该波形横坐标作为各质点的位置矢量, 纵坐标作为各质点的质量大小, 然后通过质点坐标公式得到该波形段的质心。当波形呈对称状分布时, 其质点横坐标对应峰值点横坐标。由于拍频信号波形为不等幅的正弦波, 单周期正弦波分布均匀且对称, 质心的横坐标与峰值点位置重合, 因此该算法可较为准确地估计每一调制周期的峰值点坐标。

采集的拍频信号通常为离散信号, 可将一个周期的拍频信号的每一采样点的横纵坐标分别作为位置矢量与质量大小, 质心坐标的横坐标即为该周期的极值点, 拍频信号分峰截幅如图 3 所示。

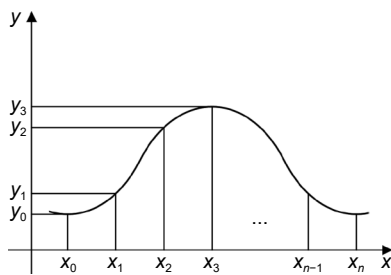


图 3 拍频信号分峰截幅
Fig. 3 Beat signal peak clipping

质心公式可表示为:

$$\bar{X} = x_0 + \frac{\sum_{n=1}^k y_n (x_n - x_0)}{\sum_{n=0}^k y_n} \quad (8)$$

该质心横坐标 \bar{X} 即为拍频信号一个周期的峰值点位置。将每一调制周期的拍频信号的峰值点位置平均值表示为初相位特征值, 相邻调制周期的初相位特征值的变化量可进行后续的相位探测与位移解调。

4.2 相位解调

拍频信号是一种信噪较低、不等幅、不等频的正弦信号, 每一调制周期前端与后端信号较差, 因此需要对信号进行“斩头截尾”, 选取中间高信噪比、频率变化小的信号段。对截取的信号段进行平滑滤波, 减小环境与电路造成的高频噪声。由于拍频信号极大值点的幅值不等, 但极小值点幅值相等, 因此可以使用“冒泡法”进行极小值点定位后通过质心寻峰法确

定两极小值点之间的极大值点位置。将拍频信号极大值点位置的平均值作为初相位特征值, 相邻调制周期的初相位特征值作差可得到初相位特征值变化量 ΔT , 再将拍频信号的极大值点位置两两作差并取平均得到周期 T 。

由于拍频信号具有周期性, 当相邻调制周期的相位差大于 π 时, 就会难以判断拍频信号相位移动方向。因此需要对周期的移动方向进行判断, 认为当相邻调制周期的初相位特征值变化量改变了 $0.5T$ 时, 对其进行周期扩展。 T_1 为当前调制周期的初相位特征值, T_0 为上一调制周期的初相位特征值, 对该相位特征值变化量 $\Delta T' = T_1 - T_0$ 进行判断。

当 $\Delta T' < -0.5T$ 时, 初相位特征值变化量可表示为 $\Delta T = \Delta T' + T$;

当 $\Delta T' > 0.5T$ 时, 初相位特征值变化量可表示为 $\Delta T = \Delta T' - T$;

当 $-0.5T \leq \Delta T' \leq 0.5T$ 时, 初相位特征值变化量可表示为 $\Delta T = \Delta T'$ 。

通过式 (9) 可以将初相位特征值变化量转换为位移解调所需要的相位差,

$$\Delta \phi_{b0} = 2\pi \frac{\Delta T}{T} \quad (9)$$

将所有调制周期的相位差累加可得到总相位差, 通过式 (10) 可解调出位移变化量, 其中 λ_0 为中心波长, n 为空气折射率,

$$\Delta d = \frac{\lambda_0}{4\pi n} \Delta \phi_{b0} \quad (10)$$

将式 (9) 与式 (10) 结合起来可直接得到初相位特征值变化量与位移之间的关系式 (11)

$$\Delta d = \frac{\lambda_0 \Delta T}{2nT} \quad (11)$$

基于质心寻峰的相位解调算法流程图如图 4 所示。

对两种算法进行对比与分析, 相较于常规的过零点检测法, 质心寻峰法在解调步骤中无需进行幅值校正步骤, 使用“冒泡法”定位极小值点后可利用质心寻峰法来寻找极大值点, 该方法原理简单, 易于计算, 具有较高的定位精度与准确性。并且直接将该峰值平均值作为初相位特征值进行处理, 不需要通过线性拟合来进行零点定位, 减小了算法的计算量。

5 算法仿真分析

为了验证两种算法的准确度以及对环境噪声的容

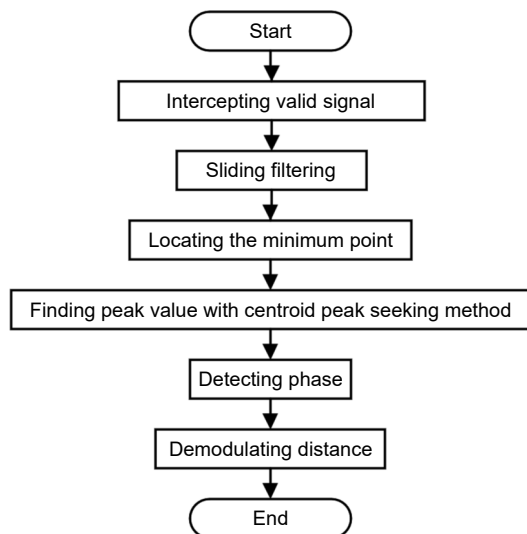


图 4 基于质心寻峰法相位解调算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the phase demodulation algorithm based on centroid peak-finding method

忍度, 模拟生成一个频率 10 Hz 的正弦信号、以采样频率 5000 Hz 采集 5000 个数据点, 将此正弦信号与信噪比 10~60 dB 的噪声叠加在一起作为输出的拍频信号。

根据 4.2 小节, 将中心波长 λ_0 设为 1550 nm, 空气折射率 n 取 1, 计算得到该拍频信号与理想信号的相位差。如图 5 所示, 取不同信噪比计算相位误差与位移误差, 当信噪比为 15 dB 时, 过零点检测法的相位误差为 0.04 rad, 位移测量误差为 4.93 nm; 而质心寻峰算法的相位误差为 0.016 rad, 位移测量误差为 2.04 nm, 并且信噪比越高, 误差越小。通过仿真对比可知, 质心寻峰法相较于过零点检测法的相位与位移误差得到了降低。

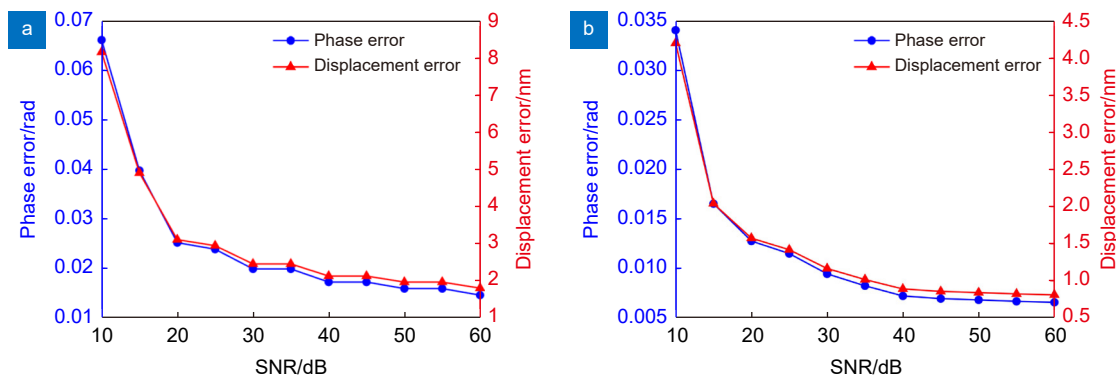


图 5 10~60 dB 信噪比对应的相位误差与位移误差。(a) 过零点检测法; (b) 质心寻峰法

Fig. 5 Phase error and displacement error corresponding to 10~60 dB signal to noise ratio.

(a) Zero-crossing detection method; (b) Centroid peak-finding method

6 系统搭建与实验验证

6.1 系统搭建

本文调频连续波位移测量使用的干涉仪为法布里-珀罗干涉仪。典型的 F-P 腔调频连续波光纤位移测量系统通常由分布式反馈 (distributed feedback laser, DFB) 半导体激光器、光纤环形器、光纤准直器、部分反射镜或反射膜、全反射镜以及负责信号处理的光电探测器组成。基于法布里-珀罗干涉仪的调频连续波激光干涉位移测量系统如图 6 所示。

该系统通过锯齿波对 DFB 激光器进行调制发出调频连续波沿光纤传输至环形器端口 1, 再通过端口 2 传输至镀有 30% 反射膜的准直器, 其中一部分参考光沿光纤原路返回, 一部分穿过反射膜通过全反射镜反射回来形成信号光, 参考光与信号光发生干涉形成拍频信号通过端口 3 由光电探测器接收, 通过数据采集卡将光电探测器探测到的拍频信号传输至上位机中进行处理与解调, 最后得到位移变化量。

实验中选用 DFB 激光器的中心波长为 1549.94 nm, 阈值电流为 11 mA, 最大工作电流为 200 mA。选用线性度较好的一段电流进行调制, 当激光器电流大于 40 mA 时, 波长输出比较稳定, 因此实验选用电流区间为 50~140 mA 对激光器进行调制。

位移测量系统如图 7 所示, 将 DFB 激光器、环形器、衰减器等光纤器件沿光路配置在光学平台上, 将镀有 30% 部分反射膜的准直器与全反射镜使用夹具固定在隔震平台上, 有利于减少外界震动对实验结果造成影响, 减小随机误差。

6.2 实验验证

使用调制频率为 10 kHz 的锯齿波对激光器进行

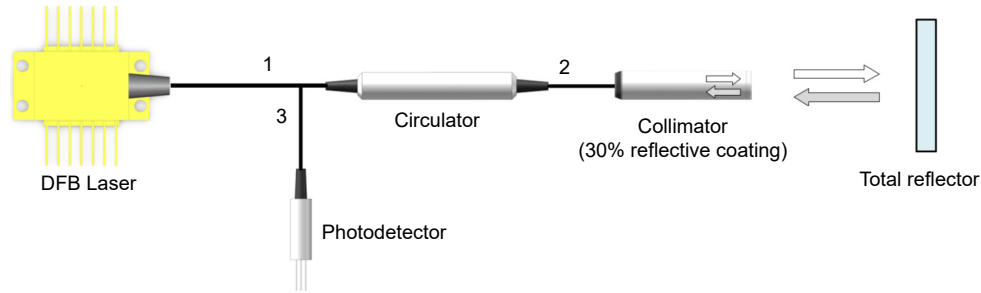


图 6 调频连续波激光干涉位移传感器原理图

Fig. 6 Schematic diagram of a frequency-modulated continuous-wave laser interference displacement sensor

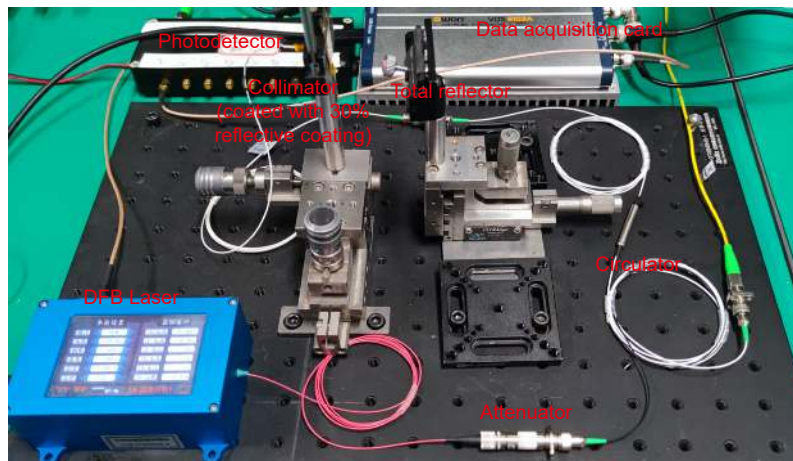


图 7 调频连续波干涉位移测量系统实物图

Fig. 7 Physical drawing of FMCW interferometric displacement measurement system

调制, 并且使用数据采集卡采集光电探测器的信号, 采样频率是拍频信号频率的 500 倍时, 鉴相误差较小, 采样频率设置为 50 MHz。信号光与参考光发生干涉形成的拍频信号与锯齿波信号如图 8 所示, 图 8(a) 表示锯齿波调制信号, 图 8(b) 表示拍频信号。由于拍频信号频率变化缓慢, 调频非线性在测量微小位移时对相位解调影响较小。

固定 F-P 腔腔长为 44 mm, 采集 2000 个调制周期的拍频信号在上位机中进行处理, 首先采用了常规的过零点检测法对其进行相位解调, 得到的固定 F-P 腔腔长时的位移随机误差与分布。如图 9(a) 所示, 解调出的位移随机误差在 $-10 \sim 10$ nm 范围内波动。对其

进行统计分析后如图 9(b) 所示, 该误差分布呈正态分布, 该位移随机误差标准差为 4.26 nm, 说明空气扰动、外界震动以及噪声的影响对实验结果影响较大。

对本次采集的拍频信号使用质心寻峰算法进行处理, 固定距离时位移随机误差以及分布如图 10 所示。通过图 10(a) 可以看出, 固定 F-P 腔腔长时位移随机误差在 $-5 \sim 5$ nm 之间波动, 该随机误差的标准差为 2.18 nm。通过图 10(b) 得出该分布呈正态分布, 位移随机误差标准差从 4.26 nm 降低到了 2.18 nm, 该算法相较于常规的过零点检测法误差得到了降低。

为了更准确地验证两种相位解调算法之间的差异,

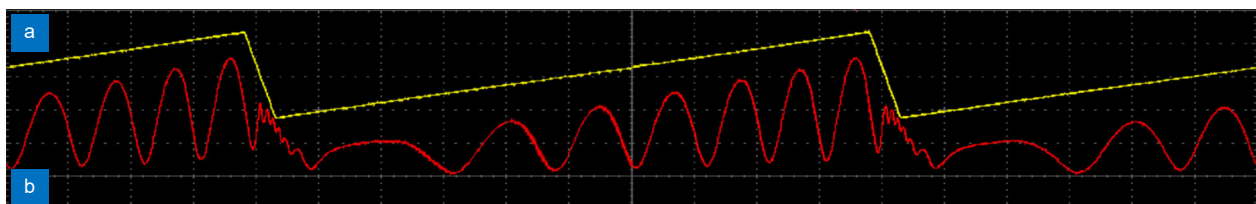


图 8 采集得到的拍频信号与锯齿波信号。(a) 锯齿波调制信号; (b) 拍频信号

Fig. 8 Beat signal and sawtooth signal acquired. (a) Sawtooth signal; (b) Beat signal

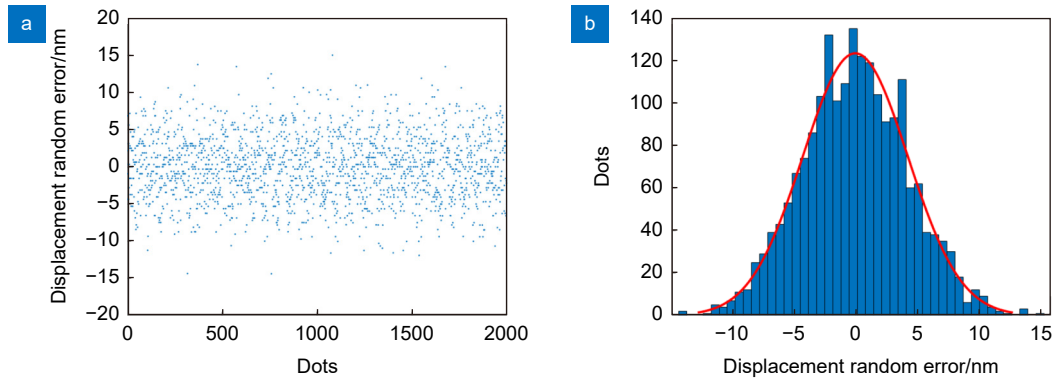


图 9 过零点检测法固定 F-P 腔腔长 44 mm 时位移随机误差及分布。(a) 固定距离位移随机误差; (b) 随机误差分布
 Fig. 9 Random error and distribution of displacement when the length of the F-P cavity is 44 mm fixed by zero-crossing detection method. (a) Random error of displacement fixed distance; (b) Random error distribution

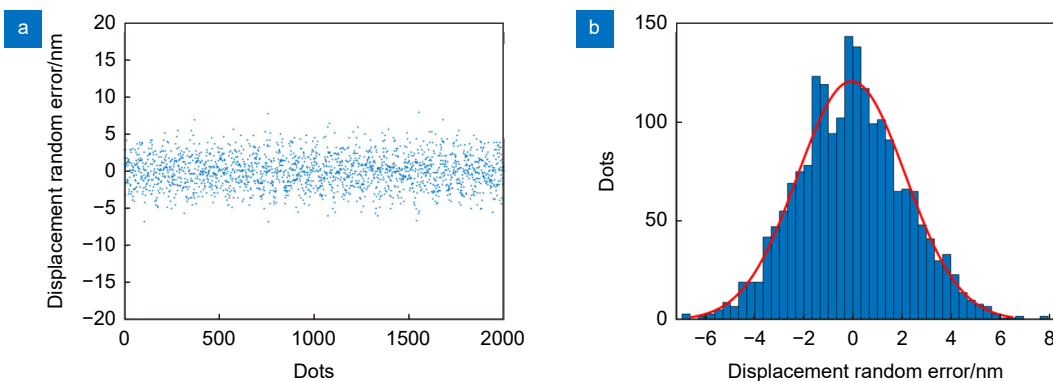


图 10 质心寻峰法固定 F-P 腔腔长 44 mm 时位移随机误差及分布。(a) 固定距离位移随机误差; (b) 随机误差分布
 Fig. 10 The random error and distribution of displacement when the length of the F-P cavity is 44 mm fixed by the centroid peak-finding method. (a) Random error of displacement fixed distance; (b) Random error distribution

设置不同长度的 F-P 腔腔长, 使用这两种算法对系统采集的同种数据进行处理, 结果如图 11 所示。设置 F-P 腔腔长为 38~52 mm 进行位移误差分析, 过零点检测算法在该腔长范围内位移随机误差标准差平均

值 4.3 nm, 而质心寻峰算法的位移随机误差标准差平均值为 2.19 nm, 通过对比分析与计算, 本文的质心寻峰算法相较于常规的过零点检测算法误差降低了 49%, 分辨率获得了提升。

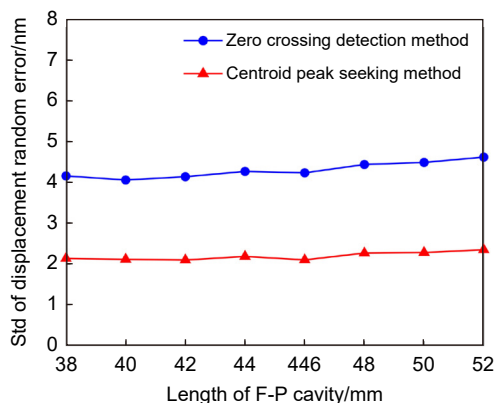


图 11 不同 F-P 腔腔长过零点检测法与质心寻峰法的位移随机误差标准差对比图

Fig. 11 Comparison of the standard deviation of displacement random error between zero-crossing detection method and centroid peak-finding method when F-P cavity length is different

7 结 论

针对调频连续波干涉拍频信号的解调问题, 本文将质心法应用于拍频信号解调领域中, 提出了一种基于质心寻峰法的相位解调算法。相较于现有相位解调算法, 该算法无需幅值校正, 对信号进行平滑滤波与极小值点定位后, 即可通过质心法准确地得到拍频信号的峰值点位置, 根据此峰值点位置进行相位解调后得到位移量。构建了调频连续波干涉测距系统并开展了测试实验, 验证了 F-P 腔腔长固定时位移的随机误差分布, 该位移随机误差标准差为 2.18 nm。实验表明, 提出的算法能精确计算拍频信号的相位信息, 并且可以准确地解调出位移的变化量, 测量误差相较于常规的过零点检测法降低了 49%, 提高了分辨率, 对

调频连续波激光干涉精密测量有着重要意义, 在温度、折射率等海水参数测量中具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] Tan Y D, Xu X, Zhang S L. Precision measurement and applications of laser interferometry[J]. *Chin J Laser*, 2021, **48**(15): 1504001.
谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. *中国激光*, 2021, **48**(15): 1504001.
- [2] Palumbo G, Tosi D, Iadicco A, et al. Analysis and design of chirped fiber bragg grating for temperature sensing for possible biomedical applications[J]. *IEEE Photonics J*, 2018, **10**(3): 7103015.
- [3] Wang D, Cui J J, Zhang F M, et al. Review of Michelson laser interferometer for micro displacement measurement[J]. *Acta Metrol Sin*, 2021, **42**(1): 1-8.
王冬, 崔建军, 张福民, 等. 用于微位移测量的迈克尔逊激光干涉仪综述[J]. *计量学报*, 2021, **42**(1): 1-8.
- [4] Liu H, Liu J, Ren Q Y, et al. Demodulation method of fiber Fabry-Perot sensor based on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Piezoelectr Acoustoopt*, 2021, **43**(4): 484-489.
刘浩, 刘佳, 任乾钰, 等. 基于M-Z干涉仪的光纤法-珀传感器解调方法[J]. *压电与声光*, 2021, **43**(4): 484-489.
- [5] Zheng J. Reflectometric fiber optic frequency-modulated continuous-wave interferometric displacement sensor[J]. *Opt Eng*, 2005, **44**(12): 124404.
- [6] Su Y H. Simulation and realization of frequency modulated continuous wave laser ranging system[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2021. <https://doi.org/10.27049/d.cnki.ggldc.2021.000073>.
苏云赫. 调频连续波激光测距系统的仿真与实现[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021. <https://doi.org/10.27049/d.cnki.ggldc.2021.000073>.
- [7] Jing L Q, Zheng G, Sun B, et al. Measurement of distance to moving target using frequency-modulated continuous-wave interference technique[J]. *Chin J Laser*, 2019, **46**(12): 1204001.
井李强, 郑刚, 孙彬, 等. 基于调频连续波干涉技术的运动目标距离测量[J]. *中国激光*, 2019, **46**(12): 1204001.
- [8] Guo T M. Study on signal processing method in frequency modulated continuous wave laser ranging technology[D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2019. <https://doi.org/10.27096/d.cnki.ghtdy.2019.000029>.
郭天茂. 调频连续波激光测距技术信号处理方法的研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2019. <https://doi.org/10.27096/d.cnki.ghtdy.2019.000029>.
- [9] Lin W H, Sun S M, Hu J, et al. Research and application of sensing technology based on fiber ring laser[J]. *Semicond Optoelectron*, 2022, **43**(4): 728-737.
林伟浩, 孙思明, 胡杰, 等. 基于光纤环形激光器的传感技术研究与应用[J]. *半导体光电*, 2022, **43**(4): 728-737.
- [10] Han Y, Zheng G, Zhang X X, et al. Frequency modulation continuous wave displacement sensor based on STM32H743[J]. *Laser Optoelectr Prog*, 2021, **58**(11): 1112007.
韩园, 郑刚, 张雄星, 等. 基于STM32H743的调频连续波位移传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, **58**(11): 1112007.
- [11] Wang H, Zheng G, Chen H B, et al. Frequency-modulated continuous-wave laser interferometric optical fiber temperature sensor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(5): 180506.
王欢, 郑刚, 陈海滨, 等. 调频连续波激光干涉光纤温度传感器[J]. *光电工程*, 2019, **46**(5): 180506.
- [12] Bai L, Zheng G, Zhang X X, et al. Optical fiber pressure sensor based on frequency-modulated continuous-wave and analysis of its measurement characteristic[J]. *Acta Opt Sin*, 2021, **41**(3): 0328002.
白浪, 郑刚, 张雄星, 等. 调频连续波光纤压力传感器及其测量特性分析[J]. *光学学报*, 2021, **41**(3): 0328002.
- [13] Guo Y. Research on laser wavelength stability of frequency modulated continuous wave interferometer[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
郭媛. 调频连续波干涉仪激光波长稳定性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- [14] Zhang X X, Zheng G, Jing L Q, et al. A novel digital phase detection method for frequency-modulated continuous-wave interferometric fiber-optic displacement sensor[J]. *Optik*, 2019, **183**: 742-750.
- [15] Jing L Q. Study on frequency modulated continuous wave laser interference fiber-optic distance measurement technology[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020.
井李强. 调频连续波激光干涉光纤测距技术的研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2020.

作者简介



张登攀(1975-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事智能制造及云测量理论、精密测控与现代传感技术等方面的教学与科研工作。

E-mail: zhangdengpan@hpu.edu.cn



【通信作者】王永杰(1979-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光纤传感技术及其应用研究。

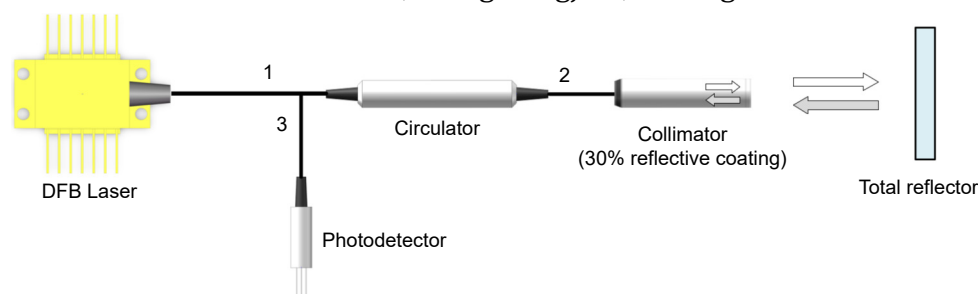
E-mail: wyj@semi.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Frequency-modulated continuous-wave laser interferometry displacement sensor based on centroid peak-finding

Zhang Dengpan¹, Yan Mengchao^{1,2}, Shi Ancun², Li Gaochao²,
Zhao Xian^{1,2}, Wang Yongjie^{2*}, Li Fang²



Schematic diagram of frequency-modulated continuous wave laser interference displacement sensor

Overview: Frequency-modulated continuous wave laser interferometry technology has broad application prospects in modern industrial production due to its advantages of large dynamic range, high precision, and high reliability. The frequency-modulated continuous wave laser is coupled with the Fabry-Perot interferometer in the optical field through optical fiber devices. The signal light and reference light of the interferometer propagate along the same optical fiber arm, which is extremely sensitive to displacement information. The measurement information can be obtained by demodulating the beat signal generated when the reference signal interferes with the measurement signal. In phase demodulation, the extreme point position of the beat frequency signal in one cycle is converted into a change in the initial phase to achieve displacement demodulation. But a beat frequency signal is a kind of sine signal with low signal noise, unequal amplitude, and frequency. It needs signal preprocessing to facilitate the subsequent extreme point location. Determining the precise position of the peak is the key problem in displacement demodulation.

Aiming at the demodulation problem of frequency modulation continuous wave interference beat frequency signal, this paper applies the centroid method to the field of the beat frequency signal demodulation and proposes a phase demodulation algorithm based on the centroid peak finding method. Compared with the existing phase demodulation algorithm, the algorithm does not need amplitude correction. After smooth filtering and minimum point positioning of the signal, the peak point position of the beat frequency signal can be accurately obtained by the centroid method, and the displacement amount can be obtained after phase demodulation according to this peak point position. A frequency-modulated continuous wave interferometric ranging system was constructed, and test experiments were carried out. The random error distribution of the displacement is verified when the length of the F-P cavity is fixed, and the standard deviation of the error is 2.18 nm. In order to compare the centroid peak-finding method proposed in this paper with the conventional zero-crossing detection method, the displacement random error of the two methods is obtained by using the built frequency modulated continuous wave ranging system with fixed different distances, and its standard deviation is calculated. Experimental results show that the measurement error of the method proposed in this paper is reduced by 49% compared to the traditional zero-crossing detection method. It has important research significance in the field of laser interferometry and has broad application prospects in the field of precision measurement.

Zhang D P, Yan M C, Shi A C, et al. Frequency-modulated continuous-wave laser interferometry displacement sensor based on centroid peak-finding[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(6): 220315; DOI: [10.12086/oe.2023.220315](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220315)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (42276194)

¹School of Mechanical & Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; ²Laboratory of Optoelectronic System, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

* E-mail: wyj@semi.ac.cn