

# 基于泰伯-莫尔干涉技术的焦距测量系统校准技术研究

赵琦<sup>1</sup> 蒋泽伟<sup>1</sup> 孟庆安<sup>1</sup> 李轶国<sup>1</sup> 樊红英<sup>1</sup> 胡绍云<sup>1</sup> 李建欣<sup>2</sup> 何勇<sup>2</sup> 杨洁<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西南技术物理研究所, 四川 成都 610041; <sup>2</sup>南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210000

<sup>3</sup>四川大学电子信息学院, 四川 成都 610041

**摘要** 研制了一套用于测量超长焦距的泰伯-莫尔干涉仪,并设计了一套校准设备和方法对泰伯-莫尔干涉仪的测量不确定度进行评定,核准焦距范围达100 m。校准设备包括了一套焦距发生器和激光光源,利用经过计量的标准透镜和实验对焦距发生器进行标定、测量和量值溯源。通过实验结果分析和计算,可知该校准技术具有良好的测量不确定度,能够对基于泰伯-莫尔方法的焦距测量系统进行精确校准。

**关键词** 测量;焦距;计量;泰伯-莫尔干涉

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.031204

## Calibration of Foci-Meter Based on Talbot-Moiré Interferometer

Zhao Qi<sup>1</sup> Jiang Zewei<sup>1</sup> Meng Qing'an<sup>1</sup> Li Yiguo<sup>1</sup> Fan Hongying<sup>1</sup> Hu Shaoyun<sup>1</sup>

Li Jianxin<sup>2</sup> He Yong<sup>2</sup> Yang Jie<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China

<sup>2</sup>School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210000, China

<sup>3</sup>College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610041, China

**Abstract** It developed a method to calibrate the foci-meter based on Talbot-Moiré interferometer, the calibration range of focal length up to 100 meters. Moreover, it introduced a foci-meter based on Talbot-Moiré interferometer. It includes a lens group and a laser source to generate laser beams with steady focal length and wavefronts which used to calibrate the foci-meter. The focal length of the lens group is measured by experiments taking advantage of a traceable lens. The following conclusions can be derived from experimental results: the uncertainty of this calibration method is acceptable.

**Key words** measurement; focal length; metrology; Talbot-Moiré interferometer

**OCIS codes** 120.3180; 120.3620; 090.1970; 090.2890; 220.4840

## 1 引言

精确测量光学系统焦距在国防技术、科学研究、社会经济生活领域都具有重大的现实意义<sup>[1]</sup>。大口径超长焦距系统广泛应用于国家级重大项目如天文望远系统、激光武器系统、激光核聚变以及空中遥感相机等领域<sup>[2]</sup>。

在测量方法上,传统几何测量需要较长的测试平台,操作复杂且精度低<sup>[3-4]</sup>。采用泰伯莫尔技术测量焦距值,有实用性好、精度高等优点<sup>[5]</sup>。Nakano等<sup>[6]</sup>于1985年提出了基于泰伯-莫尔效应的焦距测量方法,该方法测量精度高,并得到不断改进和发展;浙江大学孙琛等<sup>[7]</sup>利用傅里叶变换方法,对大口径系统的焦距检测进行了研究;Parham等<sup>[8]</sup>利用Fizeau干涉仪测量平行光通过透镜或光学系统后光束波前曲率半径,从而得到光学系统焦距值,在2000 mm焦距测量范围内,测量误差达到0.02%;DeBoo等<sup>[9]</sup>在Parham等<sup>[8]</sup>的基础上,使用了全息技术在2000 mm焦距内理论误差达到了0.0088%;但文献中的实验对象焦距均在10 m以内,

收稿日期: 2013-10-02; 收到修改稿日期: 2013-10-30; 网络出版日期: 2014-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(61205016)

作者简介: 赵琦(1985—),男,硕士,工程师,主要从事高能激光在湍流大气中传输的理论和数值模拟计算等方面的研究。

E-mail: zhaoyi2156@163.com

且未对量值的溯源性进行报道。本文提出了一种对泰伯-莫尔长焦距测量系统的校准溯源方法,校准焦距范围达到 100 m,校准口径达到 200 mm,并进行了实验验证。

传统对焦距测量系统的校准主要采用标准透镜<sup>[5-9]</sup>,但当焦距测量范围超过 10 m 后,使用单透镜难以完成校准工作。本文对泰伯-莫尔长焦距测量系统的校准分四步进行,首先研制一套后焦距为 100 m 的大口径焦距发生器;然后将焦距为 1 m 的标准透镜送检溯源到国家标准,作为标准量值;再将标准透镜和焦距发生器组合并测量后焦距,通过计算获得大口径焦距发生器的后焦距值和测量不确定度;最后利用大口径焦距发生器校准泰伯-莫尔长焦距测量系统,计算后得到测量不确定度。

## 2 泰伯莫尔方法长焦距测量原理

泰伯-莫尔长焦距测量系统如图 1 所示,主要包含四部分:激光光源,朗奇光栅,条纹图像接收系统和计算软件。其中,激光光源为 1.055  $\mu\text{m}$  近红外激光器、激光器驱动器、准直扩束光学系统和可变光阑系统;朗奇光栅的直径为 250 mm,两朗奇光栅之间的距离固定为泰伯距离;条纹图像接收系统配置半透成像屏、成像透镜组及 CCD 图像采集系统。

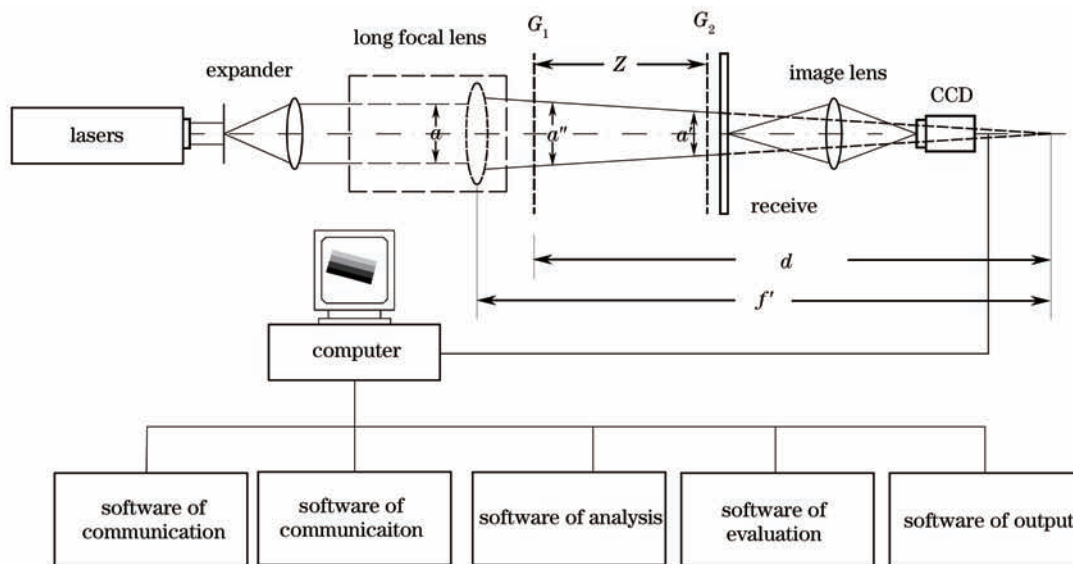


图 1 泰伯-莫尔长焦距测量系统总体技术方案原理图

Fig.1 Setup of foci-meter based on Talbot-Moiré interferometer

透射镜的焦距为<sup>[10]</sup>

$$f = s + \frac{d_T}{1 - \cos \theta + \sin \theta \cdot \cot \varphi} \quad (1)$$

式中  $s$  为待测透镜与光栅  $G_1$  的距离,夹角  $\theta$  为光栅  $G_1$  与  $G_2$  之间的角度,  $\varphi$  为条纹发生偏转角度,  $d_T$  为两光束距离。从莫尔条纹图像出发,利用离散傅里叶变换公式和改进算法<sup>[7]</sup>,通过一系列迭代,逐步逼近频谱点的真实坐标  $(u, v)$ ,

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right], \quad (2)$$

式中  $f(x, y)$  为条纹图像,  $F(u, v)$  为频谱图像。任意取定一组  $(u, v)$  代入 (2) 式,就可以求得频谱面上坐标  $(u, v)$  处的频谱值。

## 3 校准方法

对基于泰伯-莫尔干涉方法的长焦距测量装置进行校准,参考设计方案后<sup>[11]</sup>,设计了一套大口径长焦距发生器,如图 2 所示。

主要参数后焦距为 72 m,出口口径为 200 mm,焦点光斑直径为 15 mm,设计波长为 1.055  $\mu\text{m}$ ,采用剪切干涉仪<sup>[12]</sup>和缩束系统测量有效口径为 180 mm 时,波前畸变优于 0.3 $\lambda$ (PV 值),光程差和调制传递函数(MTF)

如图3所示。

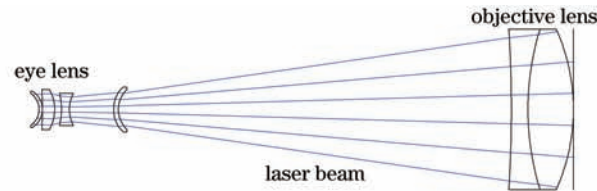


图2 光学系统结构图

Fig.2 Schematic diagram of lens group

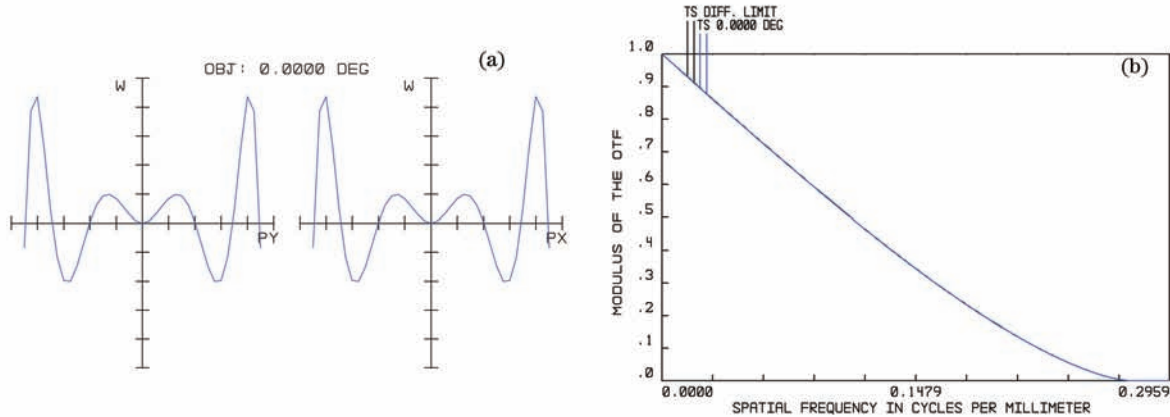


图3 设计结果。(a)光程差;(b)调制传递函数

Fig.3 Analysis of lens group. (a) OPD; (b) MTF

研制了一个标准平凸透镜,口径为180 mm,通过溯源到国家基准后,转换到1.055 μm 波长后焦距值为997 mm,测量不确定度值优于15 mm( $k=1$ )。

将标准平凸透镜和长焦距发生器组合,并变换两者相对位置,测量各位置对应的焦距值,可以得到长焦距发生器的焦距值和测量不确定度,并以此校准泰伯-莫尔焦距测量系统的测量分辨率和精度,如图4所示。

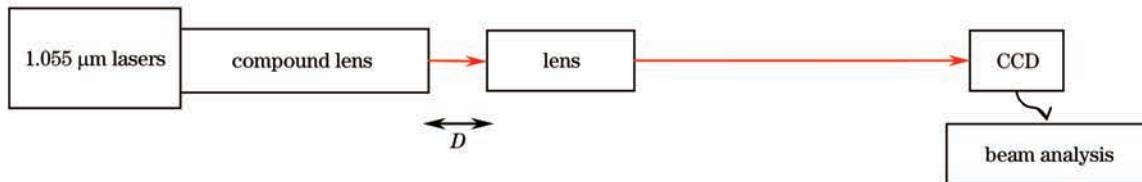


图4 实验方案

Fig.4 Schematic diagram of experiment

根据几何光学原理可知,焦距发生器后焦距  $f_a$  的理论值为

$$f_a = d - \frac{f_b B}{B - f_b}, \tag{3}$$

式中  $f_b$  为标准透镜的焦距值,  $B$  为焦距发生器和标准透镜组合后截距,焦点到标准透镜主面的距离,通过 CCD 测量束腰到标准透镜后表面的距离,以及理论计算最后得到标准透镜主面到 CCD 的后截距  $B$ ,  $d$  为焦距发生器和标准透镜主面距离,通过计算可以得到测量偏微分方程,并计算标准偏差值为

$$\Delta f_a = \sqrt{(\Delta d)^2 + \left(\frac{f_b}{f_b - B}\right)^4 (\Delta B)^2 + \left(\frac{B}{f_b - B}\right)^4 (\Delta f_b)^2}, \tag{4}$$

式中  $B$  和  $f_b$  为隐函数关系,但是  $B$  与  $f_b$  之间变化关系相对固定,因为在本计算边界条件之内变化量小于0.1%,所以忽略不计。  $\Delta d$  测量误差为0.1 mm。

采用 CCD 寻找  $B$  的测量误差包括焦移、焦深和距离测量误差导致的测量不确定度。过去几十年国际国内已经对激光光束的焦移现象作了大量的理论研究工作,等效菲涅耳数相关公式为

$$N_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{\frac{8}{45} a^4 \pi^2 + \lambda^2 f^2}}{\pi \lambda f}, \quad (5)$$

对于标准透镜,当口径为0.1 m,焦距为10 m时,通过换算可以得到其测量不确定度为,

$$\Delta f_{\text{shifts}} < 0.2 \text{ mm } (k=1),$$

考虑到CCD测量过程中的分辨率限制,将束腰宽度5%内的范围作为焦深导致的测量不确定度为

$$\Delta f_{\text{depth}} < 0.15 \text{ mm } (k=1),$$

距离测量引入的不确定度为

$$\Delta f_{\text{meters}} < 0.1 \text{ mm } (k=1),$$

得到后焦距 $B$ 的测量不确定度表示为

$$\Delta B = \sqrt{\Delta f_{\text{meters}}^2 + \Delta f_{\text{depth}}^2 + \Delta f_{\text{shifts}}^2} < 0.27 \text{ mm } (k=1),$$

$(f_b - B)$ 通过计算为85 mm,将计算结果代入(4)式,可以得到相对测量不确定度值为

$$\Delta f_a / f_a = \sqrt{0.1^2 + 1307 + 2496800} / 72536 = 2.2\% \quad (k=1)$$

## 4 校准实验

校准实验如图4所示,校准方法参考文献[13]。激光器采用Nd:YAG脉冲波长1.055  $\mu\text{m}$ ,将长焦距发生器和标准透镜组合后放入待测区间,调节长焦距发生器与标准透镜的距离 $d$ ,记录测量结果后与理论值比对,距离长度 $d$ 由光栅尺测量,测量结果如图5所示。实验结果与理论值的标准偏差小于1%,说明该校准方法可行,可以用于校准基于泰伯莫尔干涉方法的长焦距测量系统。

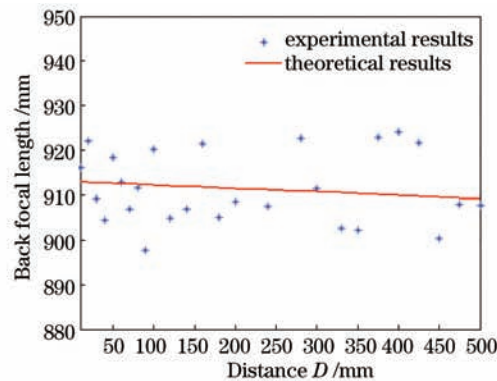


图5 实验与理论计算结果

Fig.5 Results of theoretical versus experimental

## 5 结 论

对基于泰伯-莫尔干涉方法的长焦距测量系统进行计量,提出了采用焦距发生器和标准透镜组合的方法进行校准。设计了一套焦距发生器用于校准实验,并对焦距发生器的光学性质进行了分析。

阐述了校准方法和参数溯源流程,对该校准方法的测量不确定度进行了理论计算,提供了校准实验的结果并进行了分析,理论计算和实验结果表明该方法有较高的可靠性和准确度。能够广泛的使用在长焦距测量系统的校准过程中,并且能够作为标准器进行量值传递。

### 参 考 文 献

- 1 De Angelis M, De Nicola S, Ferraro P, *et al.*. A new approach to high accuracy measurement of the focal lengths of lenses using a digital Fourier transform [J]. *Opt Commun*, 1997, 136(1): 370-374.
  - 2 Duan Yaxuan, Chen Yongquan, Zhao Jianke, *et al.*. Focal length testing method of long focal length laser optical system [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0408005.
- 段亚轩,陈永权,赵建科,等.长焦距激光光学系统焦距测试方法[J].中国激光,2013,40(4): 0408005.

- 3 Sun Guozheng, Guo Hongqi. Optical testing method for large convex surface [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(S1): 631-362.  
孙国正, 郭弘其. 大口径凸非球面反射镜的检测方法[J]. *光学技术*, 2006, 32(S1): 631-362.
- 4 Liu Bin, Wang Qiuping, Fu Shaojun. Investigation of long trace profiler for aspherical optics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(2): 46-53.  
刘斌, 王秋平, 傅绍军. 长程大型非球面轮廓测量系统的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(2): 46-53.
- 5 Kafri O. Noncoherent method for mapping phaser objects [J]. *Opt Lett*, 1980, 5(12): 555-557.
- 6 Y Nakano, K Murata. Talbot interferometry for measuring the focallength of a lens [J]. *Appl Opt*, 1985, 24(19): 3162-3166.
- 7 Sun Chen, Shen Yibing, Bai Jian, *et al.*. The precision limit analysis of long focal length testing based on Talbot effect of Ronchi grating [J]. *Acta Photonics Sinica*, 2004, 33(10): 1214-1217.  
孙琛, 沈亦兵, 白剑, 等. Ronchi光栅Talbot效应长焦距测量的准确度极限研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(10): 1214-1217.
- 8 T G Parham, T McCarville, M A Johnson, *et al.*. Focal length measurements for the National Ignition Facility large lenses [C]. *Optical Fabricaton and Testing Conference*, Tucson, Arizona, 2002: OWD8.
- 9 B DeBoo, J Sasian. Precise focal-length measurement technique witha reflective Fresnel-zone hologram [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(19): 3903-3909.
- 10 Hou Changlun, Sun Chen, Bai Jian, *et al.*. Scanning method for focal length measurement of large aperture long focal mirror and lens [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(3): 219-222.  
侯昌伦, 孙琛, 白剑, 等. 大口径长焦距镜面和透镜的扫描法焦距测量技术[J]. *计量学报*, 2004, 25(3): 219-222.
- 11 Lü Bo, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design of all spherical surfaces zoom lithographic system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0622001.  
吕博, 刘伟奇, 康玉思, 等. 全球面变焦距光刻系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0622001.
- 12 Zhao Qi, Jiang Zhewei, He Yong, *et al.*. Development and calibration of shearing interferometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 041204.  
赵琦, 蒋泽伟, 何勇, 等. 径向剪切干涉仪系统的研制与校准研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 041204.
- 13 Wang Shengyun, Zheng Xue, Yang Hong, *et al.*. Explanation of calibration specification for IR optical focal length measuring equipment [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(6): 806-808.  
王生云, 郑雪, 杨红, 等. 红外光学系统焦距测量装置校准规范说明[J]. *应用光学*, 2007, 28(6): 806-808.