

径向剪切干涉仪系统的研制与校准研究

赵琦¹ 蒋泽伟¹ 何勇² 卢峰³

¹西南技术物理研究所, 四川 成都 610041
²南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094
³四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 为了测量超长焦距高功率激光系统的波前畸变, 研制并校准了基于空间相位调制的径向剪切干涉仪。仪器采用多波长设计, 满足可见光和红外探测的需要。为研制并校准径向干涉仪, 同哈特曼-夏克(HS)传感器、Zygo干涉仪进行了对比实验。通过实验与理论对比, 得到径向剪切干涉仪参数的最佳值。研究了汉宁窗的取值范围和边缘截取值的合理范围, 结果表明, 校准后的径向剪切干涉仪能够准确测量, 仪器的重复性和精度都能满足高精度波前探测要求。

关键词 光学测量; 径向剪切干涉仪; 实验研究; 校准

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP49.041204

Development and Calibration of a Radial-Shearing Interferometer

Zhao Qi¹ Jiang Zewei¹ He Yong² Lu Feng³

¹Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China
²School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China
³Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract To measure the wavefront of high-power laser with ultra-long focal length, we develop and calibrate a shearing interferometer based on spatial phase modulation. It is experimentally compared with Hartmann-Shack (HS) wavefront sensor and Zygo interferometer. The results show that the shearing interferometer can meet the requirements of precisely measuring wavefront. It has high precision and good repetitiveness.

Key words optical measurement; radial-shearing interferometer; experimental study; calibration

OCIS codes 120.3180; 120.4640; 120.5050; 120.4820

1 引言

为了测量高功率大口径激光的性质, 保证其远场的聚焦特性, 需要对其入射波前进行分析。为了保证足够的空间分辨率, 国内外多家单位都研制了径向剪切干涉仪测量光束波前^[1~3]。入射光被径向剪切干涉仪扩束和缩束后, 通过计算两束光形成的干涉条纹获取其波前信息。1964年, Murty^[4]提出了基于开普勒望远系统的环形径向剪切干涉仪, 无需专门参考面, 与传统的干涉仪相比它能测试更大尺寸的对象。因为共光路和剪切比可变, 所以剪切干涉仪能有更高的精度^[5]。

径向剪切干涉仪的主要问题是干涉条纹计算得到的并不是入射光的波前分布, 因此需要对存在的误差进行校准^[6], 在不同放大倍数下重建的精度也需要校准研究^[7]。为了对高功率大口径激光的波前进行探测, 本文研制了一套径向干涉仪并对其精度进行了实验研究。通过与哈特曼-夏克(HS)传感器的对比研究, 研究并校准汉宁窗的取值区间和边缘截取范围。与Zygo的对比实验验证了该径向剪切干涉仪的不确定度、重复性和畸变探测范围。

收稿日期: 2011-08-16; **收到修改稿日期:** 2011-10-24; **网络出版日期:** 2012-01-19

作者简介: 赵琦(1985—), 男, 硕士, 主要从事激光测量以及光波前和相干测量仪器等方面的研究。

E-mail: zhaoci2156@163.com

2 设计原理

径向剪切干涉仪的光学系统主要包括伽利略望远系统、变倍成像系统、扩束准直系统、分束镜和平面反射镜等,如图 1 和图 2 所示。径向剪切干涉仪采取了双波长设计,分别是 1064 nm 和 632.8 nm。变倍成像系统用于将干涉图完整清晰地成像到 CCD 上。针对不同口径的入射光束设计了不同倍率的成像系统,采用四片透镜设计。物像距总长固定,以使干涉仪系统入口处的小孔光阑与 CCD 靶面共轭,保证了 CCD 所采集的干涉图像边缘清晰。

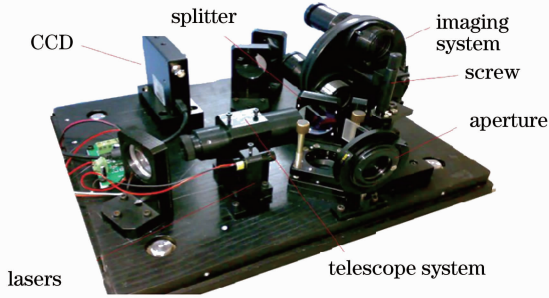


图 1 径向剪切干涉仪

Fig. 1 Radial-shearing interferometer

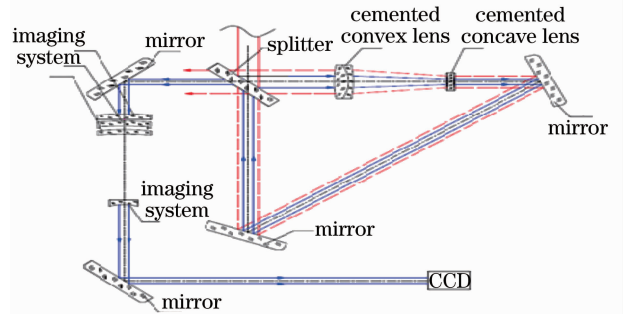


图 2 径向剪切干涉仪原理图

Fig. 2 Principle of radial-shearing interferometer

图 2 中,被测波前经分光板分成两路进入由一伽利略望远系统构成的环形径向剪切干涉系统,透射光路先后经过胶合凸透镜和胶合凹透镜形成扩束光束;而经分光板反射的一路光束先后经过胶合凹透镜和胶合凸透镜形成缩束光束。光学优化设计后得到光束的波前的峰谷(PV)值为 0.1130λ ,均方根值(RMS)为 0.0255λ (λ 为光波长)。通过 100 次蒙特卡罗分析,均方差值小于 0.01λ 。CCD 中得到的干涉条纹由图 3 中的步骤通过条纹提取、滤波,并采用泽尼克多项式波前重构算法^[8]对迭代得到的面形进行模式分解,然后进行去倾斜等处理,最后通过迭代计算可以得到^[9]

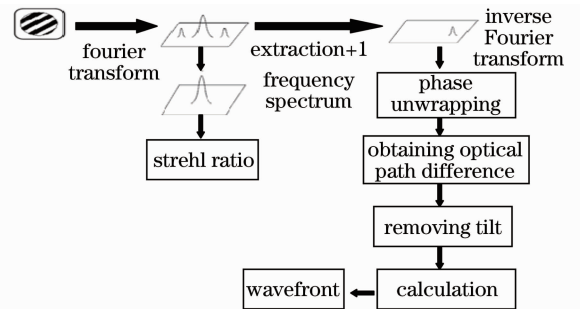


图 3 径向剪切干涉计算流程

Fig. 3 Process of calculation of radial-shearing interferometry

$$W\left(\frac{\rho}{\beta}, \theta\right) = \sum_{i=0}^n \Delta W(\beta^{i-1} \rho, \theta), \quad (1)$$

式中 β 为放大倍数, ΔW 为扩束波前与缩束波前的波前差, ρ 和 θ 是极坐标值。

3 对比实验

为标定径向剪切干涉仪系统精度,使用了波长为 632.8 nm 的标准光源。出射激光在经过扩束系统之后,可近似为标准平面波。准直扩束系统经 Zygo 系统测试^[10]RMS 值小于 0.017λ ,如图 4 所示。国内外探测的光束波前成熟方法是利用 HS 传感器进行探测^[11~13],通过图 5 所示实验验证径向剪切干涉仪系统的精度。实验分束镜工作面面形由 Zygo 干涉仪测量,误差 RMS 为 0.003λ 。实验数据每 10 min 采集一次,每次采集 10 张瞬态波前取平均值。每次采集实验的能见度均大于 10 km,光路附近的湍流强度均小于 2×10^{-14} ,实验室温

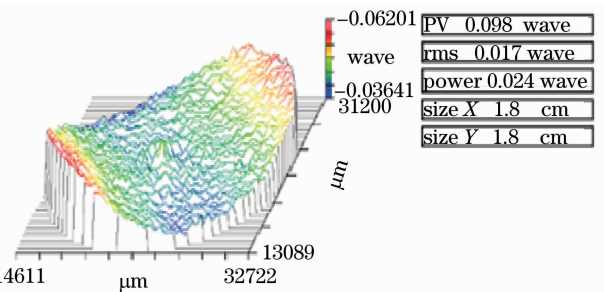


图 4 激光扩束系统测试结果

Fig. 4 Test results of the expander system of laser beam

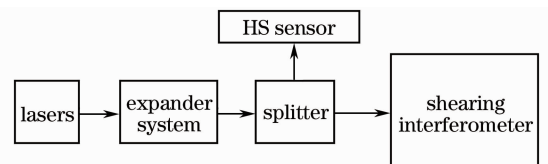


图 5 对比实验原理图

Fig. 5 Sketch of contrast experiment

度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，局部误差在 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内，风速小于 1 m/s 。测试激光束直径 10 mm ，实验平台离地高度 1.4 m 。CCD 像素数为 $1024\text{ pixel}\times 1024\text{ pixel}$ ，动态范围 62 dB ，每次采集的干涉图像条纹数为 27 条。

实验结果如图 6 所示，剪切干涉仪测量 PV 值比 HS 传感器探测 PV 值大 10 nm ，为 0.016λ ，而两种方法测得的 RMS 值都为 0.0142λ 。这是因为剪切干涉仪的空间分辨率更大，能够分辨更高的细节，而且剪切干涉仪探测结果中会出现孔径效应所导致的边缘效应，使得边沿处产生不稳定震荡，最终导致 PV 值增大而 RMS 值变化不明显。剪切干涉仪测量 RMS 值相对偏大的结果来源于仪器自身光学系统的波前畸变，其值小于 0.01λ ，小于大气湍流、振动等引入的不确定度，可以忽略不计。HS 传感器的探测结果起伏方差为 0.008λ ，大于剪切干涉仪的起伏方差 (0.003λ)。这与剪切干涉仪的放大因子 β 的选择和设计相关，不同形式的波前结构会有不同的还原精度，而总体趋势是放大因子越大还原精度也越高，但是当待测对象是输出波前相位分布比较复杂的强激光系统时，增大放大倍数并不一定能获得更好的结果^[7]。计算得到仪器的重复性 PV 值为 0.003λ ，RMS 值为 0.0006λ 。

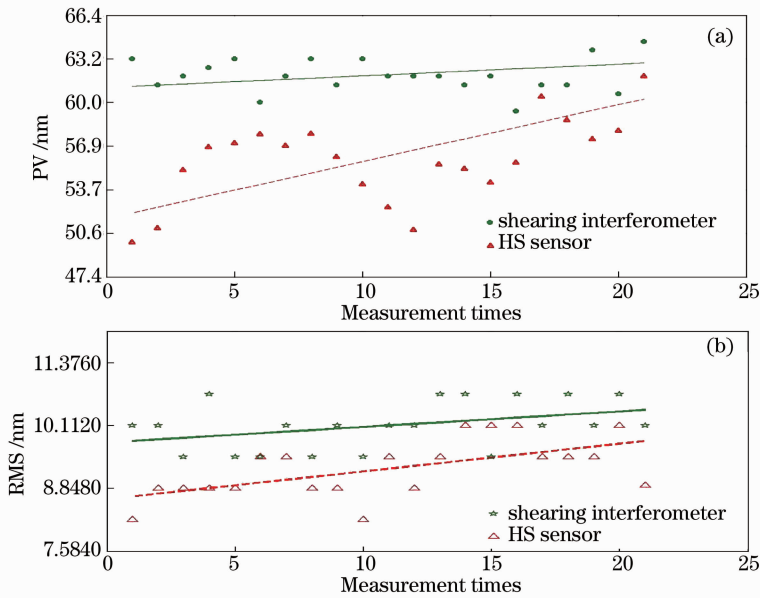


图 6 剪切干涉仪和 HS 传感器实验结果对比

Fig. 6 Comparison of between experimental results by shearing interferometer and HS sensor

剪切干涉仪的探测值与提取正一级频谱时汉宁窗^[12]大小的选择有关。选择更小的窗口可以滤去更多的噪声信号，但是也会滤去更多的波前细节^[6]如图 7 所示。由图 7(a)可知，探测的 PV 值随着汉宁窗的增大而增大。当窗口取值非常小时得到的波前信息只有大致轮廓，细节部分基本滤去，如图 7(b)所示。当窗口逐渐增大时，PV 值增加的趋势缓慢，波前细节、零级频谱和噪声信号也逐渐出现，如图 7(c)所示。但是当汉宁窗的大小超过零级频谱到一级频谱距离的一半时，PV 值随着窗口尺寸的增加而快速增加，且明显出现了条纹等信息，如图 7(d)所示。实验对比研究可以发现，通过设置合理的汉宁窗大小可以得到有最大信噪比

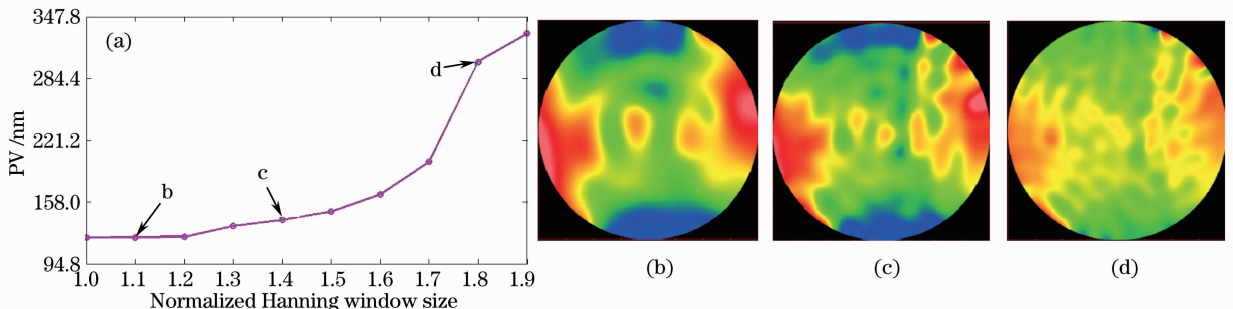


图 7 不同汉宁窗大小的计算结果

Fig. 7 Computation results for different sizes of Hanning window

波前信息的结果。

通过实验结果分析可得到合理的汉宁窗大小和截取部分边缘值,扣除仪器自身波前畸变量可得到非常精确的测量值。通过与 Zygo 干涉仪的对比实验可以校准仪器在不同畸变量上的测量精度。Zygo 干涉仪的测量准确度为

$$\sigma_a = \sigma_p + \sigma_r + \sigma_s, \quad (2)$$

式中 σ_p 是测量时的仪器精度, σ_r 是测量时的重复性, σ_s 是标准平面误差。实验中, RMS 值 $\sigma_p < 0.01\lambda$, $\sigma_r < 0.0005\lambda$, $\sigma_s < 0.01\lambda$, 计算可知 Zygo 干涉仪的准确度优于 0.01λ , 满足实验要求。实验采用不同波前畸变量的平板, 分别用 Zygo 干涉仪和径向剪切干涉仪测量, 结果如图 8 所示。

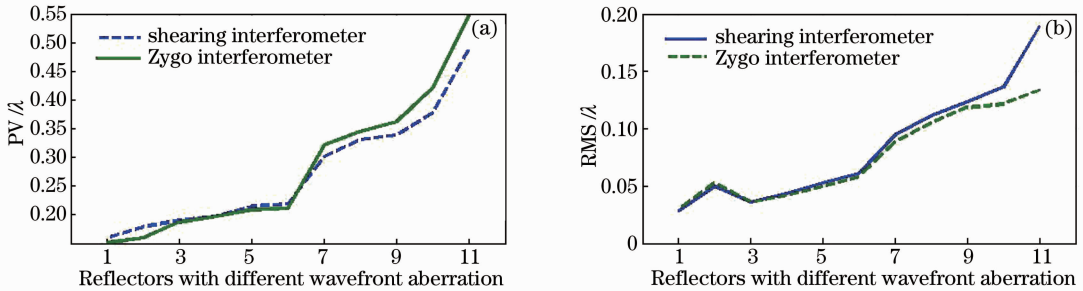


图 8 径向剪切干涉仪与 Zygo 干涉仪比对实验结果

Fig. 8 Experimental results of radial-shearing interferometer and Zygo interferometer

由图 8(a)可见,在测量波前畸变量较小时,比对结果显示两者 PV 值有一致性。当测量波前畸变较大时,剪切干涉仪的测量结果偏小。由图 8(b)可见,波前畸变 RMS 值小于 $\lambda/8$ 的时,两者的误差小于 $\lambda/25$,这时剪切干涉仪的精度优于 $\lambda/20$ 。波前畸变继续增大时,径向剪切干涉仪的测量值会明显小于 Zygo 干涉仪测量值,当入射波前畸变量大于 $\lambda/5$ 时对比结果误差大于 $\lambda/20$ 。这说明当前研制的放大倍数为 2 的径向剪切干涉仪在测量波前畸变量不大的入射波前时有可信的测量结果,当入射波前畸变较大时测量结果会明显偏小。

4 结 论

研制了一套径向剪切干涉仪,通过与 HS 传感器、Zygo 干涉仪的对比实验,研究了汉宁窗的取值范围和边缘截取值的合理范围。实验结果说明研制的径向干涉仪在入射波前畸变较小时有较高的测量精度和可信度,仪器的重复性和测量精度都能满足高功率激光系统波前探测要求。

参 考 文 献

- 1 P. J. Wegner, M. A. Hnesian, J. T. Salmon *et al.*. Wavefront and divergence of the beamlet prototype laser[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 1019~1030
- 2 Zhao Junpu, Chen Bo, Peng Hansheng *et al.*. Laser beam quality diagnosis with radial shearing interferometry[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4): 565~568
赵军普, 陈 波, 彭翰生 等. 径向剪切法综合诊断光束质量研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(4): 565~568
- 3 Kong Meimei, Gao Zhishan, Chen Lei *et al.*. Cyclic radial shearing interferometry based on polarization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 135~139
孔梅梅, 高志山, 陈 磊 等. 基于偏振移相的环路径向剪切干涉[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 135~139
- 4 M. V. R. K. Murty. A compact radial shearing interferometer based on the law of refraction[J]. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(7): 853~857
- 5 Waldemar W. Kowalik, Beata E. Garncarz, Henryk T. Kasprzak *et al.*. Corneal topography measurement by means of radial shearing interference; Part 1-theoretical consideration[J]. *Optik*, 2002, **113**(1): 39~45
- 6 Wang Yan, Zhang Lei, Lü Zhiwei. Research on measuring laser beam wavefront based on radial shearing interferometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(11): 39~44
王 岩, 张 磊, 吕志伟. 径向剪切干涉测量激光光束波前的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(11): 39~44

- 7 Li Dahai, Chen Huaixin, Chen Zhenpei *et al.*. Algorithm and accuracy study of wavefront reconstruction with different amplification ratio based on the cyclic radial shearing interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(6): 530~508
李大海, 陈怀新, 陈振培 等. 径向剪切干涉波前重建算法和不同倍数下重建精度的研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(6): 530~508
- 8 Liu Jianfeng, Long Funian, Zhang Wei *et al.*. Frequency domain analysis of surface figure fitting based on Zernike polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1062~1066
刘剑峰, 龙夫年, 张伟 等. 基于泽尼克多项式进行面形误差拟合的频域分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1062~1066
- 9 A. R. Barnes. A combined phase near field and far field diagnostic for large aperture laser systems[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 564~572
- 10 Ma Chuntao, Luo Hongxin, Wang Jie *et al.*. Surface error measurement of plane mirrors based on oblique incidence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 071201
马春桃, 罗红心, 王 劼 等. 斜入射法检测平面反射镜的面形误差[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(7): 071201
- 11 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann Shack wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1236~1240
李新阳, 姜文汉. 哈特曼夏克传感器的泽尼克模式波前复原误差[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1236~1240
- 12 A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer. *Discrete-Time Signal Processing*[M]. Prentice-Hall, 1989. 447~448
- 13 Yang Jinsheng, Rao Xuejun, Rao Changhui. A corneal topography based on Hartmann-Shack sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 826~831
杨金生, 饶学军, 饶长辉. 基于哈特曼-夏克传感器的角膜地形图测量仪[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 826~831