

基于低相干干涉技术的大量程高精度镜面间距测量

师中华^{1,2} 杨宝喜^{1,2} 胡小邦¹ 金超群^{1,2} 魏张帆^{1,2} 李 璟¹ 黄惠杰^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 描述了利用低相干干涉技术实现光学镜面间距测量的方法。首先,采用微机电系统(MEMS)光开关多通道延迟结构实现测量范围的多倍增,然后通过共光路激光测距结构实现扫描反射镜的位移测量,再利用包络提取算法对低相干干涉信号的零光程差位置进行定位,最后实现镜面间距的高精度测量。实验测量系统为全光纤结构,利用该系统完成了对因瓦合金(Invar)标准块、大间距光学结构和光学镜组的镜面间距测量,在导轨扫描量程为 300 mm 的条件下,实现了在 0.02~550 mm 范围内的镜面间距测量,测量精度优于 0.5 μm 。该套系统可用于光刻机曝光系统、航测镜头、激光谐振腔等高性能精密光学系统的装调与检测。

关键词 测量; 镜面间距; 低相干光干涉; 激光测距; MEMS 光开关

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0612001

Lens Surface Distance Measurement with Large Range and High Precision Based on Low Coherence Interferometry

Shi Zhonghua^{1,2} Yang Baoxi¹ Hu Xiaobang¹ Jin Chaoqun^{1,2} Wei Zhangfan^{1,2}

Li Jing¹ Huang Huijie^{1,2}

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The distance measurement of optical mirror surfaces based on low coherence interferometry is described. The system realizes lens surface distance measurement with high precision, by first using double micro-electromechanical systems (MEMS) switches to multiply enlarge the measuring range, secondly by using co-light-path laser ranging structure to realize the displacement measurement of the scanning mirror, and thirdly by using the envelope extraction algorithm to obtain the zero light path difference location of low coherence light interference signal. The whole measurement system has an all-fiber structure. Lens surface distances of Invar gauge, optical system with large air gap and optical lens group are measured with this system. Under the condition of the scanning range of 300 mm, distance measurement within the range of 0.02~550 mm by using MEMS switches is realized, and the experimental results indicate that the system possesses high measurement accuracy below 0.5 μm . Such a measurement system has important applications in optical testing and optical alignment of high precision optical systems, such as lithography exposure system, aerial camera, and laser resonator.

Key words measurement; lens surface distance; low coherent interferometry; laser ranging; MEMS switch

OCIS codes 120.3180;120.4290;060.2340

收稿日期: 2015-12-16; **收到修改稿日期:** 2016-01-28

基金项目: 国际科技合作专项(2011DFR10010)、国家科技重大专项(2011ZX02402)

作者简介: 师中华(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测与光学设计方面的研究。

E-mail: szh@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 杨宝喜(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光学系统设计、光电检测和高数值孔径光学光刻技术等方面的研究。E-mail: yangbx@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引言

透镜作为组成光学系统最基本的光学元件,其中心厚度的加工误差及装配精度会对光学系统的成像质量产生较大的影响,特别是光刻机曝光系统、航测镜头、干涉仪标准镜头等高性能精密光学系统对透镜中心厚度和透镜间隔都有严格的要求,透镜中心厚度的加工精度一般为 $0.005\sim 0.01$ mm。目前透镜中心厚度和透镜间隔的主要测量方法可分为接触式测量和非接触式测量两大类:接触式测量^[1-2]主要通过测头接触透镜中心前后表面,直接获取其几何厚度和透镜间距,但这种方式容易划伤透镜,破坏表面膜层;非接触式测量主要包括图像法^[3]、轴向色散法^[4-5]、差动共焦法^[6-7]等,其测量精度最高可达微米量级,多用于单片透镜中心厚度的测量。

低相干干涉技术广泛应用于生物组织结构成像^[8-9]、光纤传输特性测量^[10]和光纤传感技术^[11]等方面,其最基本的测量结构是迈克耳孙干涉结构。高相干光相干长度很长,当测量光和参考光光程差为波长的整数倍时出现干涉波峰,难以对待测样品结构进行测量,而低相干光只有当测量臂反射光与参考臂反射光等光程时才产生干涉峰值,具有很好的空间定位特性,因此可通过提取待测样品内部背向散射光或表面反射光的干涉信息,来确定待测样品的相关物理量,具有较高的灵敏度和精度,适用于非接触式无损测量。

本文基于低相干光干涉技术实现光学镜面间距的测量,先采用微机电系统(MEMS)光开关多通道延迟结构实现测量范围的多倍增,进而通过共光路激光测距结构和包络提取算法实现镜面的高精度定位,该方法可满足大量程高精度的测量需求。

2 基本原理

2.1 镜面间距测量原理

如图 1 所示,利用低相干干涉技术实现镜面间距测量,其中 R_1 和 R_2 为被测透镜前后表面的反射光信号。宽带光源发出的低相干光经过光纤耦合器可分为两束:一束为测量光,经可调焦透镜聚焦在被测镜组内部某个位置,测量光在被测镜组中各个透镜表面产生反射,反射光经过可调焦透镜再返回到光纤耦合器中;另一束为参考光,经扫描反射镜反射后进入光纤耦合器中,与反射信号光叠加产生干涉信号。一方面,来自被测镜组不同表面的反射信号具有不同的光程,另一方面,参考反射光的光程随着扫描反射镜位置的改变而改变,当参考反射光与被测镜组某一表面反射光的光程差为零时产生干涉极大值信号,随着光程差的增加,相干信号迅速减小。为了精确获得扫描反射镜的移动距离,在低相干测量结构基础上加入激光干涉测距结构,利用激光干涉信号周期数得到扫描反射镜的位移,结合低相干光干涉定位信号从而实现镜面间距的高精度测量。图 2 所示为中心波长 1310 nm、谱宽 30 nm 的超辐射发光二极管(SLD)光源的干涉信号图,其中 l 为相干长度。

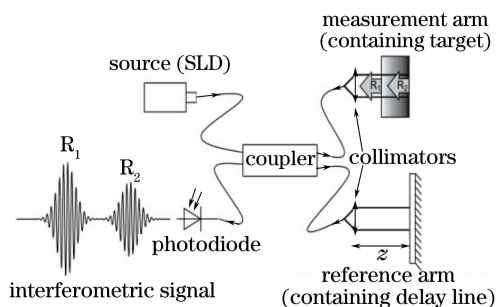


图 1 低相干光干涉测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement based on low coherent interferometry

2.2 量程倍增原理

利用低相干干涉技术测量透镜组镜面间距时,可通过增加扫描导轨的长度来增大测量范围,但其成本及对扫描导轨的性能要求会大大增加,且受制造水平和外形结构尺寸的限制,扫描导轨不可能无限加长。为了在不增加扫描导轨长度的情况下增大测量范围,提出了一种量程倍增技术,可使测量范围成倍增加。在上述

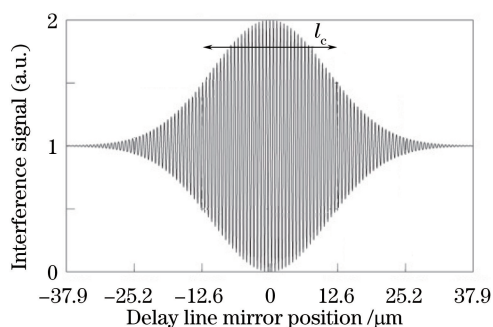


图 2 低相干光干涉信号

Fig. 2 Measurement signal of low coherent interferometry

低相干干涉结构基础上,在参考反射臂中增加双 MEMS 光开关多通道延迟结构,即在不同测量通道中加入不同长度的延迟光纤,光纤长度根据导轨扫描量程来确定,每个通道具有不同的测量区间且相邻区间有部分重叠。由于目前对光纤长度的测量难以达到较高的精度,且光开关各个通道本身的光纤长度并不严格相等,所以提出共干涉信号的方法可实现各个通道的测量范围的高精度拼接,在参考反射臂中加入 N 通道 MEMS 光开关组的同时,测量臂中增加 $N-1$ 个衔接信号臂,利用相邻通道间的衔接信号可实现各个测量区间的测量范围的高精度拼接,消除光纤长度本身对测量精度的影响,从而实现量程的多倍增。双 MEMS 光开关多通道延迟结构如图 3 所示。

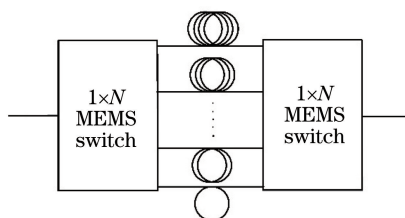


图 3 双 MEMS 光开关多通道延迟结构

Fig. 3 Delay structure with double MEMS switches

对于扫描量程为 300 mm 的导轨,双 MEMS 光开关的第一通道使用长度约 1 m 的延迟光纤,其在 1310 nm 处的群折射率约为 1.466;为使第二通道的测量范围在第一通道的基础上平移约 250 mm 的距离,第二通道所使用的延迟光纤长度要比第一通道长约 $250/1.466=171$ mm,即第二通道使用的延迟光纤长度约为 1.17 m;这样第一通道的测量范围为 0.02~300 mm,第二通道的测量范围为 250~550 mm,衔接信号位于 250~300 mm 测量范围内,从而实现了量程的多倍增。两通道结构测量范围拼接原理如图 4 所示。以此类推,可采用任意通道数量的 MEMS 光开关,实现量程的多次倍增。

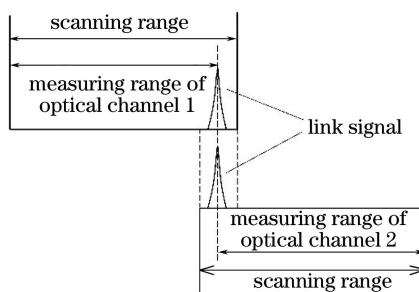


图 4 两通道结构测量范围拼接原理图

Fig. 4 Schematic of measurement range for optical channel 1 and channel 2

3 实验测量系统

镜面间距测量系统结构如图 5 所示,其中 LD 为激光二极管,PD 为光电探测器,WDM 为波分复用器,DAQ 为数据采集卡。系统所采用的 SLD 光源中心波长为 1310 nm,谱宽为 85 nm,相干长度 $l_c = \frac{2 \ln 2 \lambda^2}{\pi \Delta \lambda} = 9 \mu\text{m}$;测距光源的中心波长为 1550 nm,线宽为 200 kHz,具有良好的单色性。系统采用波分复用器对 1310 nm 测量光束和 1550 nm 测距光束进行分束和合束,测量结构和测距结构共同使用光开关组和扫描导轨,实现二者的部分共光路设计,其中导轨的扫描量程为 300 mm。系统使用两个 1×2 的 MEMS 光开关来实现测量范围倍增,光纤反射镜 1 将部分测量光反射使得测量通道 1 和测量通道 2 之间存在一个衔接信号,实现两通道测量范围的高精度拼接。两个带宽为 200 MHz 的 InGaAs 光电探测器分别将低相干测量信号和激光测距信号转换为电信号,在扫描反射镜匀速扫描的同时,通过数据采集卡同步采集两个光电探测器的输出信号。

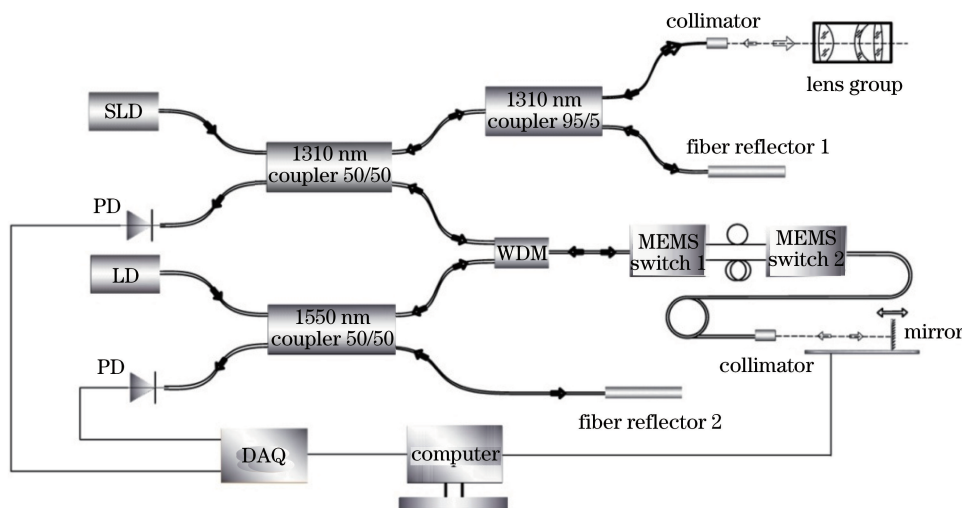


图 5 实验测量系统结构

Fig. 5 System structure of experimental measurement

为准确获得测量干涉信号极大值(零光程差)的位置,计算测量信号每个采样点的调制度 γ 来确定干涉区域。 I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 为测量信号相邻的 5 个采样点的强度值, γ 的表达式^[12]为

$$\gamma = \sqrt{(I_2 - I_4)^2 - (I_1 - I_3) \cdot (I_3 - I_5)}, \quad (1)$$

通过选定合适的阈值来确定测量信号中的干涉区域,对提取出的干涉信号进行频域低通滤波和时域均值滤波后再次提取信号包络,通过包络极大值确定干涉信号的极大值位置,图 6 所示为测量干涉信号和所提取的信号包络。

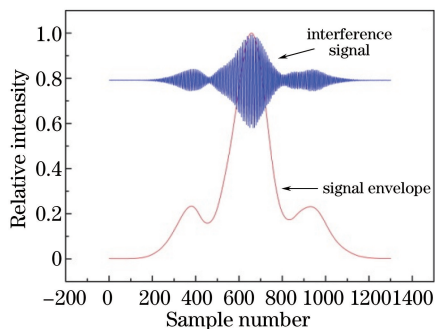


图 6 测量干涉信号和信号包络曲线

Fig. 6 Measured interference signal and signal envelope

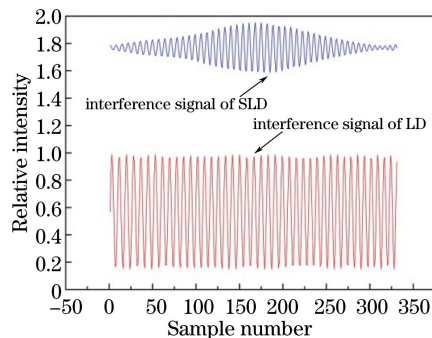


图 7 低相干测量信号和激光测距干涉信号

Fig. 7 Measurement signal of low coherence and coherence signal of laser ranging

相邻测量干涉信号峰值间的距离通过统计激光测距干涉信号波峰和波谷的数量来获得,图 7 所示为同

步采样得到的低相干测量信号和激光测距干涉信号,相邻测量干涉信号峰值间的光学距离 D_r 可表达为

$$D_r = M\lambda_L / 4n_a^{\lambda_L}, \quad (2)$$

式中 λ_L 为测距激光的波长, M 为相邻测量干涉信号峰值间激光测距干涉信号波峰和波谷的数量, $n_a^{\lambda_L}$ 为空气在波长 λ_L 下的折射率。

由于测量所用的光源为宽带光源,且所测样品为色散介质,当测量光束经过待测样品相邻表面间的光程与参考光束所经过的光程相等时出现干涉极大值,即满足

$$D_m n_g^{\lambda_{\text{SLD}}} = D_r n_a^{\lambda_{\text{SLD}}}, \quad (3)$$

式中 D_m 为待测样品厚度, $n_g^{\lambda_{\text{SLD}}}$ 为待测样品材料在光波长 λ_{SLD} 下的群折射率, $n_a^{\lambda_{\text{SLD}}}$ 为空气在光波长 λ_{SLD} 下的群折射率。在光波长 λ 下的群折射率 n_g 的计算公式^[13] 为

$$n_g^\lambda = n^\lambda - \frac{\delta n^\lambda}{\delta \lambda} \cdot \lambda, \quad (4)$$

式中的材料折射率 n^λ 通过 Sellmeier 色散公式^[14] 进行计算:

$$n^\lambda = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i}}, \quad (5)$$

式中 $B_1 \sim B_3$ 和 $C_1 \sim C_3$ 是材料的 Sellmeier 系数。由(2)式和(3)式得出待测样品的物理厚度为

$$D_m = N\lambda_L \cdot n_g^{\lambda_{\text{SLD}}} / 4n_a^{\lambda_L} n_g^{\lambda_{\text{SLD}}}, \quad (6)$$

实际测量中,为了满足光程匹配的测量条件并降低因待测样品光轴与测量光束不重合所引入的测量误差,需将待测样品放置在可调焦准直器后 600~1150 mm 范围内。为使在测量范围内待测样品所有面的反射光都可以耦合进入可调焦准直器,待测样品光轴与测量光束的夹角 θ 应小于 0.5 mrad,则因待测样品光轴与测量光束不完全重合而引起的测量误差为

$$\Delta d = d \left(\frac{1}{\cos 2\theta} - 1 \right), \quad (7)$$

式中 Δd 为厚度测量误差, d 为镜面间距厚度。当所测镜面间距为 550 mm 时,最大测量偏差为 0.275 μm 。

由于算法是通过统计低相干光干涉峰值间的激光测距干涉信号波峰和波谷的数量来得到镜面间距的,其计算精度约为 $\lambda_L/4 = 0.387 \mu\text{m}$,利用 Sellmeier 色散公式计算材料群折射率(如对于肖特玻璃其折射率计算误差不超过 1×10^{-5})的计算误差对计算结果的影响在几纳米量级,可忽略不计,所以系统总的测量误差约为

$$\delta_{D_m} = \sqrt{0.275^2 + 0.387^2} = 0.425 \mu\text{m}. \quad (8)$$

4 实验测量结果

实际搭建的镜面间距测量系统如图 8 所示,利用该系统分别对包含因瓦合金(Invar)标准块的大间距光学系统结构和包含 6 片透镜的透镜组的镜面间距进行测量。

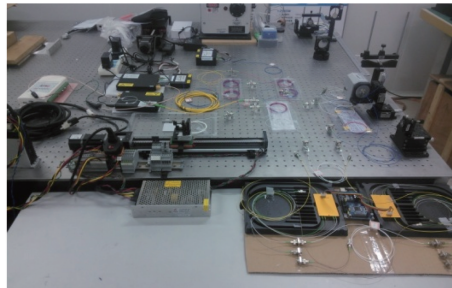


图 8 实验测量系统

Fig. 8 Experimental measurement system

4.1 大间距光学结构镜面间距测量结果

所测量的大间距光学结构由一块平板玻璃和 Invar 标准块构成,其结构如图 9 所示,其中平板玻璃由 LAK2 玻璃材料制成,Invar 标准块由 NBK7 玻璃材料和 Invar 合金构成,Invar 标准块中间的空隙标称值为 19.9872 mm,平板玻璃和 Invar 标准块间的空气间隙约为 464 mm。由于所测量的光学系统结构的总长度远大于导轨的扫描量程(300 mm),所以需要利用 MEMS 的双通道结构对所测的光学系统进行两次扫描。

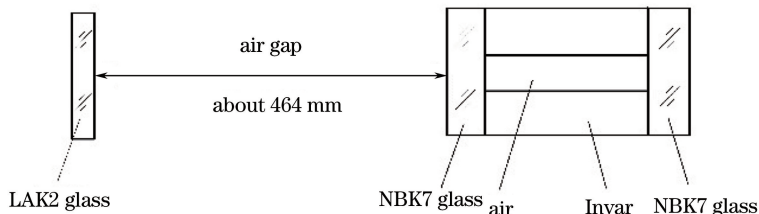


图 9 大间距光学系统结构图

Fig. 9 Structure diagram of optical system with large air gap

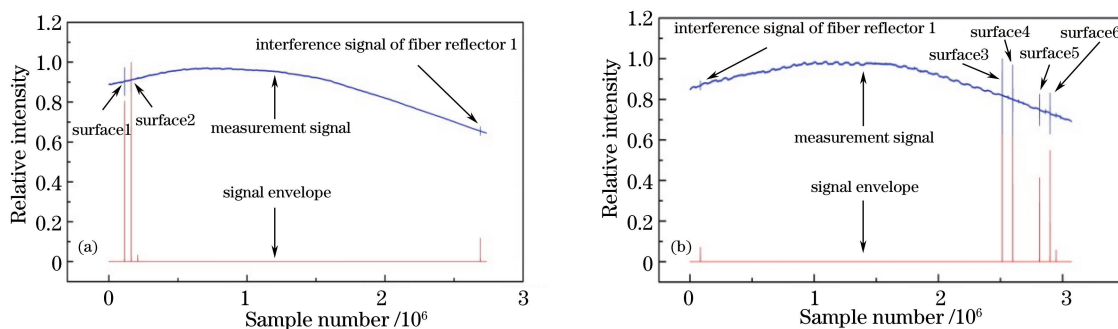


图 10 (a)测量通道 1 和(b)测量通道 2 的测量信号和信号包络

Fig. 10 Measurement signal and signal envelope of (a) optical channel 1 and (b) channel 2

当待测样品为大间距光学结构时, MEMS 光开关组的测量通道 1 和测量通道 2 的测量信号和信号包络如图 10 所示。将光纤反射镜 1 反射光的干涉信号作为测量通道 1 和测量通道 2 的衔接信号,平板玻璃与 Invar 标准块之间的空气间隙通过计算表面 2 的干涉信号和衔接信号间的激光干涉波峰波谷数及衔接信号和表面 3 的干涉信号间的激光干涉波峰波谷数来获得,由于所测结构中的空气间隙比较大,测量时应保证测量环境尽可能稳定,各个镜面之间间距的 5 次测量结果如表 1 所示。

表 1 大间距光学系统镜面间距测量结果

Table 1 Measurement results of optical system with large air gap

No.	Thickness of LAK2 glass /mm	Air gap between optical flat and Invar gauge /mm	Thickness of NBK7 glass /mm	Air gap of Invar gauge /mm	Thickness of NBK7 glass /mm
1	2.8018	464.7236	5.2363	19.9874	5.2697
2	2.8022	464.7248	5.2365	19.9874	5.2701
3	2.8022	464.7248	5.2363	19.9871	5.2699
4	2.8018	464.7246	5.2363	19.9874	5.2701
5	2.8022	464.7241	5.2365	19.9874	5.2701
Mean value	2.8021	464.7244	5.2364	19.9873	5.2700
Standard deviation	0.000229	0.000523	0.000122	0.000124	0.000183

由测量结果可以看出, Invar 标准块的空气间隙测量结果与标称值偏差约为 100 nm,测量标准差为 124 nm。同时实现了平板玻璃和 Invar 标准块间的大空气间隙测量,且有较好的测量重复性,测量标准差为 523 nm。

4.2 透镜组镜面间距测量结果

所测的透镜组含有 6 片透镜,其结构设计图如图 11 所示,镜组的总长度小于导轨扫描量程,可使用单通道进行测量。

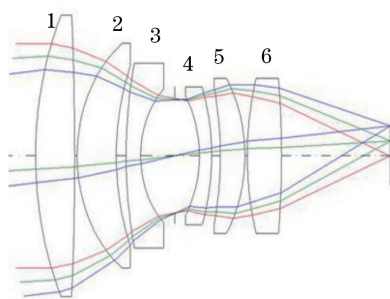


图 11 所测透镜组结构设计图

Fig. 11 Structural design drawing of lens group

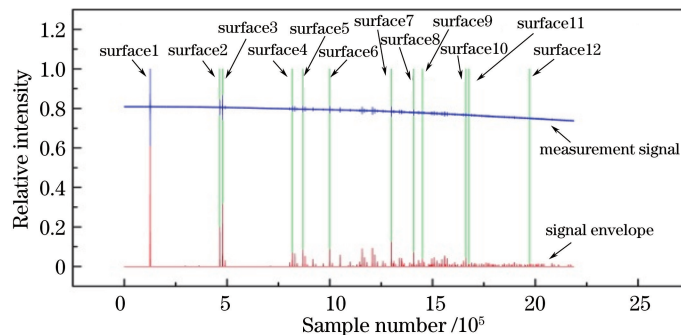


图 12 透镜组的测量信号和信号包络

Fig. 12 Measurement signals and signal envelope of lens group

当待测样品为透镜组时,系统的测量信号、信号包络及镜面定位结果如图 12 所示。由于多透镜结构中存在较多的二次和多次反射光的干涉信号,无法直接利用干涉信号进行镜面定位,所以需要根据透镜组设计值来确定各个镜面一次反射光的干涉信号,从而计算出实际透镜中心厚度及透镜间距。由于受到测量光束聚焦位置和透镜表面反射损耗的影响,位于透镜组后端的透镜的表面反射光强度较弱,测量标准差相对较大,因而对于透镜非常多且系统总长很长的光学系统,无法一次性完成测量。所测透镜组镜面间距设计值和系统 5 次测量的平均结果及测量标准差如表 2 所示。

表 2 所测透镜组镜面间距设计值和平均测量值

Table 2 Designed thickness and mean of measured thickness of lens group

Element	Designed thickness /mm	Mean of measured thickness /mm	Standard deviation /nm
Lens 1	8.00	8.0335	79
Air gap 1/2 ^a	0.50	0.4846	197
Lens 2	8.00	8.0271	148
Air gap 2/3	2.00	2.0098	267
Lens 3	3.00	3.0122	133
Air gap 3/4	12.00	11.9917	311
Lens 4	2.50	2.5115	237
Air gap 4/5	1.70	1.6668	326
Lens 5	5.00	5.0279	403
Air gap 5/6	0.50	0.4851	237
Lens 6	7.00	7.0274	467

a:表示透镜 1 与 2 之间,以下同。

由测量结果可以看出,随着透镜测量面数的增加,干涉信号逐渐减弱,对零光程位置的定位精度降低,测量标准差逐渐增大,系统的最大测量标准偏差为 467 nm,可实现对复杂结构光学镜头中的透镜中心厚度和透镜间隔的高精度测量。

5 结 论

利用低相干干涉技术实现了对不同光学结构镜面间距的测量,采用 MEMS 光开关多通道延迟光路实现了测量范围的多倍增,通过共光路激光测距结构和包络提取算法实现了镜面的高精度定位。通过实验验证,该系统的测量精度优于 $0.5\ \mu\text{m}$,可满足大量程高精度的测量需求,在光学材料厚度检测、光学加工和光学装校等领域具有良好的应用前景。

本文所述的测量系统未考虑环境温度、湿度和气压对材料折射率影响,通过检测测量环境的温度、湿度和气压,对材料折射率及群折射率进行修正,同时通过改变测量结构和改进算法,增加透镜的测量片数,可进一步提高系统的测量精度。

参 考 文 献

- 1 Cao Xinyu, Xu Shoude, Huang Huijin, *et al.*. The high precision on-line measurement of lens-to-lens interval[J]. *Optical Instruments*, 1992, 14(3): 20-24.
曹新宇, 徐守德, 黄惠金, 等. 透镜间隔的高精度在线测量[J]. *光学仪器*, 1992, 14(3): 20-24.
- 2 Li Fangling. Improving measurement of axial clearance during the assembly of the optical chamber of the missiles[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(1): 130-131.
李芳玲. 光学舱装配中轴向间隙测量的改进[J]. *机械设计与制造*, 2009(1): 130-131.
- 3 Goncharov A V, Bailón L L, Devaney N M, *et al.*. Optical testing of lens systems with concentric design[C]. *SPIE*, 2009, 7389: 738912.
- 4 Kunkel M, Schulze J. Noncontact measurement of central lens thickness[J]. *Glass Science and Technology*, 2005, 78(5): 245-247.
- 5 Qiao Yang, Zhang Ning, Xu Xiping, *et al.*. Design of lens thickness measurement system based on confocal technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(7): 1635-1641.
乔 杨, 张 宁, 徐熙平, 等. 基于共焦法的透镜厚度测量系统设计[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(7): 1635-1641.
- 6 Zhao W, Sun R, Qiu L, *et al.*. Lenses axial space ray tracing measurement[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3608-3617.
- 7 Shi Libo, Qiu Lirong, Wang Yun, *et al.*. Development of lens central thickness measurement system using laser differential confocal microscopy[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(3): 683-688.
史立波, 邱丽荣, 王 允, 等. 激光差动共焦透镜中心厚度测量系统的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(3): 683-688.
- 8 Nan Nan, Bu Peng, Guo Xin, *et al.*. Three-dimensional full-range complex Fourier domain optical coherence tomography system for vivo imaging of human skin[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0704002.
南 楠, 步 鹏, 郭 昕, 等. 三维全深度复频域光学相干层析成像系统及其对人体皮肤的在体成像[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0704002.
- 9 Shi Boya, Meng Zhuo, Liu Tiegeng, *et al.*. Non-distorted imaging depth of optical coherence tomography system in human dental tissues[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0217001.
石博雅, 孟 卓, 刘铁根, 等. OCT 系统对人体牙齿组织的非失真成像深度的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0217001.
- 10 Yan Chengzhi, Li Shangyuan, Zheng Xiaoping, *et al.*. Time delay error in optical low coherence interferometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0108003.
闫成至, 李尚远, 郑小平, 等. 低相干光干涉法延时测量中的误差分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0108003.
- 11 Wiedmann U, Gallion P, Jaouën Y, *et al.*. Analysis of distributed feedback lasers using optical low-coherence reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(5): 864-869.
- 12 Larkin K G. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(4): 832-843.
- 13 Li Hui, Xie Shusen, Lu Zukang. Dispersion, group velocity and group refractive index[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(12): 1075-1079.
李 晖, 谢树森, 陆祖康. 色散、群速与群折射率[J]. *光子学报*, 1999, 28(12): 1075-1079.
- 14 Sellmeier W. Zur erklärang der abnormen farbenfolge im spectrum einiger substanzen (in Germany) [J]. *Annalen der Physik und Chemie*, 1871, 219(6): 272-282.