

基于光梳多波长干涉实时绝对测距的同步相位解调

王国超^{1,2}, 谭立龙¹, 颜树华², 魏春华²

¹火箭军工程大学, 陕西 西安 710025;

²国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073

摘要 光梳的出现带来了大尺寸高精度绝对测距(ADM)技术的革新,其卓越的光频特性推动了基于多波长干涉的实时 ADM 的发展。为在基于光梳多波长干涉的实时 ADM 中实现干涉信号的同步相位解调,提出了基于多波长外差干涉的多路同步相位解调信号处理方法,研制了相应的同步相位解调模块。实验中通过对波长进行解复用,测试了多路相位计的线性精度、稳定性和同步性等性能,对多波长干涉信号的实时同步相位解调进行了实验分析,验证了该方法实现高精度同步相位解调的可行性。

关键词 测量; 绝对测距; 光梳; 多波长干涉; 同步相位解调

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0112003

Synchronous Phase Demodulation for Real-Time Absolute Distance Measurement Based on Optical Comb Multi-Wavelength Interferometry

Wang Guochao^{1,2}, Tan Lilong¹, Yan Shuhua², Wei Chunhua²

¹Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China;

²College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The advent of optical comb has brought technical innovation for large-scale and high-precision absolute distance measurement (ADM). The marvelous features of optical frequency facilitate the great development to the real time ADM based on multi-wavelength interferometry. To realize synchronous phase demodulation for interference signals in real-time ADM based on optical comb multi-wavelength interferometry, we propose a multi-channel synchronous phase demodulation signal-processing method based on multi-wavelength heterodyne interferometry, and develop a related phase demodulation module. The wavelength de-multiplexing is conducted in the experiment. Performances of the multi-channel phasemeter, such as linear precision, stability and synchronization, are tested. The experimental analysis about the real-time synchronous phase demodulation for multi-wavelength interference signal is carried out, and the feasibility of realizing high-precision synchronous phase demodulation with the proposed method is verified.

Key words measurement; absolute distance measurement; optical comb; multi-wavelength interferometry; synchronous phase demodulation

OCIS codes 120.3180; 140.3600; 280.3400

1 引 言

利用激光多波长干涉可实现纳米精度的绝对测距,从而有利于实现基于光学干涉的大尺寸无导轨精密测距。早在 19 世纪末,研究者们已对多波长干涉技术进行了研究。Benoit^[1]提出了小数重合法思想,该思想在干涉度量学中得到广泛应用。自激光出现以来,小数重合法广泛应用于长度测量,早期主要采用多个二氧化碳气体激光器进行大距离测量^[2-3]。受限于基于多波长干涉的绝对测距(ADM)对激光光源发展的依赖

收稿日期: 2016-04-25; **收到修改稿日期:** 2016-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(51275523)、教育部博士后专项研究基金(20134307110009)

作者简介: 王国超(1985—),男,博士,讲师,主要从事光机电传感及光学精密测量方面的研究。

E-mail: wgc.19850414@163.com

关系,多波长干涉绝对测距技术在较长时间内一直发展缓慢^[4]。现阶段,尽管基于单波长激光干涉的位移测量可实现亚纳米分辨率^[5-6],但由于受高频率稳定度的多波长光源实现技术及波长解调技术的限制,在基于激光多波长干涉的绝对测距中同时实现大尺寸、高精度和实时快速测量的瓶颈一直未得到有效突破。

飞秒激光光学频率梳(简称光梳)的出现不仅实现了微波频标与光学频率的直接连接^[7],而且为激光绝对测距技术提供了诸多相干与非相干的新方法^[8-15],创新性地解决了测量中同时实现大尺寸和高精度测量的矛盾。光梳在频域中表现为一系列等间隔、窄线宽、高稳定的离散光谱,因此可作为精密光学频率标尺产生高频率稳定度的连续波激光^[16]。利用该稳频手段,通过使多个激光器同步锁频到光梳梳模上来产生高稳定度的多波长激光,并在合理选择波长的情况下通过多波长干涉技术实现绝对测距,便可有效解决由波长和频率扫描干涉导致的无法实时快速测量的难题^[17]。此外,所产生的多波长激光具有与光梳相当的频率稳定度,易于实现与原子钟时间频率的对接,比目前广泛用作实现长度基准的碘饱和气体吸收氦氖激光器在频率稳定度上的潜力更大,在长度计量和空间应用等方面具有重要意义^[7]。

在基于多波长干涉的实时绝对测距系统中,除了需要基于光梳的多波长光源,还需要实现干涉信号的同步相位解调,因此该系统的处理过程比传统激光干涉仪对单波长干涉信号的处理过程复杂,且对相位测量指标的要求更高。为实现基于光梳多波长干涉的高精度实时绝对测距技术,本文提出了基于多波长外差干涉的多路同步相位解调信号处理方法,并通过研制同步相位解调模块对该方法进行实验验证。

2 基于光梳多波长干涉的绝对测距系统

基于光梳同步锁频的多波长干涉实时绝对测距系统的原理如图 1 所示。多波长发生器利用光学锁相技术产生多路锁频至光梳的连续激光,不同波长的锁频激光由光纤接口输出,通过偏振控制器(PC)和光纤布拉格光栅阵列(FBGA)后进行合并。合并后的多波长激光由光纤耦合器(FC)分为两部分,这两部分光分别经两个声光调制器(AOM)后产生频移,通过准直棱镜(CL)照射到由 4 个分光棱镜(BS)和角锥反射镜(RR)组成的多波长外差干涉仪。干涉仪产生参考接收信号和测量接收信号的干涉信号之后,由 CL 分别耦合到光纤中,再经过 FBGA 波长解调模块和光电探测器阵列(PDA)后得到各个单波长的参考和测量外差电信号。利用多路同步相位计对各波长对应的参考和测量电信号进行高精度相位测量,再结合波长值和空气折射率,利用基于小数重合法的多波长干涉测距算法得到实时绝对距离^[17]。

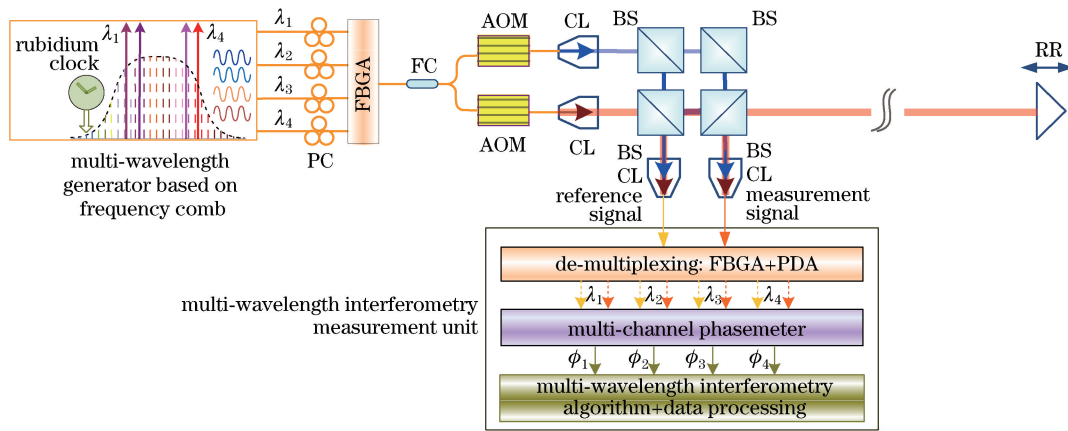


图 1 基于光梳多波长干涉的实时绝对测距原理示意图

Fig. 1 Schematic of real-time ADM based on optical-comb multi-wavelength interferometry

根据基于多波长干涉的绝对测距原理,四波长同步干涉测距的距离 L 可表示为

$$L = \frac{\lambda_1}{2n_1}(m_1 + e_1) = \frac{\lambda_2}{2n_2}(m_2 + e_2) = \frac{\lambda_3}{2n_3}(m_3 + e_3) = \frac{\lambda_4}{2n_4}(m_4 + e_4), \quad (1)$$

式中 λ_i 为波长 ($i=1,2,3,4$), m_i 和 e_i 分别为干涉相位变化的整数(待求量)和小数部分, n_i 为各波长对应的大气折射率。从(1)式中可以看出,多波长干涉系统既可以获取单波长干涉测距的分辨率和精度,又可以在满足大非模糊度量程(NAR)和非频率扫描的前提下完成实时绝对测距。由于测距原理的实质是在同步获

取各波长干涉相位的基础上,利用小数重合法求取整数干涉条纹,从而拓展了单波长干涉测距的 NAR^[18],因此需要对多波长小数干涉条纹进行高精度同步相位解调,且解调精度需满足拓展 NAR 的波长选择要求,具体关系已在文献[19]中进行了详细分析。上述测距系统的多波长外差干涉仪光路在不使用偏振光学元件的条件下,使用经两个 AOM 频移后的干涉拍频来实现外差探测,既避免了因偏振混叠可能带来的非线性误差,同时也对基于高精度相位探测的小数重合法求解具有重要意义。

3 同步相位解调模块

经过干涉仪后的参考信号和测量信号均混有不同的波长成分,为了得到单个波长对应的外差干涉信号,必须对其进行波长解调。利用 FBGA 完成波长解调,该过程可理解为图 1 中合并不同激光波长的逆操作。图 2 为多波长干涉同步相位解调原理图。将干涉仪获取的参考信号和测量信号分别通过 FBGA 进行分离,两者各分离出 4 个不同波长的干涉信号,然后通过光电探测器(PD)获取外差干涉电信号;将由 PD 获取的 8 个电信号根据波长进行配对,获取 4 组参考信号和测量信号,且分别对应不同波长的干涉信号;将这 4 组电信号同时进行带通滤波(BPF)和高速过零比较(C),通过高速数字采集卡(DAQ)对 4 个通道(Ch1、Ch2、Ch3、Ch4)的信号进行采样后,再将信号送入数字模块进行相位测量和数据处理^[20]。为了与该相位解调方案相匹配,光学系统分别将两个 AOM 的频移设定为 40.00 MHz 和 40.04 MHz,这样干涉仪将直接接收到 40.00 kHz 的外差干涉信号,大幅降低了外差探测对 PD 带宽的要求,省去了经典外差干涉信号处理中的混频降频环节,简化了后续测量电路。

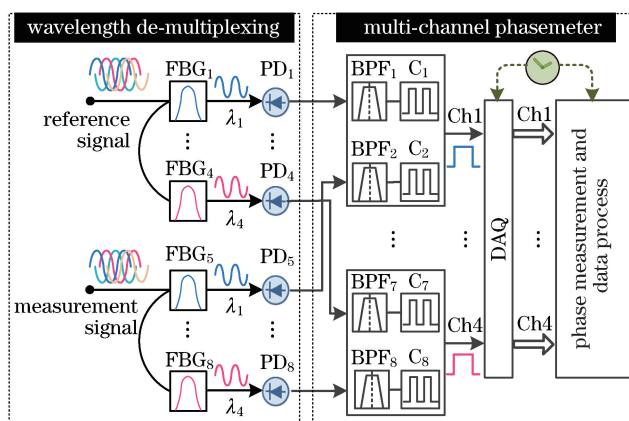


图 2 基于多波长干涉的同步相位解调原理图

Fig. 2 Diagram of synchronous phase demodulation based on multi-wavelength interferometry

获取快速准确的干涉相位信息是基于多波长干涉绝对测距的关键。这里采用高频脉冲计数法来进行数字测相,综合考虑光学系统、信号处理、测相分辨力和更新速度等因素,选用 40.00 kHz 的外差拍频。采用的相位解调方案是将多个波长分解后进行并列测相,为了减小各路测相的时延及随机耦合误差以充分满足绝对测距中小数重合法的精度要求,需实现高标准的多路同步相位测量。图 3 为多路同步相位测量的原理示意图。在利用高频脉冲计数测量多路相位的同时,使用高频脉冲产生相位同步所需的同步触发信号,从而可按触发信号的时间约定,将一连串的相位测量值中同一时刻的多路相位值抽取出来,组成多波长干涉算法所需要的同步相位数组 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 、 ϕ_4 (分别对应 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4)。由于 DAQ 采样信号、计数脉冲信号和同步触发信号共用同一个高频时钟信号,且该时钟信号可溯源到原子钟,较好地保证了多路相位测量的准确性和同步性。

4 相位解调结果

4.1 波长解调后的外差干涉信号测试结果

图 4(a)、(b)分别为用于波长解调和干涉信号探测的实物装置图,由 FBGA 和 PDA 直接获取的外差干涉信号的波形如图 4(c)所示,图中 t_1 、 t_2 ...为测量相位的不同时刻, T_1 、 T_2 ...为差脉冲法对应的时差。测量

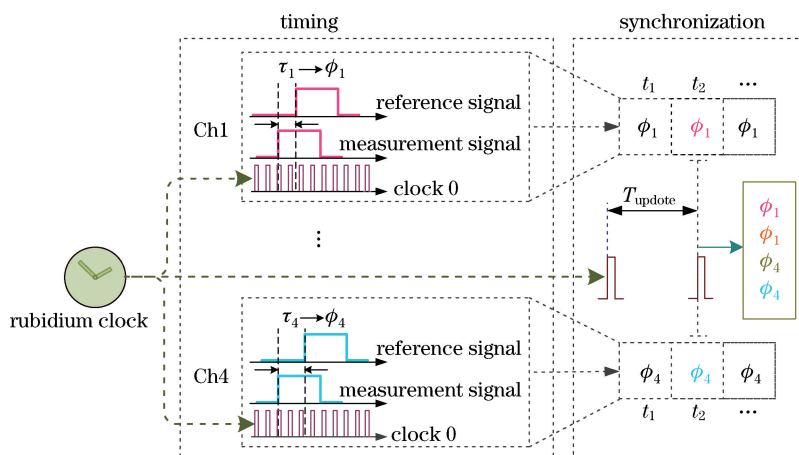


图 3 多路同步相位测量原理示意图

Fig. 3 Schematic of multi-channel synchronous phase measurement

结果是在测量光路静止不动时采集得到的,图 4(c)中参考信号和测量信号的交流峰峰值(PV)接近 3 V,信号周期为 25.00 μs ,对应 40.00 kHz 的外差拍频,且具有较高的信噪比。参考信号比测量信号更接近正弦波,这是因为测量信号所在的测量光路比较长,容易受到空气扰动和振动噪声的影响。

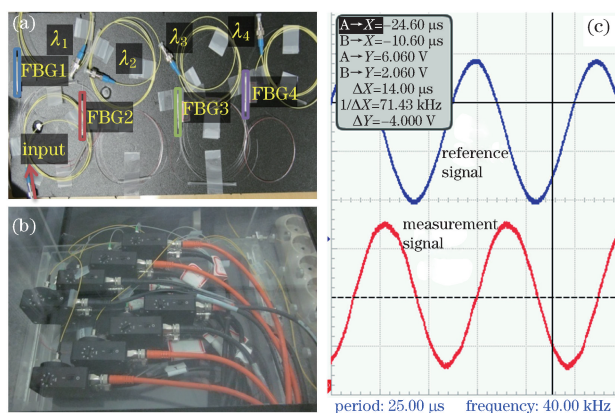


图 4 (a) 波长解调装置; (b) 干涉信号探测装置; (c) 外差信号

Fig. 4 (a) Wavelength demodulation device; (b) detection device for interference signal; (c) heterodyne signal

4.2 多路数字相位计测试结果

4.2.1 线性相位静态测试

为了测试多路相位计的线性相位测量精度,利用溯源至原子钟的信号发生器产生 40.00 kHz 的两路正弦信号,以此作为探测中使用的参考信号和测量信号,并由信号源等间隔地调节相位差。利用多路相位计测量相位的同时,利用锁相放大器(SR830)标定参考相位值,得到的 4 路线性相位测试结果如图 5 所示。图中相位参考值和测量值均采用小数相位表示(与小数重合法匹配),即弧度相位除以 2π ,因此数值 0~1 对应 $0\sim 2\pi$ 。由图 5 可知,所设计的相位计不存在相位测量盲区,拟合线性度达到 0.999,如通道 Ch1 对应的线性度为 0.9992,对应的标准偏差为 1.5×10^{-6} 。线性拟合后的小数相位残余误差基本在 ± 0.001 (95%的置信区间)以内,测距精度对应 $\pm 0.75\text{ nm}$,标准差为 2.7×10^{-4} ,满足多波长干涉小数重合法对相位测量的线性精度要求。图中各路相位测量均在特殊小数相位点(0,0.5,1.0)附近存在相对较大的残差,绝对值略超过 0.001,这主要是由于参考方波信号和测量方波信号的上升沿或下降沿相遇时产生信号互扰。所使用的相位计满足线性测量精度的要求,如果需要更高的线性精度,可以采取一定的耦合措施来降低信号互扰。

4.2.2 同步测量性能动态测试

为了测试相位计各路之间的同步测量性能,设计实验来模拟低速位移并动态测试振动噪声。信号发生器向多路相位计同步输入相同的参考信号和测量信号,参考信号为初始相位恒定、频率为 40.00 kHz 的正弦

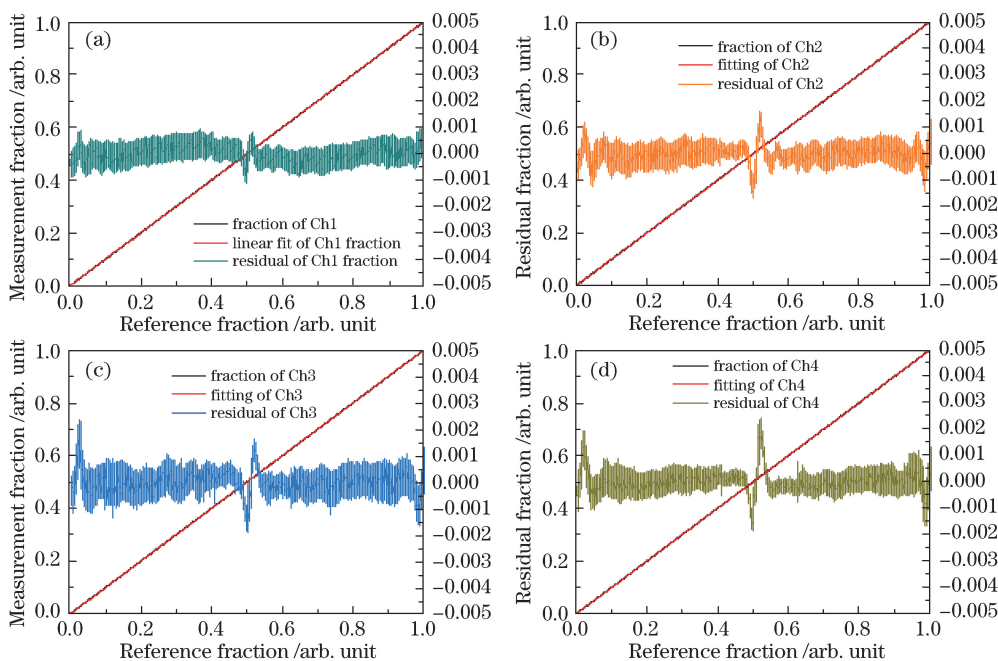


图 5 各个通道的线性相位测试结果。(a) Ch1; (b) Ch2; (c) Ch3; (d) Ch4

Fig. 5 Results of linearity phase test of each channel. (a) Ch1; (b) Ch2; (c) Ch3; (d) Ch4

信号,测量信号的频率设定为 40.001 kHz。测量信号相对于参考信号存在一个相移速率,用小数相位表示为 1.0 s^{-1} ,对应 750 nm/s 的单向微位移速度,多路相位计动态测量结果如图 6 所示。由图 6(a)可见,4 路测量结果基本重合,且相位测量的周期性使得相位值反复从 0 递增至 1,再跳跃至 0。由局部放大图 6(b)、(c)可见,测量相位表现出较好的一致性,各路之间的小数相位偏差均在 8×10^{-4} 以内(测相分辨力为 4×10^{-4}),测量结果充分证明了多路相位计较好的同步测量性能。

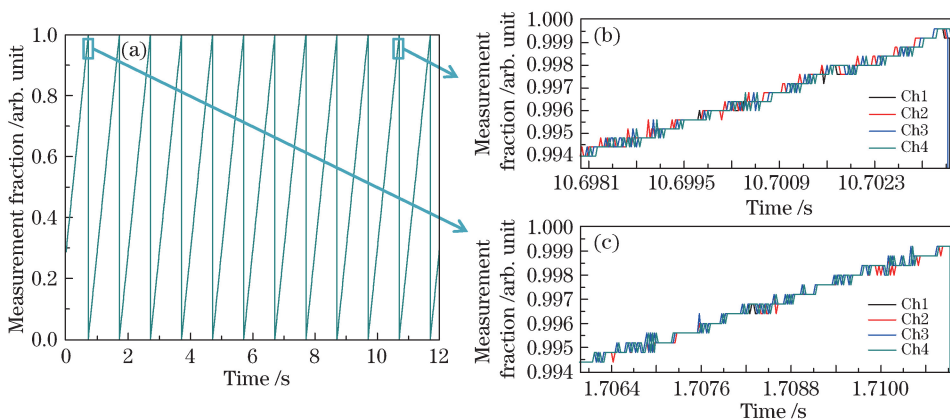


图 6 多路相位计动态测量结果。(a) 0~12 s; (b) 10.6980~10.7035 s; (c) 1.706~1.711 s

Fig. 6 Dynamic measurement results of multi-channel phasemeter. (a) 0~12 s;

(b) 10.6980~10.7035 s; (c) 1.706~1.711 s

实际光学干涉仪存在的低频振动会引起目标测量长度和测量相位的波动变化。为模拟该过程,进行了基于测量信号相位调制的动态相位测试实验。模拟输入信号由信号发生器产生,参考和测量信号频率均设定为 40 kHz ,在此基础上对测量信号进行相位调制,调制量 $\varphi = 10/360 \cdot \sin(2\pi \cdot 10 \cdot t)$ (即采用频率为 10 Hz 的正弦进行调制,调制深度为 $10/360$ (对应弧度制为 $2\pi \cdot 10/360$),相位调制大小对应 $\pm 25 \text{ nm}$ 测量长度的模拟波动变化。对相位进行调制的多路同步测量结果如图 7 所示。由于 10 s 内的测量数据过于密集,图 7(a) 中的调制信息难以辨认,为便于观察,放大 $1 \sim 2 \text{ s}$ 时间内的结果,如图 7(b)所示。从图 7(b)可以看出,多路相位计测量结果完全重合,第 1 路(Ch1)与其他 3 路(Ch2、Ch3、Ch4)的相位测量差值分别如图 7(c)~(e)所

示,相位偏差在测量时间内均小于 8×10^{-4} ,且差值主要集中在 $\pm 4 \times 10^{-4}$ 内,逼近测相分辨率水平。测量结果充分证明了所研制的相位计在动态测试下具有较好的同步性能。

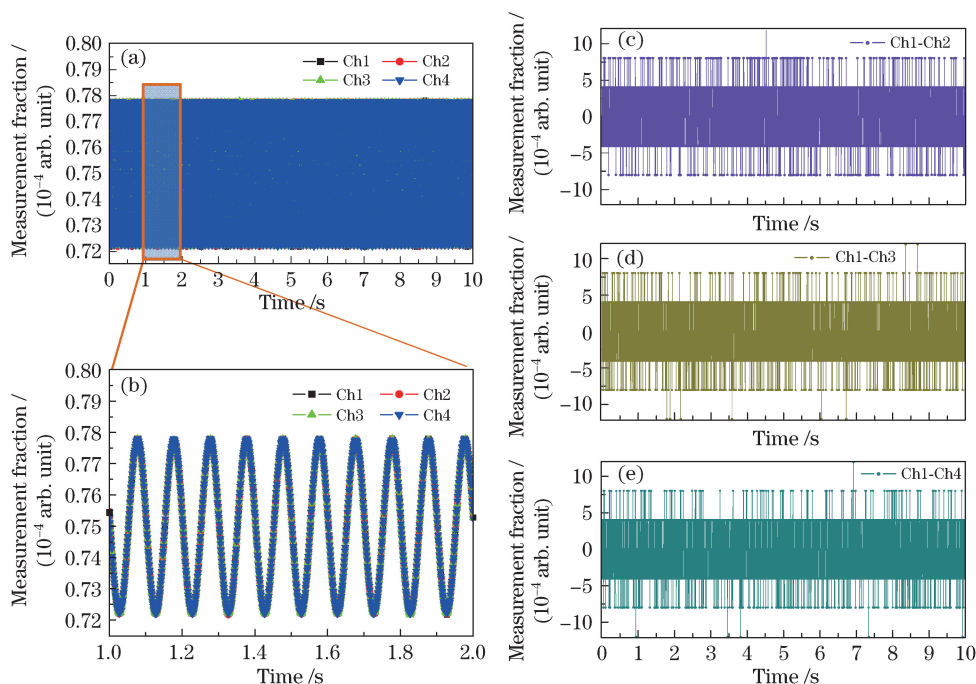


图 7 相位调制下多通道相位计同步测量结果。(a) 0~10 s; (b) 1~2 s; (c) Ch1 与 Ch2 的相位差值; (d) Ch1 与 Ch3 的相位差值; (e) Ch1 与 Ch4 的相位差值

Fig. 7 Synchronous measurement results of multi-channel phasemeter with phase modulation. (a) 0~10 s; (b) 1~2 s; (c) phase difference between Ch1 and Ch2; (d) phase difference between Ch1 and Ch3; (e) phase difference between Ch1 and Ch4

4.2.3 稳定性测试

为了测试所研制相位计的长时间稳定性,评估其受环境温度变化以及电路热效应的影响程度,对相位测量结果进行了 1 h 的连续观测。输入的参考相位和测量相位为由信号发生器产生的具有固定相位差的信号,所研制的相位计的测量结果如图 8(a)所示。测量得到的最大相位偏差为 8×10^{-4} ,主体相位波动只有 4×10^{-4} ;相位均值为 5.3×10^{-5} ,标准偏差为 4.6×10^{-5} ,表明所研制的相位计具有较好的长时间测量稳定性。

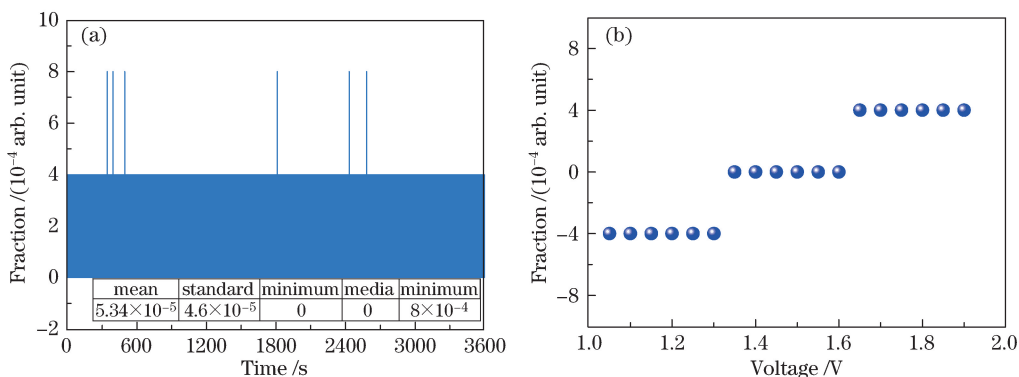


图 8 (a) 相位稳定性测量结果;(b) 测量信号幅值变化对相位测量精度的影响

Fig. 8 (a) Phase stability measurement results; (b) influence of amplitude variation of measured signal on phase measurement accuracy

在实际测距过程中,测量通道的外差干涉信号幅值并非恒定,会出现波动,并且随光路距离的增加而衰减,导致测量信号在过零点时发生微小变化,继而在脉冲计数测量相位时产生误差。为了评估测量信号幅值变化对相位测量的影响,通过改变输入参考和测量信号的电压幅值对相位测量结果进行观测,结果如

图 8(b)所示。结果表明,以幅值为 1.5 V 对应的相位测量值作为参考相位点,当幅值增加至 1.70~1.95 V 时,小数相位测量结果的改变量为 4×10^{-4} ;当幅值降低至 1.05~1.30 V 时,小数相位测量结果的改变量为 -4×10^{-4} 。该测量结果表明信号幅值影响相位测量精度,但通过合理设置过零点和降低零漂,相位计在 ± 0.5 V 的信号幅值变化范围内可将相位偏差控制在测相分辨力水平。

4.3 基于光梳多波长干涉的同步相位解调结果

为了测试相位解调模块的实际解调性能,需针对具体的基于光梳多波长干涉的绝对测距装置进行相位解调。图 9 为绝对测距过程中将目标反射镜固定在导轨上某处基于多波长干涉的实时相位解调结果。图 9(a)给出了测量时间为 4.2 s 的基于光梳多波长干涉的多路同步相位解调结果,采集相位值的时间间隔为 0.01 s,Ch1~Ch4 对应的具体波长分别为 1530.27813,1531.04871,1554.17669,1554.94118 nm。图中波长数值保留 6 位有效数字,小数相位波动的 PV 值达到 0.15,对应约 200 nm 的光程波动。由于多波长干涉仪为共光路设计,4 路小数相位值表现出相同的波动趋势。为了清晰地观测到波动起伏和多路同步现象,局部放大 0.63~0.89 s 时间段内的相位结果,如图 9(b)所示,可见 4 个波长的干涉相位保持一致的起伏,时刻同步且大小相当。图 9(c)~(e)分别为 0.63~0.89 s 时间段内 Ch1 与其他 3 路(Ch2、Ch3、Ch4)的相差值,其 PV 值分别为 0.0084,0.0068,0.0092,标准差分别为 0.0022,0.0018,0.0027。该相差值为多路相位解调结果之间的相对相差,可理解为合成小数相位(对应合成波长)。由于相位计自身存在随机测量误差,波长解调光纤模块和相位计电路模块等也存在一定的非对称误差,同时各干涉波长大小和折射率也有差异,因此实际的合成小数相位存在误差,从而表现出一定的波动。但从图 9 的统计结果可知,合成小数相位的波动偏差明显小于多级合成波长进行级间融合时所需的相位不确定度^[19],证明了所提相位解调方法满足基于多波长干涉的绝对测距算法对同步相位测量的要求。

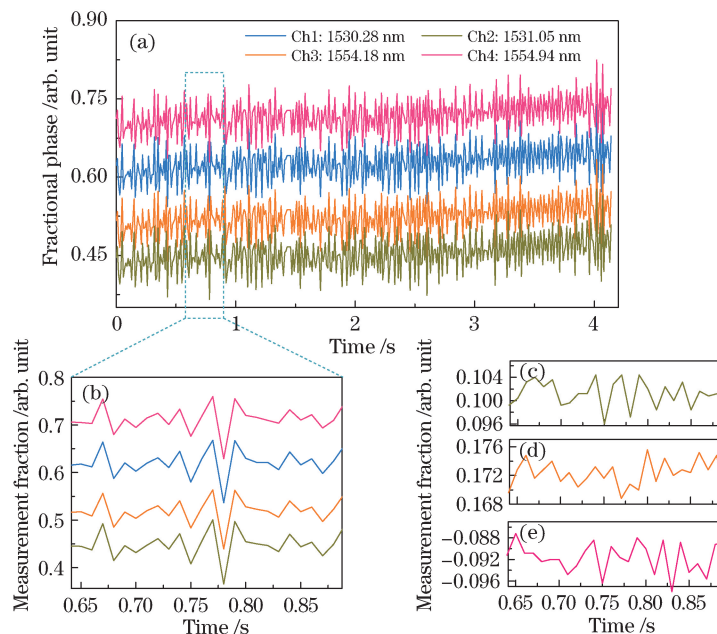


图 9 多波长干涉同步相位解调结果。(a) 0~4.2 s; (b) 0.63~0.89 s; (c) Ch1 与 Ch2 的相差值;
(d) Ch1 与 Ch3 的相差值; (e) Ch1 与 Ch4 的相差值

Fig. 9 Synchronous phase demodulation results of multi-wavelength interferometry. (a) 0~4.2 s; (b) 0.63~0.89 s;
(c) phase difference between Ch1 and Ch2; (d) phase difference between Ch1 and Ch3;
(e) phase difference between Ch1 and Ch4

5 结 论

提出了基于多波长外差干涉的多路同步相位解调信号处理方法,对所研制的相位解调模块进行了测试。实验结果表明,多路相位计小数相位测量的线性度优于 0.999,相位测量偏差对应的测距精度约为 0.75 nm;在模拟平台以 $\mu\text{m/s}$ 做单向运动并且在低频振动的情况下,测得的测相同步精度优于 8×10^{-4} ;在 1 h 相位

重复测量中,信号强度变化带来的测相偏差均不大于 4×10^{-4} ,偏差对应测距误差约为 0.3 nm;对光梳多波长干涉进行实时同步相位解调时,各路相位解调结果保持良好的同步性,合成小数相位波动标准差小于 0.003,满足合成波长进行级间融合的要求。测试结果充分证明了所提出的信号处理方法具有较好的同步解调性能,可较好地满足基于光梳多波长干涉的实时绝对测距系统对高精度多路同步相位解调的需求。

参 考 文 献

- [1] Benoit M R. Application des phénomènes d'interférence a des déterminations métrologiques[J]. Journal de Physique Théorique et Appliquée, 1898, 7(1): 57-68.
- [2] Bourdet G L, Orszag A G. Absolute distance measurements by CO₂ laser multiwavelength interferometry[J]. Applied Optics, 1979, 18(2): 225-227.
- [3] Walsh C J. Measurements of absolute distances to 25 m by multiwavelength CO₂ laser interferometry[J]. Applied Optics, 1987, 26(9): 1680-1687.
- [4] Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin, *et al.* Absolute distance measurement by using 117 μm synthetic wavelength[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2947-2951.
梁 晶, 龙兴武, 张 斌, 等. 用 117 μm 合成波长实现绝对距离干涉测量[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2947-2951.
- [5] Bobroff N. Recent advances in displacement measuring interferometry[J]. Measurement Science and Technology, 1993, 4(9): 907-926.
- [6] Manske E, Jäger G, Hausotte T, *et al.* Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(7): 074001.
- [7] Kim S W. Metrology: combs rule[J]. Nature photonics, 2009, 3(6): 313-314.
- [8] Minoshima K, Matsumoto H. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser[J]. Applied Optics, 2000, 39(30): 5512-5517.
- [9] Ye J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe[J]. Optics Letters, 2004, 29(10): 1153-1155.
- [10] Jin J, Kim Y J, Kim Y, *et al.* Absolute length calibration of gauge blocks using optical comb of a femtosecond pulse laser[J]. Optics Express, 2006, 14(13): 5968-5974.
- [11] Schuhler N, Salvadé Y, Lévêque S, *et al.* Frequency-comb-referenced two-wavelength source for absolute distance measurement[J]. Optics Letters, 2006, 31(21): 3101-3103.
- [12] Joo K N, Kim S W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser[J]. Optics Express, 2006, 14(13): 5954-5960.
- [13] Lee J, Kim Y J, Lee K, *et al.* Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses[J]. Nature Photonics, 2010, 4(10): 716-720.
- [14] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, *et al.* Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 351-356.
- [15] Wang Guochao, Yan Shuhua, Yang Jun, *et al.* Analysis of an innovative method for large-scale high-precision absolute distance measurement based on multi-heterodyne interference of dual optical frequency combs[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(7): 070601.
王国超, 颜树华, 杨 俊, 等. 一种双光梳多外差大尺寸高精度绝对测距新方法的理论分析[J]. 物理学报, 2013, 62(7): 070601.
- [16] Chun B J, Hyun S, Kim S, *et al.* Frequency-comb-referenced multi-channel fiber laser for DWDM communication[J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29179-29185.
- [17] Wang G C, Jang Y S, Hyun S, *et al.* Absolute positioning by multi-wavelength interferometry referenced to the frequency comb of a femtosecond laser[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 9121-9129.
- [18] Tilford C R. Analytical procedure for determining length from fractional fringes[J]. Applied Optics, 1977, 16(7): 1857-1860.
- [19] Wang Guochao, Wei Chunhua, Yan Shuhua. Wavelength selection and non-ambiguity range analysis for optical-comb-referenced multi-wavelength absolute distance measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0412002.
王国超, 魏春华, 颜树华. 光梳多波长绝对测距的波长选择及非模糊度量程分析[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0412002.
- [20] Zhang E, Chen B, Yan L, *et al.* Laser heterodyne interferometric signal processing method based on rising edge locking with high frequency clock signal[J]. Optics Express, 2013, 21(4): 4638-4652.