

doi: 10.3788/gzxb20124109.1015

双平衡式相干接收原理及其在外差干涉仪中的应用研究

庞亚军, 王春晖, 唐甜甜

(哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要:利用琼斯矩阵理论推导了光学双平衡式相干接收的原理,得到了具有正交相关性的包含全部光学信息的 IQ 信号,给出了基于 IQ 正交信号解调待测光信号信息的信号处理算法.基于该原理设计了一种高速微机电系统扫描式激光外差干涉仪,得到了待测玻璃的厚度信息分布图.该干涉仪的波前相位差提取准确度可高达 0.01 rad、测量速度可达 40 frame/s、最大测量直径可达到 300 mm,在实时光学检测方面有广阔的应用价值.

关键词:双平衡式;相干接收;外差;干涉仪

中图分类号:O436 **文献标识码:**A

文章编号:1004-4213(2012)09-1015-4

0 引言

平衡外差接收可以降低本振光自身产生的强度过剩强度噪音和散粒噪音,消除温差的影响,提升其空间环境适应能力,提高外差信号的信噪比.平衡外差光频 IQ 解调,通过正交分量和垂直分量对比,可以实现强度、频率、相位等信息的解调,综合运用这两种方法可以形成一种新型高效的相干接收方式——双平衡式外差接收.这种接收方式在相干外差激光雷达、相干光通信、外差干涉测量等各种领域具有广泛的应用价值.目前,国外的 U2T 公司和 Cyoptics 公司已分别在 2009 年和 2011 年 3 月份推出了用于光通信领域的 40 G 和 100 G 的双平衡式相干接收机,安捷伦公司还推出了双平衡式光电探测方式的光谱分析仪,国内有关光学双平衡式接收应用方面的研究还鲜见报道^[1-3].本文利用琼斯矩阵,推导了双平衡式相干接收的光学原理,在双平衡式相干接收的基础上设计了正交信号解调算法,并介绍了基于这一原理所设计的一种激光外差干涉仪.

1 双平衡式相干接收原理模型

双平衡式相干接收原理如图 1 所示,信号光和本振光从两输入端口输入,最后得到相位相差 90° 的四路输出光,然后两两组合被平衡式探测器接收^[4-5].

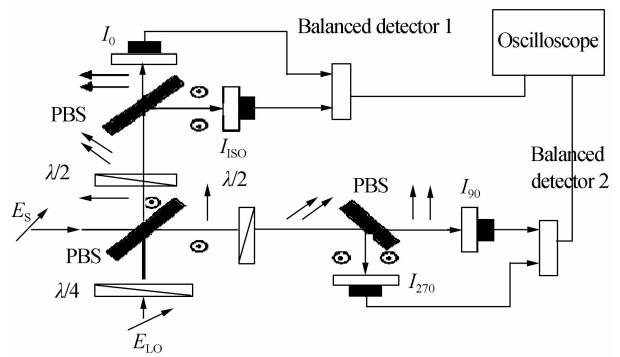


图 1 双平衡式外差探测原理图

Fig. 1 Schematic of dual-balanced heterodyne detection

假设信号光和本振光的表达式为

$$\begin{aligned} \bar{E}_s &= E_s(x, y, z) \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \exp(i\omega_s t) \\ \bar{E}_{LO} &= E_{LO}(x, y, z) \begin{bmatrix} k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} \exp(i\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

本振光经过 $\lambda/4$ 波片变为圆偏振光时

$$\begin{aligned} \bar{E}'_{LO} &= \mathbf{A}_{\lambda/4} \bar{E}_{LO} = E_{LO} \begin{bmatrix} k_3 \exp(i\pi/2) \\ k_4 \end{bmatrix} \\ &\exp(i(\phi - \pi/4)) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A}_{\lambda/4}$ 表示 $\lambda/4$ 波片的传播矩阵.

图 1 中偏振分束棱镜的反射和透射矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & r_{\perp} \exp(i\rho_{\perp}) \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} &= \begin{bmatrix} t_{\parallel} \exp(i\tau_{\parallel}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

基金项目:国家自然科学基金(No. 61078063)资助

第一作者:庞亚军(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光雷达和微弱光电信号检测. Email: pangyajun2007@yahoo. cn

导师(通讯作者):王春晖(1965-),男,教授,博士,主要研究方向为激光雷达和红外探测技术. Email: wangchunhui02@sohu. com

收稿日期:2012-02-15;修回日期:2012-05-24

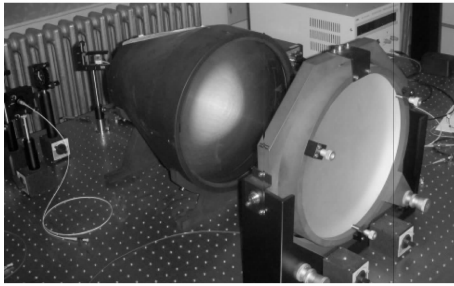


图3 激光干涉仪实物图

Fig. 3 Real figure of laser interferometer

在图2中,激光器输出的 $1.55 \mu\text{m}$ 激光经过光纤分束器(FBS)被分为两束,分别注入到声光移频器1(AOM₁)和声光移频器2(AOM₂)中,两个声光移频器的移频量分别为 100 MHz 和 99.9 MHz. 这两束激光分别作为探测光和参考光从两个不同的方向正交的入射偏振分束棱镜1(PBS₁),这样探测光和参考光就以正交的偏振方向以同一传播方向从偏振分束棱镜出射,其中透镜组 L₁ 和 L₂ 以及 L₃ 和 L₄ 起准直作用. 然后探测光和参考光一起入射到部分反射镜(BS)上,一部分经反射后耦合进光纤被双平衡式相干光电探测器1(PD₁)接收,另一部分继续入射到偏振分束棱镜2(PBS₂)上. 由于探测光和参考光的偏振方向不同,探测光只能透射,参考光只能反射. 参考光反射后先经过一次 1/4 波片再经反射镜1(RM₁)反射第二次经过 1/4 波片,前后偏振方向旋转 90°,正好可以从偏振分束棱镜透射出去进去双平衡式相干光电探测器2(PD₂). 探测光也以相同的原理反射回来被双平衡式相干探测器2(PD₂)接收,只不过它多经过了 MEMS 光学扫描振镜(MM)、扩束镜(F)和待测样品(S),加载了样品的厚度信息. 把探测器1和探测器2输出的中频信号交给数字信号处理系统,利用 IQ 正交解调算法解出相位信息^[8-10],就可以得到待测物的厚度信息. 激光干涉仪的测试结果如图4.

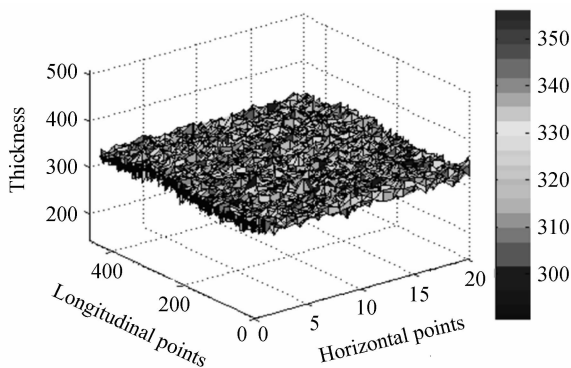


图4 样品厚度分布图

Fig. 4 Thickness distribution profile of sample

由图4可以看出,其系统测量的平均厚度值为 $320.30 \pm 1.64 \text{ nm}$,相位差准确度为 0.01 rad . 该干

涉仪可测量红外窗口材料内部微观变化参量光学厚度,测量尺度范围为直径 $\phi 3 \sim 300 \text{ mm}$,纵向准确度达到 $\lambda/100$ 以上,横向准确度为 3 mm ,测量速度为 40 frame/s .

4 结论

双平衡式相干接收,信号纯净,信噪比高,可以方便地运用于 IQ 信号解调算法的实现上,提高信号的实时处理速度. 基于双平衡式相干接收原理,设计了一款高速 MEMS 扫描式激光干涉仪,该干涉仪具有以下等优点:系统大部分采用光纤传输的方式,具有良好的抗干扰能力,结构更加紧凑,同时降低了整体的开发成本;采用外差干涉技术将待测物理量加载到低频的中频信号上,最后经过 IQ 解调过程得到待样品厚度,满足了高准确度的要求;系统采用的是透射式光学系统,能同时对待测物的表面和内部物理量进行测量.

参考文献

- [1] PAINCHAUD Y, POULIN M, MORIN M, *et al.* Performance of balanced detection in a coherent receiver[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(5): 3659-3672.
- [2] LEE W K, IZADPANAH H, DELFYETT P J. Coherent pulse detection and multi-channel coherent detection based on a single balanced homodyne receiver[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(5): 2098-2105.
- [3] GHIM Y S, KIM S W. Thin-film thickness profile and its refractive index measurements by dispersive white-light interferometry[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(24): 11885-11891.
- [4] PROTOPOPOV V, CHO S, KIM K, *et al.* Differential heterodyne interferometer for measuring thickness of glass panels[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, **78**(7): 076101.
- [5] PROTOPOPOV V, CHO S, KIM K, *et al.* Heterodyne double-channel polarimeter for mapping birefringence and thickness of flat glass panels [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, **77**(5): 053107.
- [6] PARK Y, CHO K. Heterodyne interferometer scheme using a double pass in an acousto-optic modulator[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(3): 331-333.
- [7] CHEN Y L, SU D C. Improved technique for measuring full-field absolute phases in a common-path heterodyne interferometer[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(25): 4746-4750.
- [8] ZHAO H Z, LIANG R, LID C, *et al.* Practical common-path heterodyne surface profiling interferometer with automatic focusing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**(4): 259-265.
- [9] RIZA N A, SHEIKH M, PEREZ F. Optical substrate thickness measurement system using hybrid fiber-freespace optics and selective wavelength interferometry [J]. *Optics Communications*, 2007, **269**(1): 24-29.
- [10] GAO Long, WANG Chun-hui, LI Yan-chao. Fiber-coupled near-infrared laser heterodyne interferometry with fast optical scanning[J]. *JOSA B*, 2010, **27**(12): 2499-2504.

Principle of Dual-balanced Coherent Receive and Its Application in Heterodyne Interferometer

PANG Ya-jun, WANG Chun-hui, TANG Tian-tian

(Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The principle of optical dual-balanced coherent receive is deduced using Jones matrix, the IQ signal is obtained that contains all the optical information, and the signal processing algorithm based on the IQ signal to demodulate optical signal information is given. Based on this principle, a high-speed MEMS scanning laser heterodyne interferometer is designed, and the thickness map of the test glass is obtained. The interferometer wavefront phase extraction accuracy achieves 0.01 radians, the measurement speed reaches 40 frame/s, and the maximum measured diameter can reach 300 mm, which show the broad application value in real-time optical detection.

Key words: Dual-balanced; Coherent receive; Heterodyne; Interferometer