

## 激光与光电子学进展

## 基于双光反馈的双偏振差分自混合干涉降噪技术

宋观平<sup>1</sup>, 齐攀<sup>2</sup>, 李莹<sup>3</sup>, 钟金钢<sup>1\*</sup><sup>1</sup>暨南大学理工学院光电工程系, 广东 广州 510650;<sup>2</sup>广东交通职业技术学院信息学院, 广东 广州 510650;<sup>3</sup>暨南大学华文学院, 广东 广州 510650

**摘要** 激光自混合干涉在测量时容易受到噪声的干扰, 从而影响测量的精度和稳定度。为此, 在利用双光反馈提高自混合干涉信号信噪比的基础上, 结合随机偏振激光自混合干涉双偏振差分探测技术, 进一步降低系统噪声。实验结果表明, 双光反馈与双偏振差分结合使用, 可将自混合干涉信号的信噪比提高 7 dB。因此, 所提方法和技术在自混合干涉测量中具有良好的应用价值。

**关键词** 物理光学; 自混合干涉; 双光反馈; 双偏振; 差分降噪

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1126001

## Dual-Polarization Differential Noise Reduction Technology in Dual-Beam Feedback Self-Mixing Interferometer

Song Guanping<sup>1</sup>, Qi Pan<sup>2</sup>, Li Ying<sup>3</sup>, Zhong Jingang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Optoelectronic Engineering, College of Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510650, Guangdong, China;

<sup>2</sup>School of Information, Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China;

<sup>3</sup>College of Chinese Language and Culture, Jinan University, Guangzhou 510650, Guangdong, China

**Abstract** During measurement, the laser self-mixing interference is susceptible to noise interference, which affects the measurement's accuracy and stability. Consequently, based on the use of dual-beam feedback to improve the signal-to-noise ratio of self-mixing interference signals, this paper aims to further reduce the system noise by incorporating the dual-polarization differential detection technology of random polarization laser self-mixing interference. Experimental results show that combining dual-beam feedback with dual-polarization differential technology can increase the signal-to-noise ratio of self-mixing interference signals by 7 dB. Therefore, the proposed method and technique have good application value in self-mixing interferometry.

**Key words** physical optics; self-mixing interference; dual-beam feedback; dual-polarization; differential noise reduction

## 1 引言

激光自混合干涉(SMI)是激光器输出的光波被外部物体反射或散射后,一部分光波被反馈回到激

光器谐振腔内,并与腔内的光波发生干涉,从而调制激光器的输出功率的一种效应<sup>[1-4]</sup>。反馈光波携带了腔外的物体信息,因此利用该特性可以实现对目标物体物理量的测量<sup>[5]</sup>。由于SMI具有结构简单、精度

收稿日期: 2021-05-28; 修回日期: 2021-06-17; 录用日期: 2021-07-19

基金项目: 广东省自然科学基金(2018A030313912)、广州市基础研究计划基础与应用基础研究项目(202102080589)

通信作者: \*tzjg@jnu.edu.cn

高、易于准直、便于探测等优点<sup>[6]</sup>,已被广泛应用于测量位移、振动、形貌、加速度、微小角度等领域<sup>[7-13]</sup>。但 SMI 检测系统在实际应用时存在噪声干扰的问题<sup>[14-17]</sup>,如不采取有效措施,则会影响 SMI 系统的稳定性和检测精度。为了降低噪声对 SMI 检测系统的影响,Yáñez 等<sup>[18]</sup>提出耦合干涉的方法来提高信噪比,通过对具有双外腔的自混合干涉效应进行研究,发现,当两外腔长之差为  $\lambda/2$  的整数倍时,干涉腔内会出现相长干涉,从而通过提高信号幅度来改善干涉测量系统的信噪比。但是,双光反馈与单光反馈相比,由于多了一个反馈光路,噪声也会相应增加。Qi 等<sup>[19]</sup>基于对随机偏振激光自混合干涉双偏振信号的实验发现,如果在光反馈通道中放入线偏振片,则探测得到 S 偏振光和 P 偏振光的双偏振干涉信号的振幅一致、相位差刚好为  $\pi$ ,基于这一实验现象,提出了一种双偏振差分自混合干涉测量技术,实验证明该技术可有效抑制噪声对自混合干涉测量的干扰。

因此,本文基于随机偏振激光自混合干涉,提出一种双光反馈与双偏振差分结合降噪的技术。理论上分析了双光反馈自混合干涉效应,构建了双光反馈双偏振差分探测的自混合干涉实验系统,并实验验证了该方法和技术的可行性。

## 2 双光反馈自混合干涉效应

双光反馈自混合干涉系统模型如图 1 所示。 $M_1$  和  $M_2$  是 He-Ne 激光器的两个腔面,构成激光器内腔; $M_3$  和  $M_4$  是两个外腔对应的外部反射镜; $L_0$  是激光器的内腔长, $L_{ext1}$  和  $L_{ext2}$  分别是两个外腔长; $r_1$  和  $r_2$  分别是激光器内部两个腔面  $M_1$  和  $M_2$  的反射系数, $r_3$  和  $r_4$  分别是两个外腔对应的外部反射镜  $M_3$  和  $M_4$  的反射系数。激光器发出的光束经过分光后,两个光束分别经两个外部物体反射,按原路反馈回到激光器腔内,再与腔内的激光进行干涉,形成双光反馈的激光自混合干涉。

双光反馈的自混合干涉系统,在弱反馈条件下,激光器的输出功率<sup>[20-21]</sup>可以表示为

$$p \approx p_0 \left[ 1 + \eta_1 \zeta_1 \cos\left(\frac{4\pi L_{ext1}}{\lambda}\right) \right] \times \left[ 1 + \eta_2 \zeta_2 \cos\left(\frac{4\pi L_{ext2}}{\lambda}\right) \right], \quad (1)$$

式中: $p_0$  表示没有外部反馈时激光器的发射功率; $\zeta_1 = 2r_3(1 - |r_2|^2) / r_2 \ln(r_1 r_2)$  和  $\zeta_2 = 2r_4(1 - |r_2|^2) / r_2 \ln(r_1 r_2)$  表示功率调制参数; $\lambda$  是激光器的波长; $\eta_1$

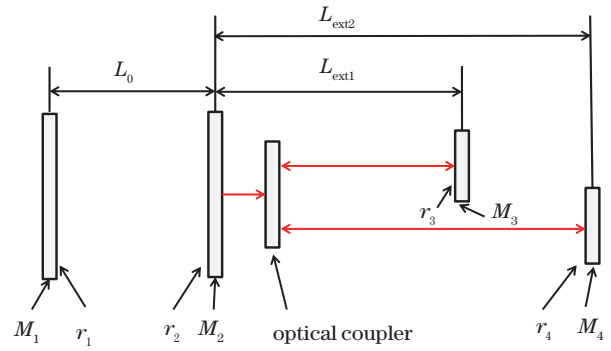


图 1 双光反馈自混合干涉系统模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dual-beam feedback self-mixing interference system model

和  $\eta_2$  是激光器发出的光束分到两个外腔的分束器的分光比。由式(1)可见,外腔长  $L_{ext1}$  取不同的数值,会影响通过调制外腔长  $L_{ext2}$  得到的自混合干涉信号的振幅。设置仿真参数为  $p_0 = 1$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $\eta_1 = 0.70$ ,  $\eta_2 = 0.30$ ,  $r_1 = 0.98$ ,  $r_2 = 0.95$ ,  $r_3 = 0.20$ ,  $r_4 = 0.15$ ,  $L_{ext2}$  的调制范围为  $20.00 \sim 21.40 \text{ }\mu\text{m}$ 。当外腔长  $L_{ext1}$  的取值分别为  $50.40, 50.45, 50.50, 50.55, 50.60, 50.65, 50.70, 50.75, 50.80, 50.85, 50.90, 50.95 \text{ }\mu\text{m}$  时,对式(1)进行仿真,得到自混合干涉信号。以自混合干涉信号的振幅为纵坐标、 $L_{ext1}$  的取值为横坐标,绘制得到图 2。当  $L_{ext1}$  取值分别为  $50.45, 50.55, 50.60 \text{ }\mu\text{m}$  时,双光反馈干涉信号与单光反馈干涉信号(其中单光反馈干涉仿真信号的输出功率为  $p \approx p_0 \times [1 + \eta_2 \zeta_2 \cos(\frac{4\pi L_{ext2}}{\lambda})]$ , 设置仿真参数  $p_0 = 1$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $\eta_2 = 0.30$ ,  $r_1 = 0.98$ ,  $r_2 = 0.95$ ,  $r_4 = 0.15$ ,  $L_{ext2}$  的调制范围为  $20.00 \sim 21.40 \text{ }\mu\text{m}$ ) 进行仿真对比,得到的结果如图 3 所示。

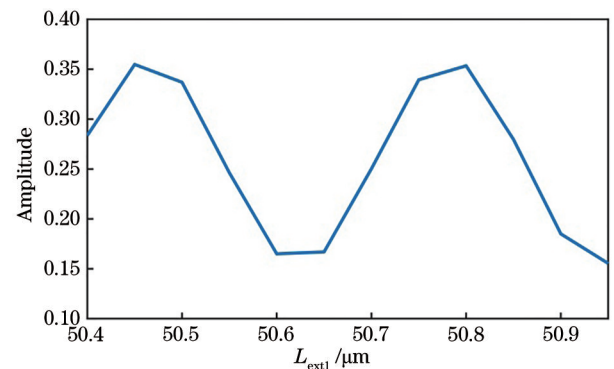


图 2 自混合干涉信号的振幅与外腔长  $L_{ext1}$  的关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between amplitude of self-mixing interference signal and external cavity length  $L_{ext1}$

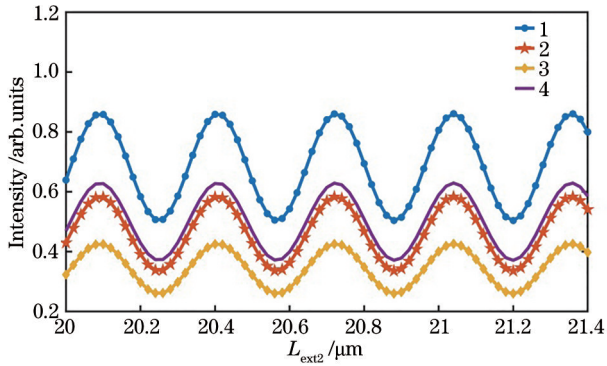


图 3 单光反馈和双光反馈时自混合干涉信号的仿真图  
Fig. 3 Simulation diagram of self-mixing interference signal with single-beam feedback and dual-beam feedback

由图 2 可知,外腔长  $L_{ext1}$  的取值会周期性地影响调制外腔长  $L_{ext2}$  得到的自混合干涉信号的振幅,该周期约为  $\lambda/2$ 。图 3 中,曲线 4 为单光反馈自混合干涉信号;曲线 3 为外腔长  $L_{ext1} = 50.60 \mu\text{m}$  时双光反馈自混合干涉信号,其振幅小于单光反馈自混合干涉信号的振幅;曲线 2 为外腔长  $L_{ext1} = 50.55 \mu\text{m}$  时双光反馈自混合干涉信号,其振幅约等于单光反馈自混合干涉信号的振幅;曲线 1 为外腔长  $L_{ext1} =$

$50.45 \mu\text{m}$  时双光反馈自混合干涉信号,其振幅大于单光反馈自混合干涉信号的振幅。可见,通过设置不同的外腔长  $L_{ext1}$ ,可以调控干涉信号的振幅。

为了验证上述分析,本文搭建了双光反馈自混合干涉实验系统,如图 4 所示。光源是南京来创公司的随机偏振 He-Ne 激光器,功率为 0.3 mW;消偏振分光棱镜(NPBS)采用反射率:透过率为 1:1 的大恒光电 GCC-403101 型宽带消偏振分光棱镜;压电陶瓷(PZT)运动平台采用德国 PI 公司 P-621.1CD 型压电陶瓷,行程为 100  $\mu\text{m}$ ,分辨率为 0.4 nm,线性误差为 0.02%;PZT 控制器采用德国 PI 公司 E-625 型压电控制器;光电探测器(PD)采用光谱响应范围 480~660 nm 的滨松 S7686 型光电二极管;光学平晶的折射率  $n = 1.5163$ (K9 玻璃),厚度  $d = 20 \text{ mm}$ ;北京卓立汉光公司的旋转台(分辨率为 0.0003125°)由步进电机来驱动;反光镜的反射率大于 92%;衰减片用来调节两束反馈光的强度(反馈分光比);数据处理电路对 PD 探测到的干涉信号进行放大;采集卡采用美国 NI 公司的 PCI6220 型数据采集卡(最大采样速率为  $2.5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ )。

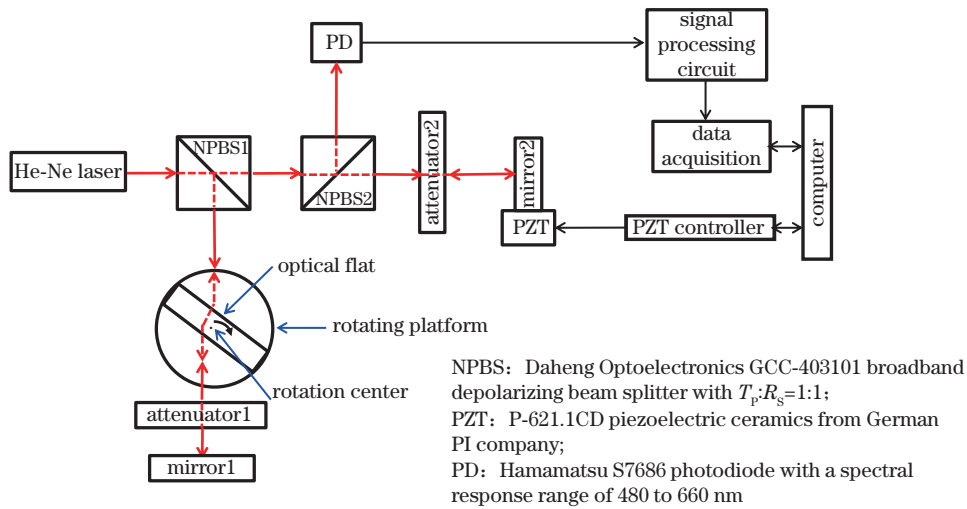


图 4 随机偏振 He-Ne 激光器双光反馈自混合干涉实验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dual-beam feedback self-mixing interference experimental system using randomly polarized He-Ne laser

如图 4 所示,随机偏振 He-Ne 激光器发出的激光束经 NPBS1 后,被分成两束光。其中反射光束入射到被固定于旋转平台上的平晶,再经过衰减片后,入射到反射镜,经反射镜反射后,沿原路返回到激光腔内,旋转平台在旋转电机驱动下带动平晶旋转,引起外腔光程的变化<sup>[22]</sup>,从而调制自混合干涉信号。其中透射光束经 NPBS2 分光,分光后的透射光经衰减片后入射到被固定于 PZT 运动平台上的

反射镜,经反射镜反射后,沿原路返回到激光腔内,PZT 平台在 PZT 驱动器的控制下,设置在不同位置,用来调控平晶反馈通道干涉信号的振幅;分光后的反射光由 PD 探测,将探测到的自混合干涉信号交由信号处理电路放大后,再经数据采集卡传输到计算机软件进行显示和处理。

在图 4 所示实验系统中,衰减片 1 的衰减系数为 0.5,衰减片 2 的衰减系数为 0.1,外腔长  $L_{ext1}$

(PZT 反馈通道对应的外腔长) 的取值分别为 50.40、50.45、50.50、50.55、50.60、50.65、50.70、50.75、50.80、50.85、50.90、50.95  $\mu\text{m}$  时, 通过旋转平晶得到调制后的自混合干涉信号。以自混合干涉信号的振幅为纵坐标、 $L_{\text{ext1}}$  的取值为横坐标, 绘制得到图 5。当  $L_{\text{ext1}}$  取值分别为 50.50、50.55、50.60  $\mu\text{m}$  时, 双光反馈干涉信号与单光反馈的干涉信号(遮挡 PZT 通道的反馈光, 使其不能返回到激光腔) 进行对比, 得到的结果如图 6 所示。

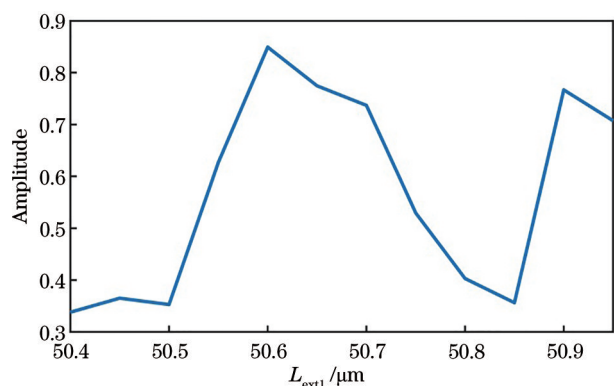


图 5 自混合干涉信号的振幅与外腔长  $L_{\text{ext1}}$  的关系曲线  
Fig. 5 Relationship curve between amplitude of self-mixing interference signal and external cavity length  $L_{\text{ext1}}$

由图 5 可知, 外腔长  $L_{\text{ext1}}$  (PZT 反馈通道对应的外腔长) 的取值会周期性地影响调制外腔长  $L_{\text{ext2}}$  (平晶反馈通道对应的外腔长) 得到的自混合干涉信号

的振幅, 该周期约为  $\lambda/2$ 。图 6(a) 为单光反馈自混合干涉信号; 图 6(b) 为外腔长  $L_{\text{ext1}} = 50.50 \mu\text{m}$  时双光反馈自混合干涉信号, 其振幅小于单光反馈自混合干涉信号的振幅; 图 6(c) 为外腔长  $L_{\text{ext1}} = 50.55 \mu\text{m}$  时双光反馈自混合干涉信号, 其振幅约等于单光反馈自混合干涉信号的振幅; 图 6(d) 为外腔长  $L_{\text{ext1}} = 50.60 \mu\text{m}$  时双光反馈自混合干涉信号, 其振幅大于单光反馈自混合干涉信号的振幅。可见, 实验结果与仿真结果吻合较好。

但是, 从图 6 也可以发现, 增加的一个光学反馈通道会引入一定的干扰噪声。为了比较信噪比情况, 对图 6 所示的单光反馈自混合干涉信号以及  $L_{\text{ext1}}$  取值分别为 50.50、50.55、50.60  $\mu\text{m}$  时的双光反馈自混合干涉信号分别进行傅里叶变换, 得到频谱如图 7 所示。由于傅里叶变换谱的对称性, 仅画出了频谱图的正半部分, 且未显示零频, 其中  $L$  代表干涉信号的周期。图 7(a) 为单光反馈自混合干涉信号频谱; 图 7(b) 为外腔长  $L_{\text{ext1}} = 50.50 \mu\text{m}$  时双光反馈自混合干涉信号频谱; 图 7(c) 为外腔长  $L_{\text{ext1}} = 50.55 \mu\text{m}$  时双光反馈自混合干涉信号频谱; 图 7(d) 为外腔长  $L_{\text{ext1}} = 50.60 \mu\text{m}$  时双光反馈自混合干涉信号频谱。对比图 7(a) 和 (d) 可以发现, 采用双光反馈调控将自混合干涉信号的振幅增大后, 其信噪比优于单光反馈, 经过计算, 图 7(d) 的信噪比相比图 7(a) 提高了 2 dB。

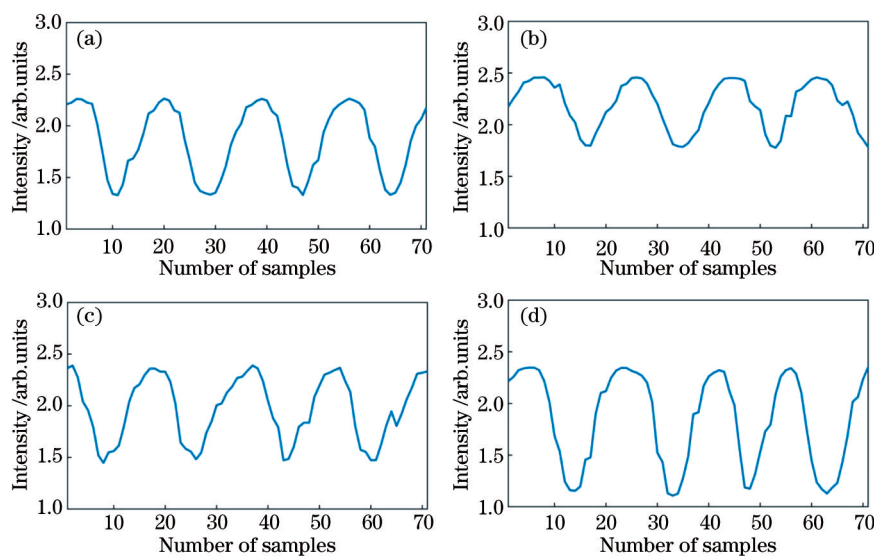


图 6 单光反馈和双光反馈自混合干涉信号对比。(a) 单光反馈; (b)  $L_{\text{ext1}} = 50.50 \mu\text{m}$  时的双光反馈; (c)  $L_{\text{ext1}} = 50.55 \mu\text{m}$  时的双光反馈; (d)  $L_{\text{ext1}} = 50.60 \mu\text{m}$  时的双光反馈

Fig. 6 Comparison of self-mixing interference signals with single-beam feedback and double-beam feedback. (a) Single-beam feedback; (b) dual-beam feedback when  $L_{\text{ext1}} = 50.50 \mu\text{m}$ ; (c) dual-beam feedback when  $L_{\text{ext1}} = 50.55 \mu\text{m}$ ; (d) dual-beam feedback when  $L_{\text{ext1}} = 50.60 \mu\text{m}$



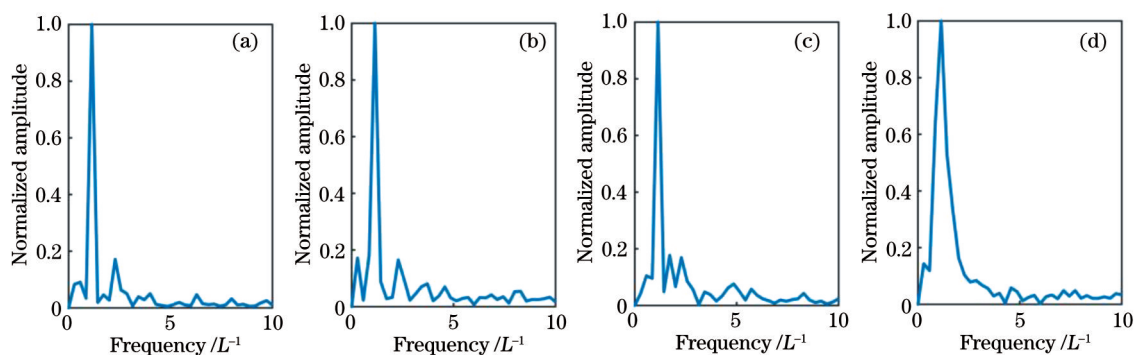


图 7 单光反馈和双光反馈自混合干涉信号频谱图。(a)单光反馈;(b) $L_{\text{ext}1} = 50.50 \mu\text{m}$ 时的双光反馈;(c) $L_{\text{ext}1} = 50.55 \mu\text{m}$ 时的双光反馈;(d) $L_{\text{ext}1} = 50.60 \mu\text{m}$ 时的双光反馈

Fig. 7 Spectra of self-mixing interference signals with single-beam feedback and double-beam feedback. (a) Single-beam feedback; (b) dual-beam feedback when  $L_{\text{ext}1} = 50.50 \mu\text{m}$ ; (c) dual-beam feedback when  $L_{\text{ext}1} = 50.55 \mu\text{m}$ ; (d) dual-beam feedback when  $L_{\text{ext}1} = 50.60 \mu\text{m}$

因此,尽管增加的一个光学反馈通道会引入一定的干扰噪声,但当双光反馈的自混合干涉信号振幅大于单光反馈的振幅时,信噪比明显得到了增加。

### 3 双光反馈结合双偏振差分降噪的自混合干涉技术

为了进一步提高自混合干涉信号的信噪比,本文将双偏振差分自混合干涉测量技术<sup>[19]</sup>引入双光反馈的自混合干涉系统。在图 4 所示的随机偏振 He-Ne 激光器双光反馈自混合干涉实验系统中,在

平晶所在的反馈光学通道中加入一个线偏振片,在信号探测光路中加入一个偏振分光棱镜,如图 8 所示。图 8 中,新加入的偏振分光棱镜(PBS)采用反射率  $T_p = 96\%$ ,透过率  $R_s = 99.9\%$  的大恒光电 GCC-402032 型单波长偏振分光棱镜;偏振片采用 Thorlabs 公司的 WP25M-VIS 线偏振片(消光比大于 800:1);光电探测器采用光谱响应范围 480~660 nm 的滨松 S7686 型光电二极管。

NPBS2 的反射光经 PBS 分光,反射光(S 偏振光)由 PD1 探测,透射光(P 偏振光)由 PD2 探测,被

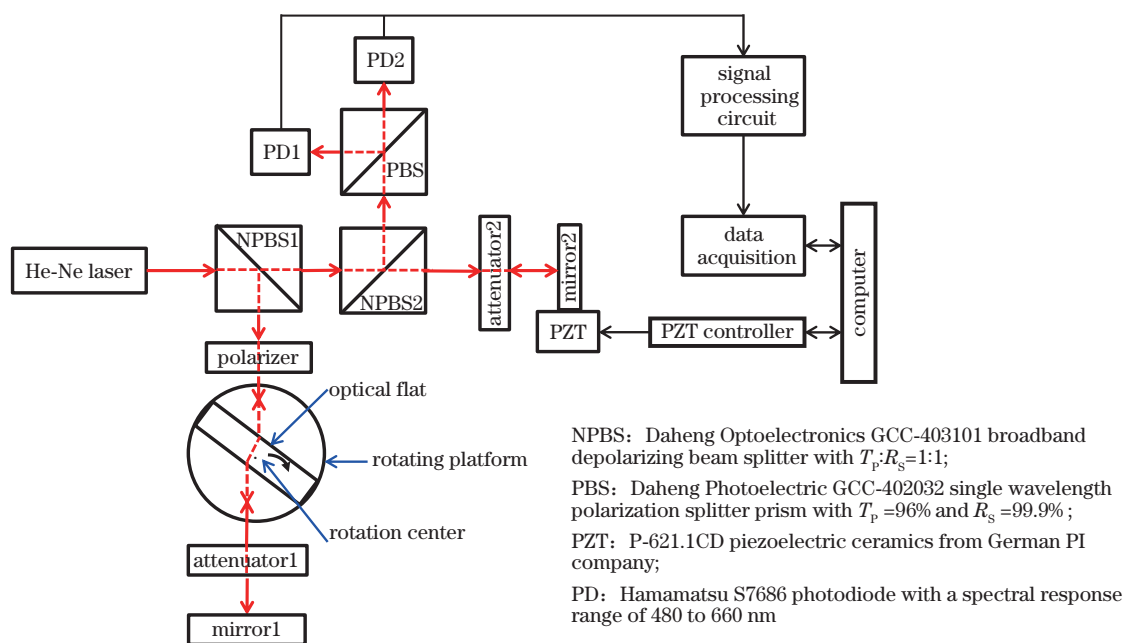


图 8 双偏振差分探测的双光反馈自混合干涉实验系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of dual-beam feedback self-mixing interference experimental system for dual-polarization differential detection

探测到的双偏振自混合干涉信号由信号处理电路放大后,再经数据采集卡传输到计算机端的软件系统并处理。

在图 8 所示实验系统装置中,衰减片 1 的衰减系数为 0.5,衰减片 2 的衰减系数为 0.1。若遮挡 PZT 所在光学通道的反馈光,则形成单光反馈自混合干涉光学系统,通过平晶旋转得到调制后的单光反馈双偏振自混合干涉信号如图 9(a)所示,S 偏振光和 P 偏振光的自混合干涉信号的相位差为  $\pi$ ;若不遮挡 PZT 所在光学通道的反馈光,则形成双光反馈自混

合干涉光学系统,且设置外腔长  $L_{\text{ext1}} = 50.45 \mu\text{m}$ ,通过平晶旋转得到调制后的双光反馈双偏振自混合干涉信号如图 9(b)所示,S 偏振光和 P 偏振光的自混合干涉信号的相位差仍然为  $\pi$ ,说明在双光反馈自混合干涉实验系统中,仍然能利用文献[19]观察到的正交偏振信号相位反相的实验现象实现差分测量,图 9(b)显示差分处理后的信号更平滑。并且实验中发现,S 偏振光和 P 偏振光的相位差与反馈光路中加入的线偏振片的偏振方向无关。对图 9 中的信号进行傅里叶变换,得到相应的频谱如图 10 所示。由于傅

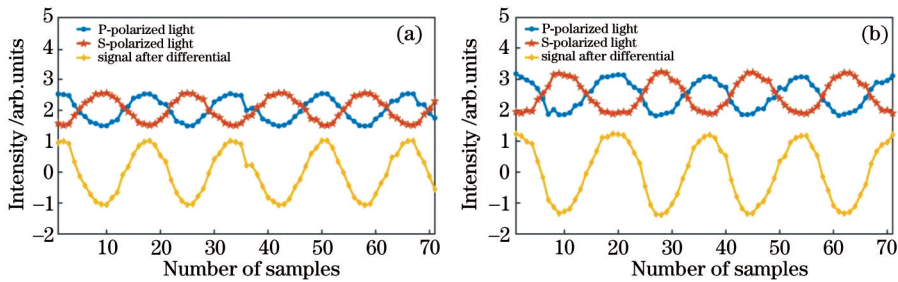


图 9 双偏振差分探测的自混合干涉信号。(a)单光反馈的自混合干涉信号;(b) $L_{\text{ext1}} = 50.45 \mu\text{m}$ 时的双光反馈自混合干涉信号  
Fig. 9 Self-mixing interference signal for dual-polarization differential detection. (a) Self-mixing interference signal with single-beam feedback; (b) Dual-beam feedback self-mixing interference signal when  $L_{\text{ext1}} = 50.45 \mu\text{m}$

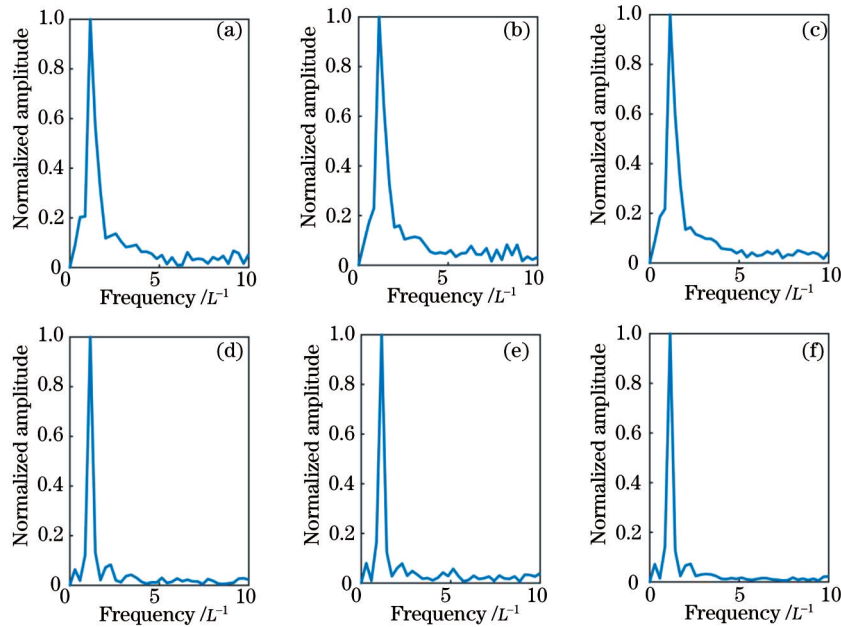


图 10 双偏振差分探测的自混合干涉信号的频谱图。(a)单光反馈 S 偏振光干涉信号的频谱;(b)单光反馈 P 偏振光干涉信号的频谱;(c)单光反馈双偏振差分信号的频谱;(d)双光反馈 S 偏振光干涉信号的频谱;(e)双光反馈 P 偏振光干涉信号的频谱;(f)双光反馈双偏振差分信号的频谱  
Fig. 10 Spectra of self-mixing interference signal for dual-polarization differential detection. (a) Spectrum of S-polarized light interference signal with single-beam feedback; (b) spectrum of P-polarized light interference signal with single-beam feedback; (c) spectrum of dual-polarization differential signal with single-beam feedback; (d) spectrum of S-polarized light interference signal with dual-beam feedback; (e) spectrum of P-polarized light interference signal with dual-beam feedback; (f) spectrum of dual-polarization differential signal with dual-beam feedback

里叶变换谱的对称性,仅画出了频谱图的正半部分,且未显示零频,图中 $L$ 代表干涉信号的周期。

由图 10 可知,相比于单光反馈,双光反馈将干涉信号的振幅调大后,频谱效果得到了优化;再利用双偏振探测的方法对干涉信号进行差分处理后,频谱效果又进一步优化。经过计算,双光反馈双偏振差分信号频谱的信噪比相比单光反馈 P 偏振光干涉信号提高了约 7 dB。

提取图 10 所示频谱的相位,再对相位进行解包裹,还原平晶旋转引起的外腔长 $L_{\text{ext}2}$ 的变化曲线,将其与平晶旋转引起外腔长 $L_{\text{ext}2}$ 变化的理论曲线进行对比,结果如图 11 所示。

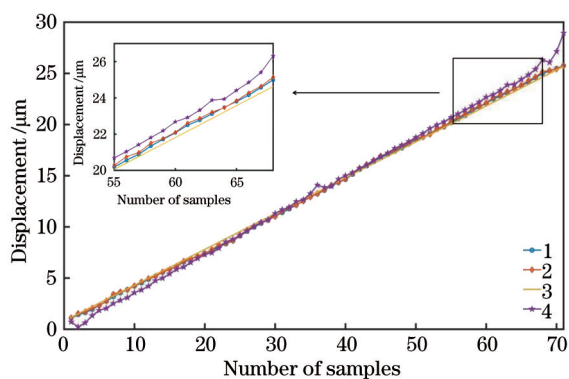


图 11 平晶旋转引起的外腔长变化曲线

Fig. 11 Variation curves of external cavity length caused by flat crystal rotation

图 11 中,曲线 1 是用双光反馈双偏振差分干涉信号还原的运动曲线;曲线 2 是用双光反馈干涉信号还原的运动曲线;曲线 3 是平晶旋转引起外腔长 $L_{\text{ext}2}$ 变化的理论曲线;曲线 4 是用单光反馈 P 偏振光干涉信号还原得到的运动曲线。由图 11 可知,采用双光反馈双偏振差分干涉信号还原的运动曲线与理论运动曲线的偏差最小,说明在双光反馈自混合干涉的基础上利用双偏振差分探测的方法可以有效减少测量误差。

## 4 结 论

基于随机偏振 He-Ne 激光自混合干涉,将双偏振差分探测降噪技术与双光反馈自混合干涉技术结合,搭建了双偏振差分探测的双光反馈自混合干涉测量系统。首先,利用建立的两个光反馈通道实现了对干涉信号振幅的调控,通过增大干涉信号的振幅将干涉信号的信噪比提高了 2 dB。然后,在此基础上利用双偏振差分探测的方法,进一步降低信号噪声,最终将信噪比提高了 7 dB。最后,采用干

涉信号还原平晶旋转引起的外腔长变化曲线,实验结果表明,降噪后的还原曲线与理论曲线的误差最小。可见,本文所提降噪方法和技术在自混合干涉测量中具有良好的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang P, Tan Y D, Liu N, et al. Phase difference in modulated signals of two orthogonally polarized outputs of a Nd:YAG microchip laser with anisotropic optical feedback[J]. Optics Letters, 2013, 38(21): 4296-4299.
- [2] Ren C, Tan Y D, Zhang S L. External-cavity birefringence feedback effects of microchip Nd:YAG laser and its application in angle measurement[J]. Chinese Physics B, 2009, 18(8): 3438-3443.
- [3] 刘刚, 张书练, 徐亭, 等. 腔调谐过程中激光器中两垂直偏振光的回馈特性[J]. 物理学报, 2005, 54(10): 4701-4709.  
Liu G, Zhang S L, Xu T, et al. Optical feedback characteristics of two orthogonally polarized light beams in a He-Ne laser during cavity tuning[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(10): 4701-4709.
- [4] 夏梵华, 王慧鹏, 夏巍, 等. 基于 VCSEL 结电压的自混合干涉位移测量[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 231203.  
Xia F H, Wang H P, Xia W, et al. Self-mixing interference displacement measurement based on vertical-cavity surface-emitting laser junction voltage [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 231203.
- [5] 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.  
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.
- [6] 张晨, 陈涛, 赵宇. 基于激光自混合干涉技术的单个微纳颗粒探测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 192803.  
Zhang C, Chen T, Zhao Y. Single micro-nano particle detection based on laser self-mixing interference technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 192803.
- [7] Gouaux F, Servagent N, Bosch T. Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer[J]. Applied Optics, 1998, 37(28): 6684-6689.

- [8] Shinohara S, Yoshida H, Ikeda H, et al. Compact and high-precision range finder with wide dynamic range and its application[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1992, 41(1): 40-44.
- [9] Wang W M, Boyle W J O, Grattan K T V, et al. Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(9): 1551-1558.
- [10] Giuliani G, Norgia M, Donati S, et al. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, 4(6): S283-S294.
- [11] Liu G, Zhang S L, Zhu J, et al. Theoretical and experimental study of intensity branch phenomena in self-mixing interference in a He-Ne laser[J]. *Optics Communications*, 2003, 221(4/5/6): 387-393.
- [12] Scalise L, Yu Y G, Giuliani G, et al. Self-mixing laser diode velocimetry: application to vibration and velocity measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(1): 223-232.
- [13] Guo D M, Wang M, Tan S Q. Self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique[J]. *Optics Express*, 2005, 13(5): 1537-1543.
- [14] Gao Y, Yu Y G, Xi J T, et al. Removing the impulsive noise contained in a self-mixing interferometry system using outlier detection[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(12): 124108.
- [15] Li K, Cavedo F, Pesatori A, et al. Balanced detection for self-mixing interferometry[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 283-285.
- [16] Arriaga A L, Bony F, Bosch T. Speckle-insensitive fringe detection method based on Hilbert transform for self-mixing interferometry[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(30): 6954-6962.
- [17] Contreras V, Lonnqvist J, Toivonen J. Edge filter enhanced self-mixing interferometry[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2814-2817.
- [18] Yáñez C, Royo S. Improvement of the signal-to-noise ratio in a low power self-mixing interferometer using a coupled interferometric effect[J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37708-37720.
- [19] Qi P, Cheng J J, Li S P, et al. Experimental observation of differential self-mixing interference signals using a randomly polarized laser: a differential self-mixing interferometry[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1858-1861.
- [20] Lu L, Zhang W H, Yang B, et al. Dual-channel self-mixing vibration measurement system in a linear cavity fiber laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(11): 4387-4392.
- [21] Hamel W A, van Exter M P, Woerdman J P. Coherence properties of a semiconductor laser with feedback from a distant reflector: experiment and theory[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(6): 1459-1469.
- [22] Zhou B W, Qi P, Zhang Z B, et al. Phase modulation self-mixing interferometry by using rotated optical flat[J]. *Optik*, 2019, 185: 1253-1260.