

激光与光电子学进展

基于激光自混合测振的 FSI 测距误差补偿方法

柴晓博, 吴腾飞*, 殷璞芙

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 在激光扫频干涉测距过程中, 目标振动在测距干涉信号中引入了多普勒频移, 造成信号频谱展宽, 导致了测距误差放大效应。为了降低振动对测距结果的影响, 提出了基于激光自混合测振的测距误差补偿方法, 通过同步测量自混合干涉信号的相位变化, 补偿目标振动对测距干涉信号的相位调制, 并采用频率重采样法校正激光器的调频非线性。最终通过仿真和实验验证了所提方法的可行性。在实验中, 当测量的目标振幅为 7102.1 nm 时, 测振标准差为 7.9 nm, 补偿前的测距标准差为 3270.6 μm , 补偿后的测距标准差降低到 21.4 μm 。补偿后的测距标准差接近无振动情况下的测距标准差, 表明目标振动引发的测距误差放大问题得到了有效解决。

关键词 测量; 激光扫频干涉测距; 激光自混合干涉; 目标振动补偿; 频率重采样

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1112005

FSI Ranging Error Compensation Method Based on Laser Self-Mixing Vibration Measurement

Chai Xiaobo, Wu Tengfei*, Yin Pufu

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University,
Tianjin 300072, China

Abstract In the process of laser frequency scanning interferometry ranging, the target vibration introduces Doppler shift in the ranging interference signals which results in the spectral broadening of the signal and the amplification effect of ranging errors. To reduce the effect of vibration on ranging results, we proposed a ranging error compensation method based on laser self-mixing vibration measurement. This method compensates the phase modulation of the target vibration on the ranging interference signal by synchronously measuring the phase change of the self-mixing interference signal, and meanwhile the frequency resampling method is used to correct the laser frequency modulation nonlinearity. Finally, the feasibility of the proposed method is verified by simulation and experiment. In the experiment, when the measured target amplitude was 7102.1 nm, the measured vibration standard deviation was 7.9 nm, the range measurement standard deviation before compensation was 3270.6 μm , and the range measurement standard deviation after compensation was reduced to 21.4 μm , which was close to the case of no vibration, indicating that the amplification problem of ranging errors caused by target vibration was effectively solved.

Key words measurement; laser frequency scanning interferometry ranging; laser self-mixing interferometry; target vibration compensation; frequency resampling

OCIS codes 120.3180; 120.7280; 140.3158

收稿日期: 2020-10-22; 修回日期: 2020-11-18; 录用日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(61733012)

*E-mail: wtf@tju.edu.cn

1 引言

激光扫频干涉(Frequency Scanning Interferometry, FSI)测距方法具有可测量非合作目标、精度高、抗干扰能力强和可现场溯源等优点^[1-3],受到了广泛关注。根据FSI测距原理,目标的振动会引起拍频信号发生多普勒频移,所引入的光程变化通常会被放大,因此在实际的工业测量环境下,必须对振动所导致的测距误差放大现象进行有效的补偿^[4-6]。Slotwinski等^[7]设计了双激光器FSI绝对测距系统,两个半导体激光器的调频方向相反,振动对两个激光器干涉信号的影响相同,可以相互抵消,从而可得到目标的绝对距离信息。Tao等^[8]通过测量条纹数量和调频范围,达到测量目标距离的目的,并基于卡尔曼滤波模型进行迭代和状态更新,确定了收敛后的精确距离。该方法适用于较小的振动,振动频率受限于激光器的调制速率,且该测距方法对信号信噪比的要求较高。赵潇等^[9]采用单频-线性扫频交替调制技术测量速度和距离,基于卡尔曼滤波算法实现了数据融合,提高了测距精度,但是该方法对基于卡尔曼滤波器的状态预测模型的精确度要求很高。路程等^[10-11]通过增加振动测量光路,采用多普勒测振方法获取了振动信息,从而对测距信号进行了校正,重复测量的不确定度低于5 μm,但光路结构复杂。近年来,激光自混合干涉测振技术发展迅速,振动测量的精度可达到4 nm^[12]。因此针对上述问题,本文提出了一种基

于激光自混合干涉测振的FSI测距系统振动补偿方法,该方法基于激光自混合干涉效应,实现了目标振动的精确测量,进而补偿测距误差。该方法无需匹配激光器性能,测量范围大,光路简单,适用于工业测量现场。

2 基本原理

基于激光自混合干涉测振的FSI测距误差补偿光路如图1所示。采用锯齿波信号对可调谐激光器进行调制,激光器的出射光经隔离器和耦合器后,10%能量的光经一个基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构的辅助干涉仪后,光电探测器(PD1)探测得到参考信号。其余90%能量的光通过25:75耦合器后分为测量光和本振光,测量光经环形器、波分复用器和准直器后输出,再经目标反射进入光纤中,与本振光发生干涉,在平衡探测器处形成拍频信号。可调谐激光器、耦合器、环形器、波分复用器、准直器和平衡探测器共同构成了测距干涉仪。单频激光器的输出光经可调光衰减器、波分复用器后,与测距干涉仪的光路重合,经目标反射后回到激光器腔内,发生自混合干涉。测振干涉信号由激光器内置光电探测器(PD2)探测。单频激光器、可调衰减器、波分复用器和准直器共同构成了测振干涉仪。

当可调谐激光器的频率受到线性调制时,其频率为

$$\nu(t) = \nu_0 + at, \quad 0 < t < T, \quad (1)$$

式中: ν_0 表示可调谐激光器调频的起始频率; $a =$

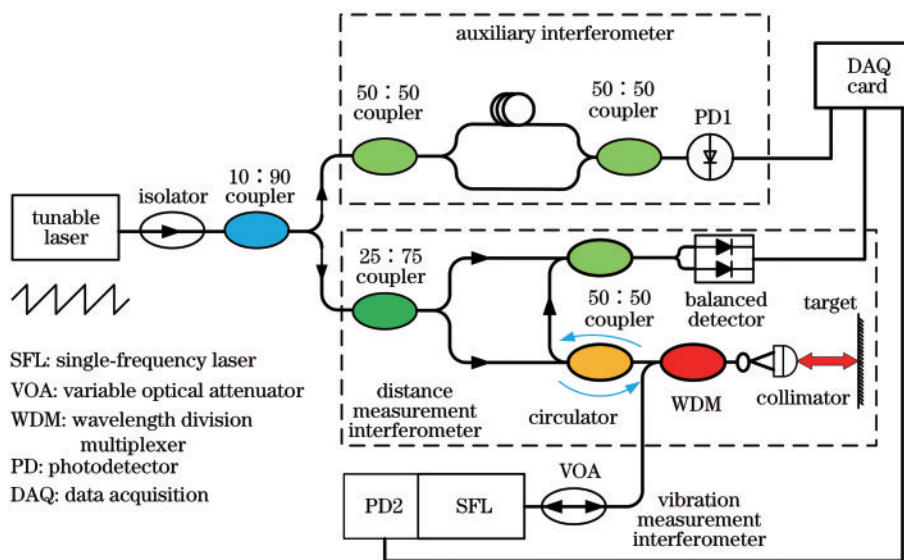


图1 基于激光自混合测振的FSI测距误差补偿光路

Fig. 1 Optical path of FSI ranging error compensation based on laser self-mixing vibration measurement

B/T 表示激光器频率的调制速率,其中 B 表示激光器的调制带宽, T 表示激光器的调制周期; t 表示时

间。当目标存在振动时,测距干涉信号^[10]为

$$I(t) = A_M \cos [2\pi a \tau_m t + 2\pi a \Delta \tau_m(t)t + 2\pi \nu_0 \tau_m + 2\pi \nu_0 \Delta \tau_m(t)], \quad (2)$$

式中: A_M 表示干涉信号的振幅; τ_m 表示待测距离对应的时延; $\Delta \tau_m(t)$ 表示振动导致的时延变化。(2)式相位中第一项包含目标的绝对距离信息,第二项非常小,通常可以忽略,第三项为常数项,第四项为振动引入的多普勒效应项。

采用希尔伯特变换法求得相位变化量 $\Delta \varphi_m(t)$ 为

$$\Delta \varphi_m(t) = 2\pi a \tau_m t + 2\pi \nu_0 \Delta \tau_m(t). \quad (3)$$

在激光自混合干涉测振光路中,单频激光器的内置光电探测器信号^[11]为

$$P = P_0 \{1 + m \cos [\varphi_F(t)]\}, \quad (4)$$

式中: P_0 表示激光器无光反馈时的光功率; m 表示

光强调制系数; $\varphi_F(t)$ 表示有光反馈时的相位。

对自混合功率信号进行归一化处理,通过反余弦变换,计算包裹相位并使用相位解卷法展开相位,重构目标振动信息^[13-14]。通过估计光反馈强度系数 C 和线宽展宽因子 α 的值^[15],得到无光反馈时的相位 $\varphi_0(t)$ ^[16],即

$$\varphi_0(t) = \varphi_F(t) + C \sin [\varphi_F(t) + \arctan(\alpha)]. \quad (5)$$

目标振动引入的时延 $\Delta \tau_m(t)$ 为

$$\Delta \tau_m(t) = \frac{2\Delta L_m(t)}{c} = \frac{\varphi_0(t)}{2\pi \nu_1}, \quad (6)$$

式中: $\Delta L_m(t)$ 表示振动位移; c 表示光速; ν_1 表示激光器的中心波长。将(6)式代入(3)式,对测距信号的相位进行补偿,得到多普勒效应校正后的信号相位:

$$\Delta \varphi_m'(t) = 2\pi a \tau_m t + 2\pi \nu_0 \Delta \tau_m(t) - 2\pi \nu_0 \frac{\varphi_0(t)}{2\pi \nu_1} = 2\pi a \tau_m t + 2\pi \nu_0 \Delta \tau_m(t) - \frac{\nu_0}{\nu_1} \varphi_0(t) = 2\pi a \tau_m t. \quad (7)$$

然而在实际情况中,可调谐激光器无法实现理想的线性扫频。为了实现调频的非线性校正,在系统中增加辅助干涉仪,采用频率采样法校正激光器的调频非线性^[17]。同时采集三路信号,将参考信号的峰谷值点对应时刻作为采样时钟,对多普勒效应校正后的信号进行重采样,则相邻两个采样点之间的参考信号相位差为 π ,重采样后相位为

$$\Delta \varphi_m(k) = \pi \frac{\tau_m}{\tau_r} k, \quad (8)$$

式中: k 表示采样点的索引值; τ_r 表示MZI光程差对应的时延。重采样信号的相位与采样点的索引值呈线性关系,因此通过预先标定MZI光程差 L_r ,利用线性最小二乘拟合,得到目标时延与辅助干涉仪时延的比值,进而计算目标距离。即

$$L_m = L_r \frac{\tau_m}{2\tau_r}. \quad (9)$$

3 仿真分析

使用Matlab进行数值模拟,假设激光器频率调制非线性函数^[18]为

$$\nu(t) = \nu_0 + at + \beta t^2 + \gamma t^3, \quad 0 < t < T, \quad (10)$$

式中: β 为二次调频系数; γ 为三次调频系数。

本文可调谐激光器的中心波长为1550 nm,扫描带宽为30 GHz,扫描速率为900 GHz/s,二次调

频系数为 1.8×10^{11} ,三次调频系数为 9×10^{10} ,待测距离设为1 m,MZI光程差为14.6 m,单频激光器的中心波长为1310 nm,反馈强度 C 为4,线宽展宽因子 α 为6。

图2(a)中的虚线表示仿真设定的振动位移,待测目标作简谐振动,频率为60 Hz,振幅为5 μm 。图2(a)中的实线表示相位解卷法计算得到的振动位移,计算得到的位移与设定值的变化趋势相同。图2(b)所示为幅值偏差,采用相位解卷法解算振动幅值,偏差低于1.5 nm。从图2可以看出,幅值偏差具有一定的波动,这是相位解卷法测量振动的原理误差。当振动位移增大时,幅值偏差的波动频率增大。

通过对可调谐激光器一个调制周期内的干涉信号进行希尔伯特变换,计算信号相位。图3(a)为相位补偿前的重采样信号相位,受振动影响,相位为非线性变化,无法通过斜率准确计算距离。图3(b)为补偿后的重采样信号相位,相位与采样点数量之间呈线性关系。由(2)式可知,理论上光电探测器处的干涉信号为相位的余弦信号,当目标不存在振动时,信号频谱能量集中,当目标存在振动时,信号频谱将发生展宽^[10]。对图3(a)、(b)的重采样相位信号作余弦变换,并进行频谱分析,发现补偿后的信号频谱展宽得到了明显抑制。

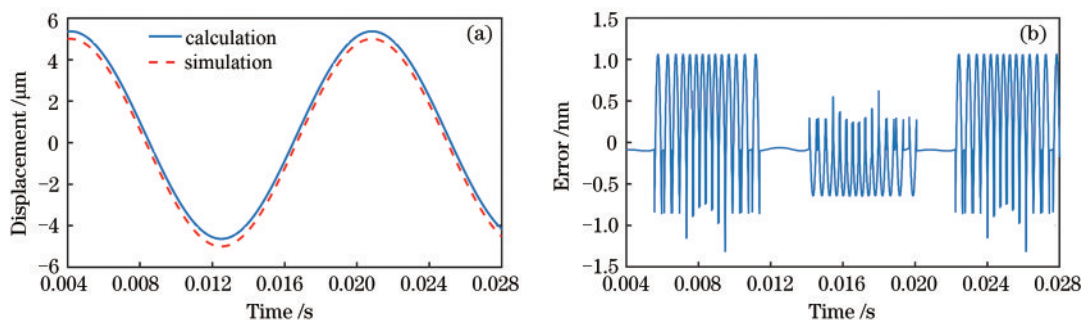


图 2 振动测量的仿真结果。(a) 仿真位移与解算位移;(b) 幅值偏差

Fig. 2 Simulation results of vibration measurement. (a) Simulated and measured displacements; (b) amplitude deviation

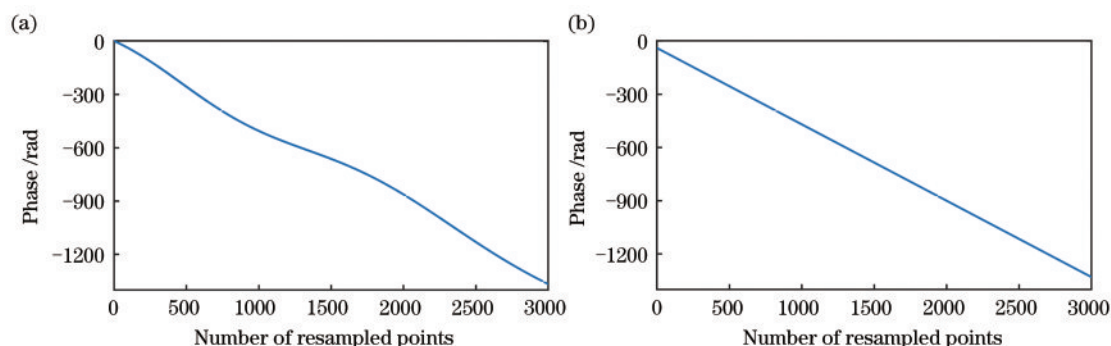


图 3 重采样相位信号的仿真结果。(a) 补偿前;(b) 补偿后

Fig. 3 Simulation results of resampled phase signal. (a) Before compensation; (b) after compensation

对目标施加频率为 60 Hz 且具有不同振幅的正弦位移,计算的振动幅值偏差和测距偏差如表 1 所示。令振幅为 5 μm ,改变待测距离,计算的偏差结果如表 2 所示。通过准确估计反馈强度和线宽展宽因子,采用相位解卷法计算位移。仿真结果表明,振幅在 10 μm 范围内,使用相位解卷法测量振动位移,其幅值偏差可以达到 1.1 nm,测距偏差可以达到 3.1 μm ,测距误差的补偿效果良好;振幅不变时,改变待测距离,测距偏差的变化很小。可以看出,距离变化对测距偏差的影响很小。

表 1 不同振幅下的偏差仿真结果

Table 1 Simulation results of deviation under different amplitudes

Frequency / Hz	Amplitude / μm	Distance / m	Error of amplitude / nm	Error of ranging / μm
60	2	1	1.1	2.0
	4		1.1	1.2
	6		1.3	0.5
	8		1.3	-1.0
	10		1.5	-3.1

表 2 不同距离下的偏差仿真结果

Table 2 Simulation results of deviation under different distances

Frequency / Hz	Amplitude / μm	Distance / m	Error of amplitude / nm	Error of ranging / μm
60	5	2	1.3	-1.3
		4	1.3	-1.7
		6	1.3	-0.9
		8	1.3	-0.9
		10	1.3	-1.1

3 实验结果与分析

搭建的实验系统如图 4 所示,其中可调谐激光器选用的是筱晓(上海)光子技术有限公司的 PL-DFB-1550-A-1-SA-14BF 蝶形激光器,中心波长为 1550 nm,输出功率为 10 mW。单频激光器选用的是威创光电公司的 WSLP-1310-010m-9-DFB 单模光纤耦合激光器,中心波长为 1310 nm,输出功率为 10 mW。数据采集卡为 NI 公司的 USB-6366,采样率为 2×10^6 sampling / s。

在实验中,MZI 光程差为 14.6 m。通过信号发生器,对调频激光器添加幅值为 100 mA、频率为 30 Hz 的锯齿波调制,对应的调频带宽约为 30 GHz。

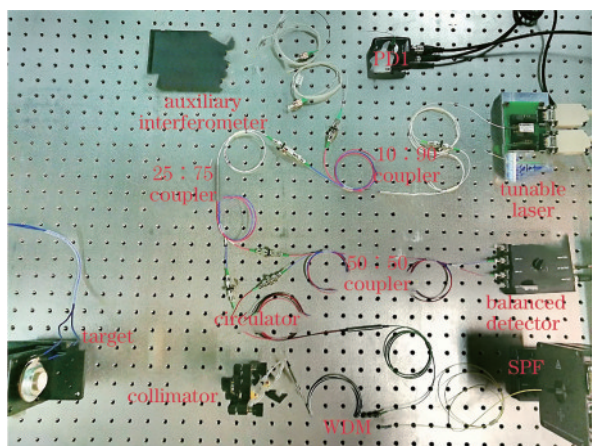


图 4 实验系统结构

Fig. 4 Structural diagram of experimental system

对扬声器添加电压为 250 mV、频率为 60 Hz 的正弦信号。单频激光器采用恒电流驱动, 恒定电流为 50 mA。同时采集三路信号。图 5 (a) 为测距信号, 由于目标振动影响回光的强度, 因此信号的幅值受到调制。图 5 (b) 为测振信号, 图 5 (c) 为辅助干涉仪的参考信号。

根据自混合干涉信号可知, 估计反馈强度 C 为 4.1, 线宽展宽因子 α 为 6。图 6 (a) 为相位解卷法测量的相位变化。当扬声器两端电压为 250 mV 时,

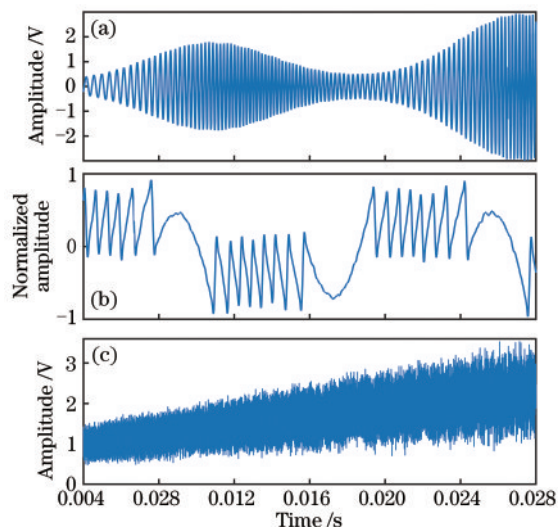


图 5 目标振动时采集的三路信号。(a)测距信号;(b)测振信号;(c)参考信号

Fig. 5 Three signals collected when target vibrates. (a) Ranging signal; (b) vibration signal; (c) reference signal

10 次测量结果的平均值为 5887.8 nm, 测振标准差为 9.1 nm。根据图 5 (c) 参考信号, 对相位补偿前后的测距信号分别进行重采样, 结果分别如图 6 (b)、(c) 所示, 补偿后的信号相位线性度良好。恢复的余弦信号的频谱展宽得到了抑制。

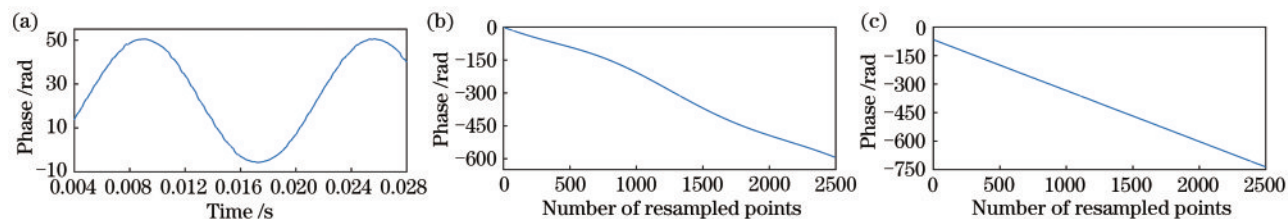


图 6 信号相位。(a)相位解卷法测量的相位;(b)补偿前的重采样信号相位;(c)补偿后的重采样信号相位

Fig. 6 Phase of signal. (a) Phase measured using phase unwrapping method; (b) phase of resampled signal before compensation; (c) phase of resampled signal after compensation

按照最小二乘拟合原理, 分别计算相位补偿前后的两组重采样信号的斜率并计算距离。计算的 10 组距离结果如图 7 所示。采用补偿前的信号相位, 计算的测距标准差为 2742.9 μm , 采用补偿后的信号相位, 计算的测距标准差为 34.2 μm 。当目标没有振动时, 直接对测距相位信号进行重采样并计算距离, 10 次测量结果的标准差为 21.9 μm 。补偿后的测距标准差接近无振动情况下的测距标准差, 可见本文所提出的测距误差补偿方法达到了较好的效果。

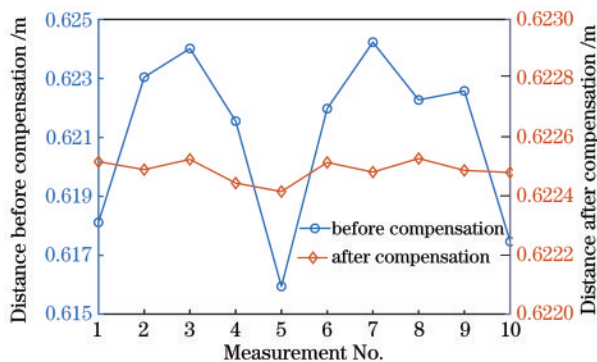


图 7 测距结果

Fig. 7 Ranging results

当对扬声器两端施加频率为 60 Hz 且具有不同

电压值的正弦信号时,扬声器的振幅随电压的增大而增大,在不同振幅下进行测量,10次测量的标准差如表3所示。当目标存在振动时,相位补偿后的

测距标准差相比相位补偿前明显降低,且与目标没有振动时的测距标准差接近,这表明测距误差的补偿效果较好。

表3 不同电压下的测量结果和标准差

Table 3 Measurement results and standard deviations under different voltages

Loud-speaker voltage / mV	Measured amplitude /nm	Standard deviation /nm		
		Vibration measurement	Distance measurement before compensation	Distance measurement after compensation
0			21.9×10^3	
100	2272.8	9.7	2055.3×10^3	25.7×10^3
150	3384.1	6.0	2297.3×10^3	40.4×10^3
200	4627.8	3.3	2560.6×10^3	33.7×10^3
250	5887.8	9.1	2742.9×10^3	34.2×10^3
300	7102.1	7.9	3270.6×10^3	21.4×10^3

4 结 论

针对激光扫频干涉测距目标振动引发的误差放大效应,提出了一种基于激光自混合干涉测振的测距误差补偿方法。该方法测振光路简单,利用相位解卷法测量振动引入的相位变化,完成测距信号的相位补偿。使用频率重采样法校正激光器的调频非线性。仿真和实验结果表明:基于激光自混合效应,使用相位解卷法测量目标振动,测振标准差小于10 nm,当测量的目标振幅为7102.1 nm时,补偿前的测距标准差为3270.6 μm,补偿后的测距标准差为21.4 μm。补偿后的测距标准差接近无振动情况下的测距标准差,表明所提方法有效解决了目标振动引发的测距误差放大问题。

参 考 文 献

[1] Li Y T, Zhang F M, Pan H, et al. Simulation of vibration compensation in frequency-modulated continuous-wave laser ranging system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0104001.
李雅婷, 张福民, 潘浩, 等. 调频连续波激光测距系统的振动补偿仿真研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0104001.

[2] Jing L Q, Zheng G, Sun B, et al. Measurement of distance to moving target using frequency-modulated continuous-wave interference technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 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.

[3] Minoni U, Rovati L, Docchio F, et al. Absolute

distance meter based on a frequency-modulated laser diode [J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(11): 3992-3995.

[4] Zhang F M, Li Y T, Pan H, et al. Vibration compensation of the frequency-scanning-interferometry-based absolute ranging system [J]. Applied Sciences, 2019, 9(1): 147-158.

[5] Jia X Y, Liu Z G, Deng Z W, et al. Dynamic absolute distance measurement by frequency sweeping interferometry based Doppler beat frequency tracking model [J]. Optics Communications, 2019, 430: 163-169.

[6] Deng Z W, Liu Z G, Jia X Y, et al. Dynamic cascade-model-based frequency-scanning interferometry for real-time and rapid absolute optical ranging [J]. Optics Express, 2019, 27(15): 21929-21945.

[7] Slotwinski A, Rezk M. Compact fiber optic geometry for a counter-chirp FMCW coherent laser radar: US7139446 [P]. 2006-11-21.

[8] Tao L, Liu Z G, Zhang W B, et al. Frequency-scanning interferometry for dynamic absolute distance measurement using Kalman filter [J]. Optics Letters, 2014, 39(24): 6997-7000.

[9] Zhao X, Yang H M, Qiang J, et al. High-precision coherent laser ranging method based on Kalman filtering [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1412001.
赵潇, 杨海马, 强佳, 等. 基于卡尔曼滤波的高精度相干激光测距方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1412001.

[10] Lu C. Research on high precision absolute distance measurement based on broadband frequency scanning interferometry [D]. Harbin: Harbin Institute of

- Technology, 2017.
路程. 基于宽带扫频干涉的高精度绝对距离测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [11] Shang Y, Lin J R, Yang L H, et al. Precision improvement in frequency scanning interferometry based on suppression of the magnification effect[J]. Optics Express, 2020, 28(4): 5822-5834.
- [12] Zhang Z Y, Gao Y, Zhao X H, et al. FFT phase detection method for self-mixing laser diode micro-displacement measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(7): 071201.
张照云, 高杨, 赵兴海, 等. 激光自混合微位移测量的 FFT 相位提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(7): 071201.
- [13] Zhang G N, Ye H Y, Xue Q, et al. Displacement measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(3): 66-70.
张广娜, 叶会英, 薛琦, 等. 基于适度光反馈自混合干涉技术的位移测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(3): 66-70.
- [14] Wang L. Study of micro-vibration measurement based on laser self-mixing interference[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.
王路. 基于激光自混合干涉的微振动测量研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- [15] Sun X Q, Ye H Y. Measurement of parameters C and α in optical feedback self-mixing interference system[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(10): 1211-1215.
孙学群, 叶会英. 光反馈自混合干涉系统中参数 C 和 α 的测量[J]. 激光与红外, 2016, 46(10): 1211-1215.
- [16] Xu Z L, Xie Y, Wang Y X, et al. Self-mixing interferometry with terahertz quantum cascade lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1114003.
徐赵龙, 解研, 王迎新, 等. 太赫兹量子级联激光器自混合干涉测量技术研究[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1114003.
- [17] Yao Y N, Zhang F M, Qu X H, et al. Hardware-based equispaced-phase resampling nonlinearity correction algorithm and spectral analysis method[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1212003.
姚艳南, 张福民, 曲兴华, 等. 基于硬件的等光频间隔采样及频谱分析方法[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1212003.
- [18] Xu X K. Research on key technologies of laser frequency scanning interference absolute distance measurement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
许新科. 激光扫频干涉绝对距离测量关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.