

用于纳米测量的单频偏振激光干涉仪的光路集成方法

刘彬彬 李立艳 杨 军* 苑立波

(哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 提出了一种正交偏振干涉仪中光学元件位置固定与性能检测的方法,用于亚纳米级测量分辨力激光干涉仪的光路系统集成及其性能评价。构建了光学干涉仪在线检测与评价系统,基于强度检测方案,实时地对干涉仪输出的四路偏振光信号强度、干涉条纹可见度以及各路干涉信号之间的正交状态进行检测,并完成了小尺寸正交偏振激光干涉仪的光路集成;分别对分立式与集成式干涉仪的稳定性和微弱振动信号测量进行了对比实验。实验表明,集成式激光干涉仪的测量分辨力可达 $10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$,信噪比优于分立干涉仪 10 dB,稳定性明显提高。

关键词 测量;偏振激光干涉仪;光路集成;在线检测

中图分类号 TH744.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103710.2582

Optical Circuit Integrated Method of Single-Frequency Polarization Laser Interferometer for Nanometer Measurement

Liu Binbin Li Liyan Yang Jun Yuan Libo

(Photonics Research Center, School of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A kind of orthogonal polarized laser interferometer (OPLI) optical components position fixed and performance detection methods are proposed which can be used for optical circuit integrated of sub-nanometer precision interferometer and its capability detection. OPLI integration technique and its performance on on-line detective and evaluation method are built. Based on polarization intensity detection method, on-line optical detective and its evaluation system are constructed, and four channels polarized interference stripe quality and orthogonal polarized interference Lissajous trajectory's ellipse parameter are detected, then nanometer precision interferometer optical component integration is realized. Experiment on stability and micro-vibration measurement is carried out to compare integrated and distributed OPLI performance. The experiment results indicated that the integrated OPLI is more stable than distributed OPLI and its signal to noise ratio (SNR) is 10 dB higher than distributed OPLI, its accuracy reached $10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ at micro-vibration measurement experiment.

Key words measurement; polarization laser interferometer; optical circuit integration; on-line detection

1 引 言

纳米技术是当今科学研究十分活跃的一个领域,而纳米测量作为纳米技术的一个重要分支,也受到各国科学家越来越广泛的关注。如今,随着学科交叉的日益发展,纳米测量成为一个迫切需要解决的问题。如精密机械加工、器件表面形貌测量、高精度传感器标定、自动医学仪器定位等,其范围包含量子物理学、化学、机械制造、医学、工程技术等各个方

面。纳米测量无论在国民经济各部门还是国防军事领域,都有着重大的意义^[1,2]。

目前,可以实现纳米测量的方法主要分为光学和非光学两大类,光学类的纳米测量方法主要有频率跟踪法布里-珀罗(F-P)干涉仪^[3,4]、外差干涉仪^[5]、偏振干涉仪^[6]、调频干涉仪^[7]、光栅干涉仪^[8,9]等几类。中国计量科学院(NIM)研制的F-P干涉仪可以在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 范围内实现纳米级测量,其不足是

收稿日期: 2010-01-27; 收到修改稿日期: 2010-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(60807032, 60877046)资助课题。

作者简介: 刘彬彬(1982—),男,博士研究生,主要从事高精度激光干涉测量等方面的研究。E-mail: liubin1982@126.com

导师简介: 苑立波(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事白光干涉、光纤智能结构及光学极限测量等方面的研究。E-mail: lbyuan@vip.sina.com

* 通信联系人。E-mail: yangjun141@263.net

受环境影响大,特别是需要对温度进行严格控制。外差干涉仪的主要特点是在保证精度的前提下,可以进行大范围的测量,如美国国家标准技术局(NIST)研制的分子机就是外差干涉仪的形式,而外差干涉仪的缺点是其非线性误差较大。单频激光偏振干涉仪具有共光路、倍光程的特点,使环境影响大大降低,提高了系统分辨力^[6]。

实验室搭建的偏振干涉仪结构多为分立式,各光学元件的固定多依赖于机械装置保持相对位置不动,其位置调节方法复杂,易受环境干扰。这些不足使其在走出实验室,应用于实际生产中面临相当的困难。本文在偏振干涉仪的基础上,对光路进行了小型化和集成化的研究。通过建立偏振光强度检测法则,构建了偏振干涉仪光路集成与性能检测软件,提出了干涉仪性能在线检测与评价方法,实现了纳米精度干涉仪的集成。通过多次实验,结果表明,干涉仪实现了集成式、高稳定性的要求,结合干涉条纹细分手段,该集成式干涉仪可以达到亚纳米级分辨力。该方法简单易行,适合自动检测与组装,经进一步改进可实现产业化自动化生产。

2 正交偏振干涉仪理论

四路正交偏振激光干涉仪(OPLI)光路结构如图1所示,图中P1为起偏器,PBS1,PBS2,PBS3为偏振分光棱镜,QW1,QW2,QW3为 $\lambda/4$ 波片,HW为半波片,NPBS为消偏振分光棱镜,PD1~PD4为探测器。He-Ne激光器发出的单频激光经过准直透镜和P1变成线偏振光。光束经过棱镜PBS1分

束后,分别作为参考光束和测量光束,经过参考反射镜M1和测量反射镜M2反射后,最终在PD1~PD4处形成互差 90° 的干涉信号^[6]。

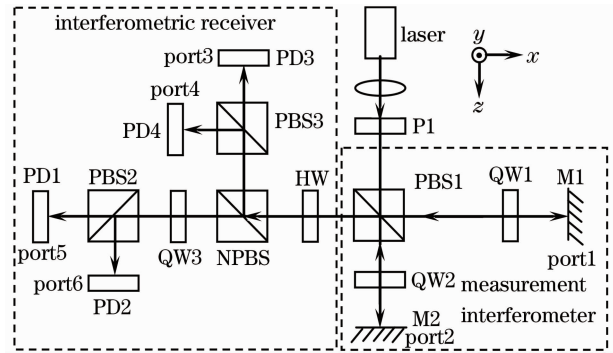


图1 正交偏振激光干涉仪

Fig. 1 Orthogonal polarization laser interferometer

根据偏振干涉仪的原理,以琼斯矩阵为理论指导^[10],下面分步讨论各个端口(port)的偏振光场。设激光器输出的理想单频激光的琼斯矢量为 $\mathbf{E} = [E_0 \ 0]^T$, E_0 为激光电场强度。

1)从QW1处出射的s光 \mathbf{E}_{QW1s} 和从QW2出射的p光 \mathbf{E}_{QW2p} 用琼斯矩阵分别表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{QW1s} &= \mathbf{J}_{QW1} \cdot \mathbf{J}_{PBR} \cdot \mathbf{J}_{P1} \cdot \mathbf{E}, \\ \mathbf{E}_{QW2p} &= \mathbf{J}_{QW2} \cdot \mathbf{J}_{PBT} \cdot \mathbf{J}_{P1} \cdot \mathbf{E}. \end{aligned} \quad (1)$$

式中 \mathbf{J}_{QW1} , \mathbf{J}_{QW2} 分别为QW1,QW2的琼斯矩阵; \mathbf{J}_{PBR} , \mathbf{J}_{PBT} 分别为PBS1的反射和透射矩阵; \mathbf{J}_{P1} 为P1的琼斯矩阵。

同样令入射光: $E_x = E_0 \cos \alpha$, $E_y = E_0 \sin \alpha$,其中 $\alpha = 45^\circ$ 是起偏器起偏角,将各光学元件的理想琼斯矩阵代入,可得

$$\mathbf{E}_{QW1s} = -\frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \theta (1+i) \\ \sin^2 \theta - i \cos^2 \theta \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{QW2p} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \begin{bmatrix} \cos^2 \theta - i \sin^2 \theta \\ \sin \theta \cos \theta (1+i) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 θ 为 $\lambda/4$ 波片的快轴与 x 轴的夹角。由偏振干涉仪原理可知,必须令 $\theta = 45^\circ$ 时,才满足要求。故而取 $\theta = 45^\circ$,代入(2)式,可得

$$\mathbf{E}_{QW1s} = -\frac{1}{2} E_0 \begin{bmatrix} i \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{QW2p} = \frac{1}{2} E_0 \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

可见,port1和port2端口分别输出右旋圆偏振光和左旋圆偏振光,负号表示相位差为 90° 。此时,两个出光口的光强都是 $E_0^2/2$ 。

2)在满足第1步的基础上,在port1端口外,利用金属反射镜将出射光按原路返回,port2端口空置。则从port3~port6四个端口的偏振光场用琼斯矩阵表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{port3} &= \mathbf{J}_{PBT} \cdot \mathbf{J}_{NPBR} \cdot \mathbf{J}_{HW} \cdot \mathbf{J}_{PBT} \cdot \mathbf{J}_{-QW1} \cdot \mathbf{J}_{Mirror} \cdot \mathbf{E}_{QW1s}, \\ \mathbf{E}_{port4} &= \mathbf{J}_{PBR} \cdot \mathbf{J}_{NPBR} \cdot \mathbf{J}_{HW} \cdot \mathbf{J}_{PBT} \cdot \mathbf{J}_{-QW1} \cdot \mathbf{J}_{Mirror} \cdot \mathbf{E}_{QW1s}, \\ \mathbf{E}_{port5} &= \mathbf{J}_{PBT} \cdot \mathbf{J}_{QW(45^\circ)} \cdot \mathbf{J}_{NPBT} \cdot \mathbf{J}_{HW} \cdot \mathbf{J}_{PBT} \cdot \mathbf{J}_{-QW1} \cdot \mathbf{J}_{Mirror} \cdot \mathbf{E}_{QW1s}, \\ \mathbf{E}_{port6} &= \mathbf{J}_{PBR} \cdot \mathbf{J}_{QW(45^\circ)} \cdot \mathbf{J}_{NPBT} \cdot \mathbf{J}_{HW} \cdot \mathbf{J}_{PBT} \cdot \mathbf{J}_{-QW1} \cdot \mathbf{J}_{Mirror} \cdot \mathbf{E}_{QW1s}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 \mathbf{J}_{NPBR} , \mathbf{J}_{NPBT} 分别为NPBS的反射和透射矩阵, \mathbf{J}_{HW} , \mathbf{J}_{Mirror} 分别为半波片和反射镜的琼斯矩阵。

同样,根据偏振干涉仪的原理要求, $\lambda/2$ 波片参数 θ 等于 22.5° , $\lambda/4$ 波片参数 θ 等于 45° ,代入(4)式,可得

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{port3}} &= -\frac{1}{2}E_0 \begin{bmatrix} i\exp(i\varphi_r) \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{\text{port4}} = -\frac{1}{2}E_0 \begin{bmatrix} 0 \\ i\exp(i\varphi_r) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{E}_{\text{port5}} &= -\frac{1}{2}E_0 \begin{bmatrix} i\exp\left[i\left(\varphi_r + \frac{\pi}{4}\right)\right] \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{\text{port6}} = \frac{1}{2}E_0 \begin{bmatrix} 0 \\ i\exp\left[i\left(\varphi_r + \frac{\pi}{4}\right)\right] \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

综上所述,得到以下结论:

在满足第1步的基础上,在 port1 端口外,利用金属反射镜将出射光按原路返回, port2 端口空置。则 port3~port6 四个端口的光场的偏振态是一定的,均为线偏振光,并且此时 port3~port6 四个端口的光强都是 $E_0^2/4$ 。

3)在满足第1步的基础上,在 port2 端口外,利用金属反射镜将出射光按原路返回, port1 端口空置。则从 port3~port6 四个端口的偏振光场用琼斯矩阵表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{port3}} &= \mathbf{J}_{\text{PBT}} \cdot \mathbf{J}_{\text{NPBR}} \cdot \mathbf{J}_{\text{HW}} \cdot \mathbf{J}_{\text{PBR}} \cdot \mathbf{J}_{\text{-QW1}} \cdot \mathbf{J}_{\text{Mirror}} \cdot \mathbf{E}_{\text{QW1p}}, \\ \mathbf{E}_{\text{port4}} &= \mathbf{J}_{\text{PBR}} \cdot \mathbf{J}_{\text{NPBR}} \cdot \mathbf{J}_{\text{HW}} \cdot \mathbf{J}_{\text{PBR}} \cdot \mathbf{J}_{\text{-QW1}} \cdot \mathbf{J}_{\text{Mirror}} \cdot \mathbf{E}_{\text{QW1p}}, \\ \mathbf{E}_{\text{port5}} &= \mathbf{J}_{\text{PBT}} \cdot \mathbf{J}_{\text{QW}(45^\circ)} \cdot \mathbf{J}_{\text{NPBT}} \cdot \mathbf{J}_{\text{HW}} \cdot \mathbf{J}_{\text{PBR}} \cdot \mathbf{J}_{\text{-QW1}} \cdot \mathbf{J}_{\text{Mirror}} \cdot \mathbf{E}_{\text{QW1p}}, \\ \mathbf{E}_{\text{port6}} &= \mathbf{J}_{\text{PBR}} \cdot \mathbf{J}_{\text{QW}(45^\circ)} \cdot \mathbf{J}_{\text{NPBT}} \cdot \mathbf{J}_{\text{HW}} \cdot \mathbf{J}_{\text{PBR}} \cdot \mathbf{J}_{\text{-QW1}} \cdot \mathbf{J}_{\text{Mirror}} \cdot \mathbf{E}_{\text{QW1p}}, \end{aligned} \quad (6)$$

可以得出

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{port3}} &= \frac{1}{2}E_0 \begin{bmatrix} i\exp(i\varphi_m) \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{\text{port4}} = -\frac{1}{2}E_0 \begin{bmatrix} 0 \\ i\exp(i\varphi_m) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{E}_{\text{port5}} &= \frac{1}{2}E_0 \begin{bmatrix} i\exp\left[i\left(\varphi_m - \frac{\pi}{4}\right)\right] \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{\text{port6}} = \frac{1}{2}E_0 \begin{bmatrix} 0 \\ i\exp\left[i\left(\varphi_m - \frac{\pi}{4}\right)\right] \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

同样,可以得到以下结论:

在满足第1步的基础上,在 port2 端口外,利用金属反射镜将出射光按原路返回, port1 端口空置。则 port3~port6 四个端口的光场的偏振态是一定的,都是线偏振光,而且此时四个端口的光强都是 $E_0^2/4$ 。

综合以上理论分析可知,偏振干涉仪各个环节的偏振态与其光强有着一一对应的关系,当偏振态变化时,其光强也随之变化。当各个光学偏振器件按照偏振干涉仪规定的要求摆放时,其光场及光强便是一定的。反之,对其各个环节的光强进行检测,便可推知其光场及偏振态。

3 正交偏振干涉仪的集成方法

根据上述偏振激光干涉仪的原理,干涉仪中各个光学器件的理想位置是按照偏振光学理论来描述的。由于直接监测偏振光的状态有一定的难度,且需要专门的光学仪器设备,为光路调节方便起见,提出基于偏振光光强的方法来对光路进行调试和集成。当偏振光路严格按照要求调整后,且光学器件理想的情况下,其各个出光口的光强比值就是固定

的。图2所示为偏振干涉仪集成光路示意图。

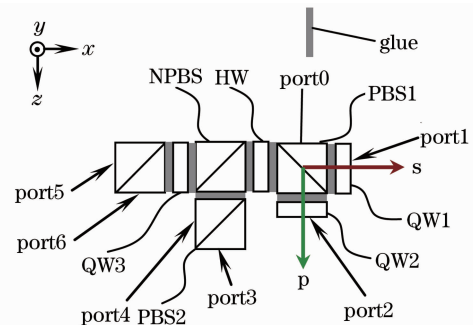


图2 偏振干涉仪集成光路原理图

Fig. 2 Schemes of OPLI integrated optical circuit

3.1 基于偏振光光强的集成方法

基于偏振光光强检测,提出以下原则,既能完成对光学器件的筛选,又方便地实现偏振干涉仪的集成。如图2所示, port0 为输入端口, port1~port6 为输出端口,当 port0 输入经过准直的线偏振光时(偏振方向在 $x-y$ 平面内,与 x 轴夹角为 45° 时),各出光端口应遵循以下6条原则:

1)不加装 QW1 和 QW2,使 port1 和 port2 端口光强之比为 1:1,要求分光比偏差小于 5%,其总光强透射率大于 95%;

2) 加装 QW1 和 QW2, 并分别旋转 QW1 和 QW2, 使 port1 和 port2 端口光强达到最大, 此时两端口光强之比为 1:1, 要求分光比偏差小于 5%, 其总光强透射率大于 95%;

3) 在 2) 的基础上, 在 port1 端口外, 利用金属反射镜将出射光按原路返回, 并加装 HW, 旋转 HW, 使 port3 和 port4 端口的光强比为 1:1;

4) 在 3) 的基础上, 加装 QW3, 并旋转 QW3, 使 port5 和 port6 的光强比为 1:1, 则此时 port3 ~ port6 四个端口的输出光强比应为 1:1:1:1, 要求分光比偏差小于 5%, 总光强透射率大于 90%;

5) 在 2) 的基础上, 在 port2 端口外, 利用金属反射镜将出射光按原路返回, 则从 port3 ~ port6 四个端口的输出光强比为 1:1:1:1, 要求分光比偏差小于 5%, 总光强透射率大于 90%;

6) 要求 4) 和 5) 两次测试时, 从 port3 ~ port6 四

个端口的输出光相互平行且重合, 光斑重合度在 95% 以上。

3.2 光路集成在线检测及性能评价

在光路集成过程中, 需要对四个端口的干涉信号质量及其光强进行检测。对于干涉信号, 进行评价的主要指标是直流幅度、交流幅度以及干涉对比度 I , 干涉对比度 I 定义为

$$I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (8)$$

因此, 对干涉信号的最大值、最小值、直流幅度、交流幅度的监测是十分必要的。根据文献[11]可知, 最终可用于处理的正交干涉信号可以用其利萨如图形来评价, 因此采用利萨如图形中的椭圆特征参数 h, k, a, b, m 来评价光路的质量。根据上述理论及评价方法, 编制了基于偏振光光强的干涉仪集成检测软件, 部分软件截图及数据样例如图 3 所示。

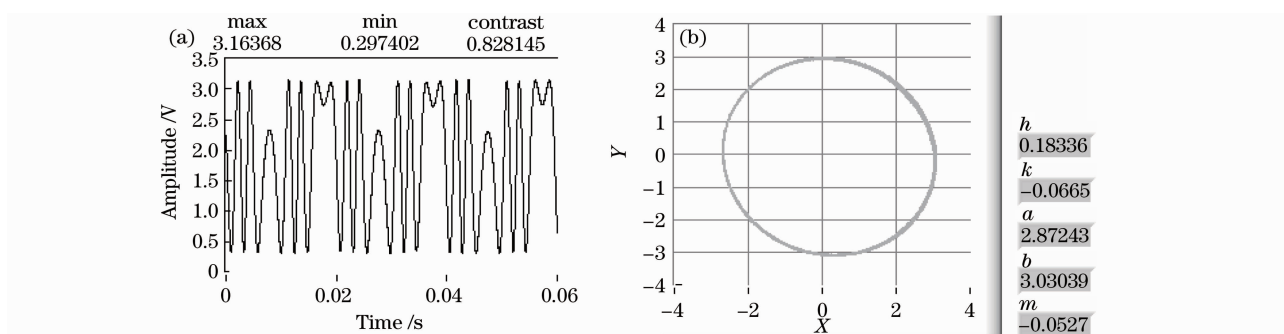


图 3 干涉仪集成检测软件数据样例。(a) 干涉信号时域波形, (b) 正交信号利萨如图形及特征参数

Fig. 3 Example data of OPLI integration software. (a) interference signal time-domain waveform, (b) orthogonal signals Lissajous trajectory and characteristic parameters

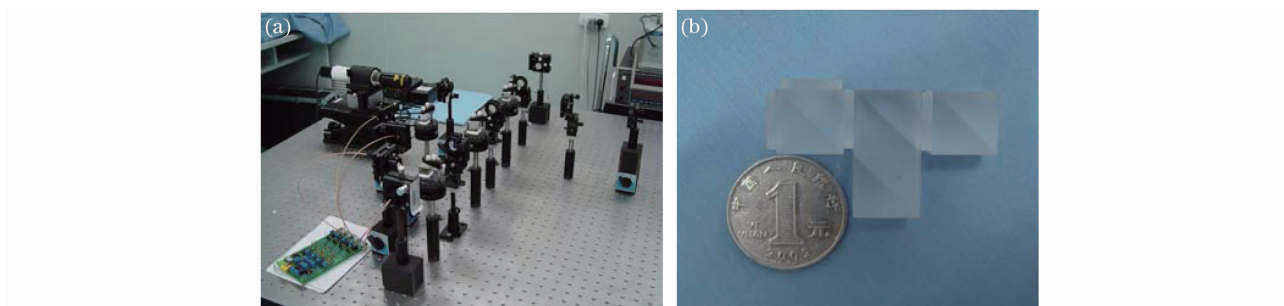


图 4 (a) 分立式正交偏振干涉仪, (b) 采用 12.7 mm 标准光学元件构建的集成光路

Fig. 4 (a) Distributed OPLI, (b) integrated OPLI make up of 12.7 mm standard optical components

4 测量结果与讨论

4.1 偏振法对集成干涉仪进行性能评价

为了验证光强检测方法, 用偏振态分析仪对偏振干涉仪各端口的输出光的偏振态进行在线检测及性能评价。实验在万级光学超洁净实验室中进行, 环境温度室温, 实验平台为韩国 DAEIL SYSTEM 公司

的气浮式光学隔振平台, 光源采用美国 MG 公司的稳频激光器, 波长 632.8 nm, 稳定性为 1×10^{-9} 。采用邦加球方式来描述偏振光。邦加球上的每一个点代表一个独立的偏振态, 方位角表示在邦加球上的经度, 椭圆率表示纬度。从表 1 的偏振态数据可以看出, 基于偏振光光强而集成的干涉仪和理论相吻合。

个别参数误差是由于消偏振分光棱镜,偏振分光棱镜,HW,QW等光学元件的非理想造成的。这些非线性误差可以用非线性校正算法来消除。

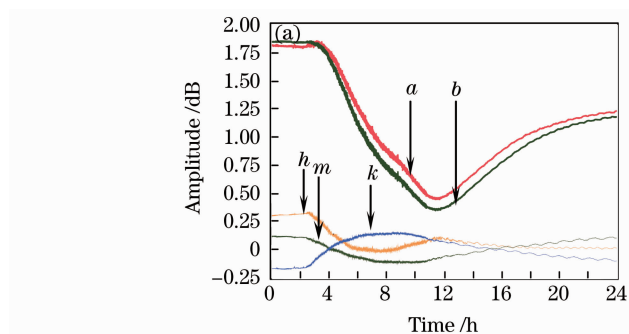
表 1 集成干涉仪光路偏振态测试数据

Table 1 Experiment results of integrated OPLI

Port No.	Azimuth		Ellipticity	
	Theory / (°)	Test / (°)	Theory / (°)	Test / (°)
Port1	Pole	Pole	± 45	44.6000
Port2	Pole	Pole	± 45	44.2000
Port1 equipped with reflector				
Port3	0	-0.4360	0	0.3030
Port4	± 90	-88.3000	0	2.7500
Port5	± 90	-88.1000	0	1.8100
Port6	0	1.1800	0	0.9140
Port2 equipped with reflector				
Port3	0	0.0357	0	-0.0629
Port4	± 90	-88.5000	0	-3.0600
Port5	± 90	-89.0000	0	1.2300
Port6	0	-1.0800	0	0.7610

4.2 分立式与集成式干涉仪的稳定性对比

基于偏振光光强的单频偏振干涉仪光路集成



法,制作了集成光路干涉仪,并对其整体性能进行了测试,如图 4 所示。

针对集成干涉仪与分立干涉仪的稳定性,进行了 24 h 静态漂移对比实验。图 5 中的 h, k, a, b, m 可以表征干涉信号质量和稳定性的 5 个参数。可以看出,集成式干涉仪的稳定性远优于分立式干涉仪。

4.3 分立式与集成式干涉仪的测量性能对比

实验中采用哈尔滨工业大学博实公司的 MPT-1JRI 型纳米微振动平台作为测量信号源,其分辨力为 0.5 nm,动态范围为 10 μm 。纳米位移驱动器采用 PPC 数字式精密定位控制器。用数据采集卡采集干涉仪的输出信号数据。

实验中,使用纳米微振动台发出振幅为 1 nm,频率为 25.5 Hz 的振动信号,分别作用于两种干涉仪。测量结果如图 6 所示。可以看出,集成干涉仪的测量信噪比比分立干涉仪高出约 10 dB,振动测量的分辨力从 28 $\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 提高到了 10 $\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。系统动态范围超过 100 dB。

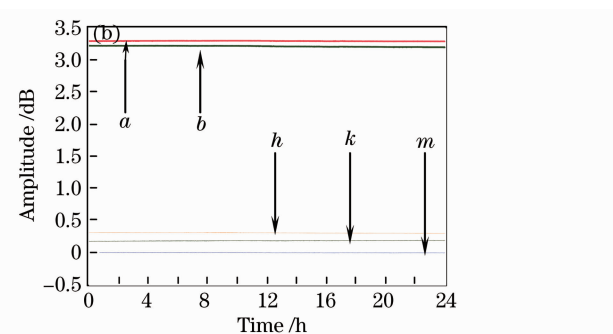


图 5 干涉仪 24 h 静态漂移对比。(a)分立正交偏振干涉仪,(b)集成正交偏振干涉仪

Fig. 5 Contrast of 24 h static drifts. (a) distributed OPLI, (b) integrated OPLI

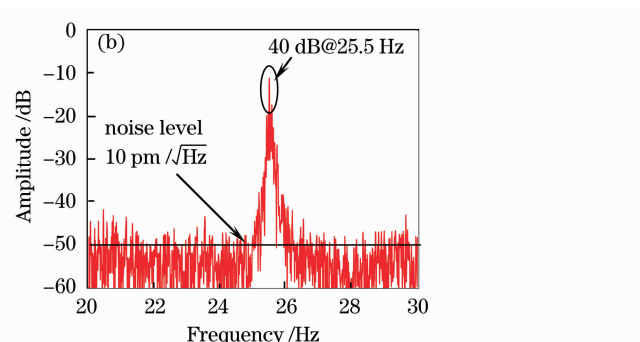
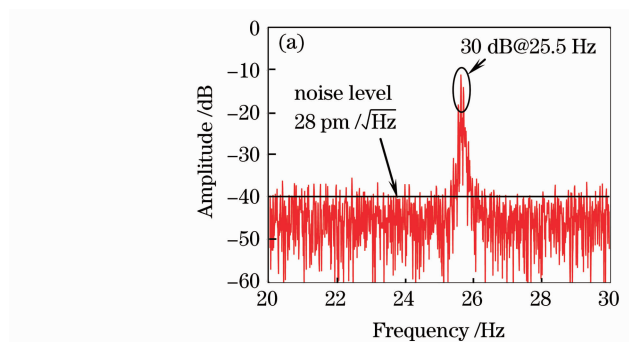


图 6 干涉仪测量性能对比。(a)分立光路,(b)集成光路

Fig. 6 Contrast of measurement performance. (a) distributed OPLI, (b) integrated OPLI

5 结 论

介绍了一种基于偏振光强度检测的偏振干涉仪

光路集成方法,从理论上分析了偏振干涉仪各输出端口的偏振态与光强的对应关系,证实了在偏振干

涉仪集成过程中,用监测偏振光光强的方法替代对偏振态的监测的可行性,极大地方便了偏振干涉仪的调试与集成。利用本法集成的干涉仪,减小了光路的体积,显著提高了光路的热稳定性和可靠性。对于纳米测量应用的干涉仪而言,光路小型化集成技术是实用化的有效途径。在实际光路结构中,整个干涉仪做成了一个密封的整体,结构紧凑,有效地消除了光学调节机构的自振动误差、空气湍流误差以及温度误差,具有较高的抗干扰能力。在稳定性实验中,用本方法集成的光路与分立光路相比,稳定性得到很大提高。在测量性能对比实验中,集成光路的信噪比要比分立光路高 10 dB,振动测量分辨力从 $28 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 提高到了 $10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。实验结果表明,基于偏振光强度的偏振干涉仪光路集成方法简单可行,经过进一步改进可实现产业化自动化生产。

参 考 文 献

- 1 G. I. Dolgikh, M. N. Dubrov, S. G. Dolgikh *et al.*. Application of laser strainmeters to the study of earthquake physics[J]. *Acta Geophysica*, 2006, **54**(2): 187~197
- 2 A. Abramovici, W. E. Althouse, R. W. P. Drever *et al.*. LIGO: The laser interferometer gravitational-wave observatory [J]. *Science*, 1992, **256**(5055): 325~333
- 3 Sun Xutao, Liu Jiqiao, Zhou Jun *et al.*. Confocal Fabry-Perot interferometer for frequency stabilization of laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1005~1008
- 孙旭涛,刘继桥,周 军 等. 激光稳频的共焦法布里-珀罗干涉仪[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1005~1008
- 4 Ma Jichi, Li Yan, Sun Wenke *et al.*. Fabry-Perot interferometer using tunable diode laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1296~1300
马骥驰,李 岩,孙文科 等. 可调波长半导体激光法布里-珀罗干涉仪[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1296~1300
- 5 P. Křen, P. Balling. Common path two-wavelength homodyne counting interferometer development [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(8): 084009
- 6 Yang Jun, Liu Zhihai, Yuan Libo. Effects of wave plate on nonlinear errors in polarization lser interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 364~369
杨 军,刘志海,苑立波. 波片对偏振激光干涉仪非线性误差的影响[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 364~369
- 7 L. Jongpil, W. Semyung, K. Kyoungsook *et al.*. High-speed FM demodulator of a homodyne laser interferometer for measuring mechanical[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(6): 1341~1349
- 8 Wu Kang, Ye Xiongying, Liu Litao *et al.*. Interferometric detection method for micro-displacement based on integrated diffraction grating [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2009, **7**(1): 56~59
伍 康,叶雄鹰,刘力涛 等. 集成光栅干涉微位移测量方法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2009, **7**(1): 56~59
- 9 Deng Lin, Lu Danfeng, Qi Zhimei *et al.*. Mach-Zehnder interferometers based on double gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1973~1976
邓 琳,逯丹凤,祁志美 等. 基于双光栅的马赫-曾德尔干涉仪的初步研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1973~1976
- 10 Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社, 2003
- 11 C. M. Wu, C. S. Su. Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(1): 62~68