

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0273-04

大口径横向双剪切激光干涉仪

栾 竹 王利娟 周 煜 孙建锋 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息技术研究中心, 上海 201800)

摘要 空间激光通信中发射波面质量接近衍射极限, 测量波面是调整和检验发射系统的依据。传统的平板剪切干涉仪是测量波面的有效手段之一, 但应用在测量波面高度小于 0.3 个波长, 口径 100~300 mm, 短相干长度的半导体激光器时存在一些限制。大口径横向双剪切激光干涉仪改进于马赫-曾德尔结构, 可以实现这一功能。干涉仪主要由两块透射反射镜和四块反射镜组成, 其中一块反射镜结构上下分开, 形成一定的夹角, 通过干涉图上下条纹的差分求出波像差, 提高灵敏度。目前建成的仪器有效通光口径为 290 mm, 等光程相干涉, 可适用于相干长度短的光源。仪器对可调谐激光器发射波面进行了测量, 通过计算机处理得到波面, 波面高度的峰谷值为 1.0 个波长。

关键词 测量; 干涉仪; 波面检测; 双横向剪切; 等光程

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0273

Large-Aperture Lateral Double Shearing Laser Interferometer

Luan Zhu Wang Lijuan Zhou Yu Sun Jianfeng Liu Liren

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Laser transmitting wavefront is near diffraction-limited in space laser communication. Wavefront measurement is the basis of system adjustment and testing. Optical plate interferometer is a traditional valid method for wavefront sensing but it is invalid to meet the needs of measuring the wavefront of wave height less than 0.3 wavelength, aperture over 100 mm and laser diode coherence length short. Lateral double shearing laser interferometer is designed based on Maeh-Zehnder interferometer for the application. It includes two plane lens and four mirrors with one of which is vertically divided into two parts. The two parts turn around vertical line oppositely to be a small angle of several seconds between them. The wavefront aberration can be differentially analyzed from the fringes of the two parts and the accuracy is improved. The interferometer of 290 mm diameter suited for short-coherence laser is developed. Optical paths of the interference are equal length that is useful for laser diode etc. The wavefront of a tuning laser is measured by the interferometer. The experimental interferograms are analyzed with the software. The value of the wave height (PV) is 1.0 wavelength.

Key words measurement; interferometer; wavefront sensing; double lateral shearing; equal optical path

1 引 言

空间激光通信一般要求高质量的激光发射系统, 光束达到衍射极限。光学衍射极限是光束受到孔径限制条件下能够达到的最小发散度, 相应的波面高度约为 0.3 个波长。精确测量波面是调整和验证光发射系统的重要部分^[1]。

传统的平板剪切干涉仪利用前后表面反射产生剪切干涉条纹, 得到波像差^[2,3]。也可以采用楔板

提供背景条纹, 在此基础上的条纹变化反映波像差^[2]。双剪切干涉仪利用两块楔角反向平行的楔板组成, 在同一口径内形成两组干涉条纹, 通过差分法求出波像差, 减小系统误差的影响, 提高灵敏度^[4~6]。这类干涉仪的特点是使用方便, 相对直观, 平面光学加工, 可以大尺寸制作, 但是属于非等光程相干涉, 对待测光的相干长度要求严格。空间激光通信的光源种类繁多, 如果选择半导体激光器, 相干

收稿日期: 2010-04-20; 收到修改稿日期: 2010-07-01

基金项目: 中国科学院计划局和国家自然科学基金(60807024)资助课题。

作者简介: 栾 竹(1973—), 女, 副研究员, 主要从事激光通信光学检测方面的研究。E-mail: luanzhu@siom.ac.cn

长度只有几毫米,限制了以上干涉仪的使用。夏克哈特曼波前传感器是另一类波面测量工具,对于大口径平行光的测试,需要配备标准透镜聚焦,相对于平面加工,高质量大尺寸透镜加工难度更大。

中国科学院上海光学精密机械研究所目前建成的大口径横向双剪切激光干涉仪^[7],结构上属于马赫-曾德尔干涉仪的改型,在口径内形成上下分开的干涉条纹,一半较疏,一半较密,差分处理得到波像差。可以满足口径 290 mm 以下的光学波面测试,波面高度测量精度为 0.1 个波长,等光程相干涉,适用于相干长度短的激光器如半导体激光器。可以目视处理干涉图,适用于光学系统在线装配调整或者通过计算机处理干涉图得到波面像差。

2 结 构

横向双剪切激光干涉仪主要采用的基本原理方案为横向双剪切马赫-曾德尔干涉仪结构(如图 1)。由光学平面加工的四块反射镜和两块透反镜组成,其中一块反射镜被水平一分为二,绕垂直轴相对旋转,形成几角秒的角度。被测波面经过第一块透反镜后分为两路光束:一路光束 A 透射,通过两块反射镜连续反射后,再由第二块平面透反镜反射,进入 CCD 视场;另一路光束 B 反射,经过另两块反射镜连续反射后,透射出第二块平面透反镜。光束 A 和 B 在透反镜的出射面重合,但是两束光之间产生了垂直于传播方向的横向相对位移,即横向剪切干涉。采用两块反射镜构成直角反射镜组,可以保证剪切量变化过程中光程不变。

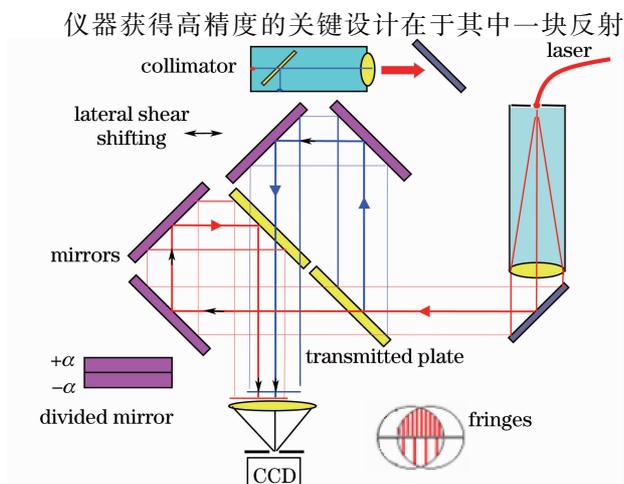


图 1 大口径横向双剪切激光干涉仪结构示意图

Fig. 1 Structure of large-aperture lateral double shearing laser interferometer

镜采用上下一分为二的结构,上下两块分别绕垂直轴顺时针和逆时针转动一个小角度(如图 2),作为仪器的工作偏置角。通过分析横向双剪切干涉条纹,对比上下条纹,相当于抵消一些系统误差来达到高精度测量衍射极限波面的目的。同时采用干涉等光程设计,适合于相干性很差的激光束测量。该波面分析仪还附带一个中等口径前置镜(见图 1),可以实时调整主系统各平板的平行度。

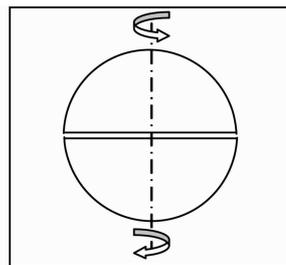


图 2 分口径反射镜转动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the rotation of the divided mirrors

3 工作原理

对于空间通信中的应用,发射系统的波面质量接近衍射极限,被测波面可以近似为球面波,波像差由波面高度表示,这在高质量激光束情况下是合理的。分口径干涉图具有目视估计波面高度的优点,可以方便用于光学车间的装校。对于其他含有高级像差的系统,干涉图的处理采用剪切条纹分析或者多项式拟合波面的方式分析。以下主要介绍高质量波面情况下的工作原理。

当波面可以用参考球面波来表示时,光束发散度就可以通过波面边缘波差的测量换算得到。图 3 为发散球面波示意图,其中曲率半径为 r , R 为出瞳半径,出瞳口径为 $D_0 = 2R$,波面在出射口径边缘的最大波差为 W_0 ,即波面高度。波面任意处的波差为 $W(x, y)$ 。

对于旋转对称的离焦波面,波面的波差 $W(x, y)$ 可以表示为

$$W(x, y) = \frac{x^2 + y^2}{R^2} W_0. \quad (1)$$

光束发散角 θ_d 与波面高度的关系为

$$W_0 = \frac{R\theta_d}{4}. \quad (2)$$

若入射波面为 $W(x, y)$,两相干光束的夹角为 $\Delta\theta$,剪切量为 S ,入射光束出瞳半径为 R ,光程差为 $\Delta W(x, y)$,则相干方程为

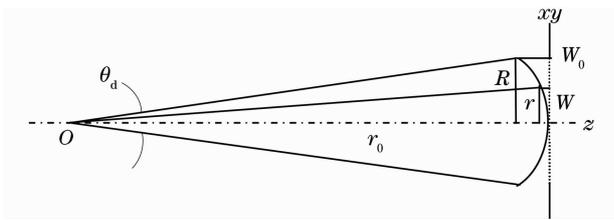


图 3 波面高度与发散角的关系

Fig. 3 Relations of wave height and divergence

$$W\left(x + \frac{S}{2}, y\right) - W\left(x - \frac{S}{2}, y\right) - \Delta\theta \cdot x = \mp p\lambda \quad (p > 0), \quad (3)$$

$$W\left(x + \frac{S}{2}, y\right) - W\left(x - \frac{S}{2}, y\right) + \Delta\theta \cdot x = \pm q\lambda \quad (q > 0). \quad (4)$$

(3), (4)式中 p, q 为整数。

对于边缘波差 $W_0 < R^2 \Delta\theta / S$ 的小像差波面, 例如衍射极限波面, 有

$$W_0 = \frac{R^2}{4S} \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} \lambda \quad \left(W_0 < \frac{R^2 \Delta\theta}{S}\right). \quad (5)$$

由(5)式可以看出, 通过测量两个分口径视场内

的条纹宽度 T_1, T_2 和剪切量 S 就可以求出波面的边缘波差值。对于理想平面波, 条纹宽度相等。

4 系统实验和分析

大口径横向双剪切干涉仪由多个光学元件组成, 测量误差根据来源分为两部分, 标定用标准平面波的误差和系统固有误差(包括光学元件材料、加工面型和调整等误差)。标准平面波可以由激光平行光管产生, 精度为 0.1 个波长; 系统固有误差影响仪器达到标定波面精度的能力, 如果各元件的面型等精度足够高, 标定波面的误差将成为主要部分, 干涉仪的精度可以与标定波面相当。

测试波面来自于可调整的准直系统, 光源为可调谐光纤激光器, 波长 635~637 nm, 调谐速率最大为 6 nm/s, 扩束口径为 150 mm。在单波长准直情况下, 干涉仪照片和得到的干涉图如图 4 所示。经过计算机处理, 剪切量为 67.1 mm, 计算得到波面高度为 0.1λ (波长 $\lambda = 635$ nm)。

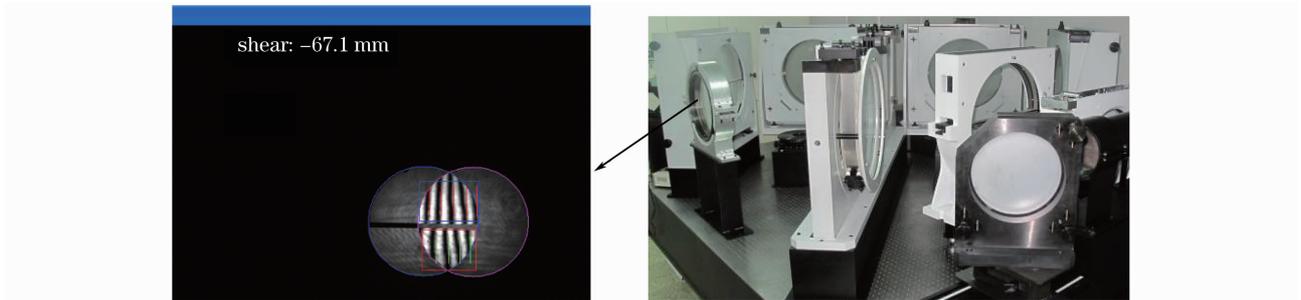


图 4 实验干涉图和仪器照片

Fig. 4 Experiment fringes and apparatus photo

仪器为等臂干涉仪, 等臂的精度优于 $20 \mu\text{m}$, 对于相干长度小的宽带激光器也可以测量。光源在波长调谐 2 nm 时, 调整准直透镜产生微小离焦量进行测量, 得到稳定的干涉图, 如图 5 所示, 剪切量为 44.4 mm, 波面高度为 1.0λ 。干涉仪数据处理的流程图如图 6 所示。利用多项式拟合恢复了波面, 给出了 Zernike 多项式系数, 如图 7 所示。由于采用单幅剪切干涉图, 从原理上存在精度低的局限性, 拟合的波面可以作为定性分析的参考。

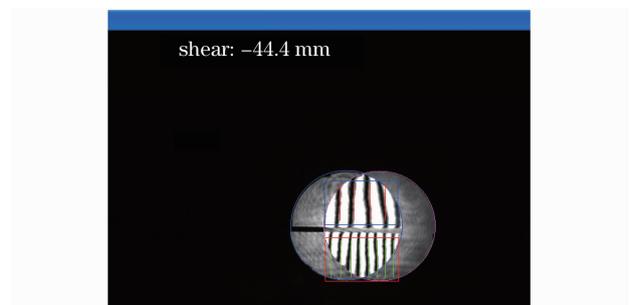


图 5 调谐激光器波面的剪切干涉图

Fig. 5 Shearing fringes of the tuning laser wavefront

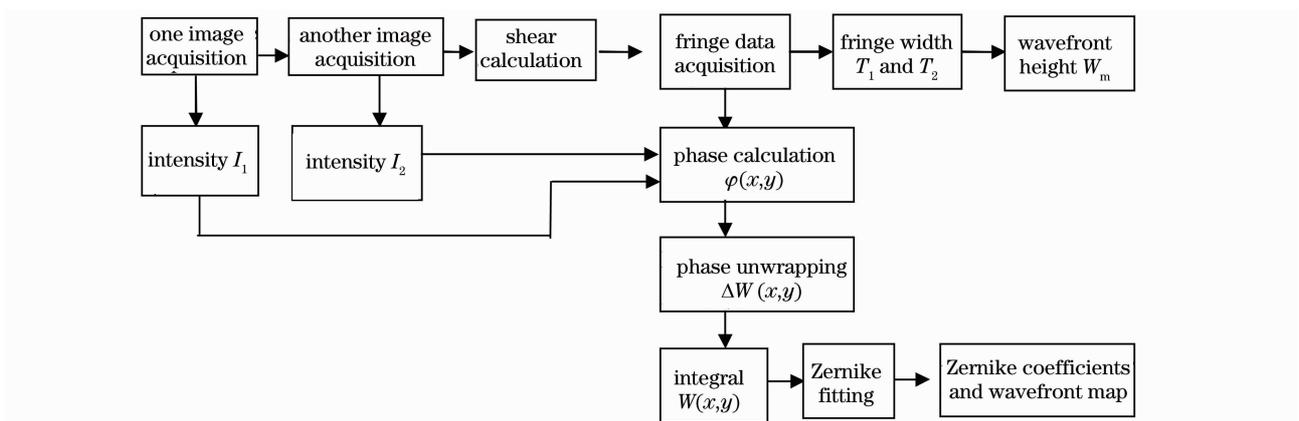


图 6 数据处理流程框图

Fig. 6 Flow diagram of data processing

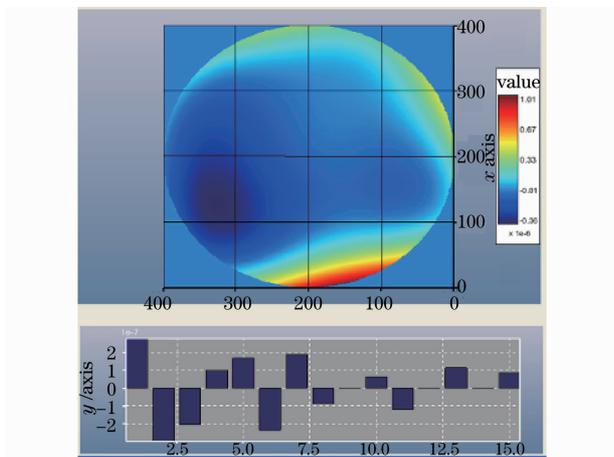


图 7 拟合波面图和泽尼克多项式系数直方图

Fig. 7 Fitting wavefront map and the histogram of Zernike coefficients

4 结 论

中国科学院上海光学精密机械研究所建成的大口径横向双剪切干涉仪用于波面测试,包括空间应用系统的大口径(小于 290 mm)高质量波面发射系统,其为等臂干涉,适用于多种波长、多种光谱宽度的各种激光源。测试得到分口径干涉图,通过目视或者计算机处理得到波面高度,可用于光学车间实时检测和激光应用系统的装配测试。

致谢 研制过程中得到了朱宝钤研究员、徐德衍研究员和殷耀祖高级工程师的悉心指导和帮助,表示衷心感谢。

参 考 文 献

- Liu Liren. Laser communications in space II. test and verification techniques on the ground[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 147~155
刘立人. 卫星激光通信 II. 地面检测和验证技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 147~155
- M. V. R. K. Murty. The use of a single plane parallel plate as a lateral shearing interferometer with a visible gas laser source [J]. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(4): 531~534
- J. D. Briers. Ronchi test formulae; 1. Theory [J]. *Opt. Laser Technol.*, 1979, **11**(4): 189~196
- Zhu Luan, Liren Liu, Lei Zhang *et al.*. Single and double shearing interferometers series for laser wave front testing [C]. *SPIE*, 2007, **6709**: 67091E
- Y. W. Lee, H. M. Cho, I. W. Lee. Half-aperture shearing interferometer for collimation testing [J]. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(11): 2837~2840
- Luan Zhu, Liu Liren, Liu De'an *et al.*. Double-shearing wavefront testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1417~1420
栾竹, 刘立人, 刘德安等. 双剪切波面干涉测量法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1417~1420
- Zhu Luan, Liren Liu, Lei Zhang *et al.*. Large-optics white light interferometer using double-shearing structure for laser wavefront testing [C]. *SPIE*, 2004, **5550**: 425~431