

# 提高平行光管分划板装调精度新方法研究

何 煦 吴国栋\*

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要** 推导了分划板失调量与待测系统调制传递函数(MTF)下降之间的解析表达式,对光管和待测系统焦距比与分划板装调精度之间的数学关系进行仿真分析,发现焦距比为 1,分划板轴向装调误差为 0.0012 mm 引起的待测系统 MTF 下降为 0.01。据此提出依据 Zernike 系数定量指导装调,采用数字干涉仪与平行光管、分划板构成干涉光路进行逐次迭代调整的方法。实验与数学分析均表明,上述方法可显著提升分划板装调精度,其引起的探测器离焦导致的 MTF 下降可控制在 0.013。实验结果与理论值之间的偏差表明,环境扰动等不确定度对标定精度产生影响,在测试环境良好的条件下采用上述装调方法,使用焦距与待测光电系统焦距相当的平行光管就可满足高精度光学标定与装调的测试需求。

**关键词** 测量;光学检测;装调与标定;猫眼干涉法;平行光管;分划板

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0912001

## Procedure to Improve Alignment Accuracy of Collimator Reticle

He Xu Wu Guodong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** The mathematical representation of the modulation transfer function (MTF) decline caused by reticle alignment error is deduced. And the relationship between the focal length ratio (FLR) and the alignment precision of reticle is analyzed. When FLR equals to 1, the alignment error of reticle equal to 0.0012 mm which causes the MTF drops to 0.01. Based on that, the manuscript reports a method according to the Zernike coefficient as a quantifying criterion to guide alignment process. Interferometer, collimator and special reticle are used to generate interference fringes. The verified experimental results and mathematical analysis indicate that the new procedure can improve alignment accuracy of collimator reticle remarkable, and the MTF decline of the photoelectric imaging system under calibrating is reduced to 0.013. The environmental elements effect the calibration result. Using this alignment method, the collimator has the same focal length as the system under testing can be used in very high precision optical testing and calibration.

**Key words** measurement; optical testing; calibration and alignment; cat eye interferometry; collimator; reticle

**OCIS codes** 120.3180; 220.1140; 220.4840; 120.1680; 120.0280

## 1 引 言

使用平行光管标定光电成像系统探测器基准位置、获取调焦曲线的试验过程是空间光学遥感载荷等高性能光电成像系统研制过程中必不可少的关键步骤<sup>[1-3]</sup>。

分划板安装在平行光管焦平面内经照明后,可

模拟具有特定光强分布的远场光学目标,用于标定光电系统探测器位置<sup>[4-8]</sup>。而分划板装调误差将导致光管出射光束准直性下降,引起待测系统探测器位置失调,进而导致光电系统调制传递函数(MTF)在整个频域内下降。工程经验表明,当平行光管焦距为待测光电系统焦距 3~5 倍,自准直法、刀口法

**收稿日期:** 2014-03-06; **收到修改稿日期:** 2014-04-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(61307114)

**作者简介:** 何 煦(1981—),男,博士,副研究员,主要从事光学系统装调、检测技术等方面的研究。

E-mail: 911max@sina.com

\* **通信联系人.** E-mail: wuguodong586@163.com

等经典分划板装调方法可获得 0.02 mm 的装调精度<sup>[9-11]</sup>。但当待测系统为焦距 20 m 以上的空间光学传感器, 兼顾制造难度与测试环境后的选择是研制焦距与之相当的平行光管用于集成装调<sup>[12-14]</sup>。而当焦距比(光管焦距与待测系统焦距之比)接近 1 时, 实验表明, 现有装调方法带来的分划板装调误差将引起光电系统传递函数大幅下降。

基于干涉原理的装调方法可获得波长量级的装调精度<sup>[15-19]</sup>, 并提供定量的评判依据。鉴于此, 在之前工作的基础上<sup>[20-21]</sup>, 提出了一种基于干涉原理, 以 Zernike 系数定量指导分划板装调的方法, 有望使分划板在光管焦面的装调精度大幅提高<sup>[22]</sup>。

由于分划板既存在倾斜误差, 又包含离焦误差, 误差的耦合作用效果比较复杂, 因此, 本文重点讨论消除分划板离焦的方法, 并通过实验手段尽量减小倾斜误差的影响。对不同焦距比条件下, 分划板离焦误差与待测系统 MTF 下降间的作用关系进行计

算与仿真, 获得在焦距比接近 1 时所需的分划板装调精度, 据此提出满足上述精度需求的装调方法, 分析分划板离焦失调与 Zernike 系数间的数学关系。再通过逐次实验分离出光电系统探测器离焦导致的 MTF 下降与理论值比对, 可推算出新方法实际获得的分划板装调精度。

## 2 理论推导与分析

如图 1 所示, 用于光电系统探测器感光面位置标定的平行光管由光学系统、位于焦平面的分划板及照明系统构成。图 1 右侧为平行光管以及带有装调误差的分划板, 左侧为光电成像系统, 根据对探测器获取分划板图像的处理, 可以确定探测器的位置。若探测器被标定在错误位置, 即探测器感光面偏离光电系统理想焦面, 将导致工作状态下成像系统获取图像模糊、MTF 下降。

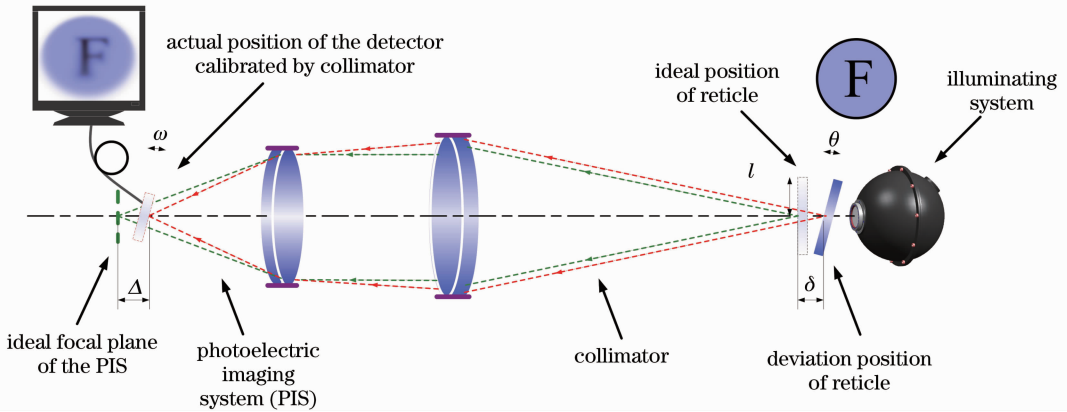


图 1 使用平行光管进行光电系统探测器位置标定的基本原理

Fig. 1 Calibration process of the detector position in electro-optical imaging system by a collimator and its reticle

若平行光管焦距为  $f_{\text{coli}}$ , 分划板离焦误差为  $\delta$ , 倾斜误差为  $\theta$ , 分划板使用区域半径为  $l$ , 待测光电成像系统焦距为  $f_{\text{len}}$ , 并定义焦距比等于光管焦距与待测系统焦距之比, 则分划板离焦引起的光电系统探测器离焦误差为

$$\Delta = \delta \left( \frac{f_{\text{len}}}{f_{\text{coli}}} \right)^2, \quad (1)$$

引起的探测器感光面倾斜误差为

$$\omega = \arctan \left( \frac{f_{\text{len}}}{f_{\text{coli}}} \tan \theta \cdot \sec \theta \right). \quad (2)$$

其中分划板离焦和倾斜误差耦合后与待测系统 MTF 下降之间的的作用关系比较复杂, 但倾斜误差可以在标定过程中尽量消除。因此重点关注分划板离焦误差与待测系统 MTF 下降 ( $F_{\text{fall}}$ ) 之间的数学关系。若待测光电系统  $F_{\text{lens}} = f_{\text{lens}}/D_{\text{lens}}$ , 则在待测

系统焦深  $\sigma = \pm 2\lambda F_{\text{lens}}^2$  范围内, 由探测器离焦  $\Delta$  引起的弥散斑直径可表示为  $\Delta/F_{\text{lens}}$ , 则分划板沿轴装调误差  $\delta$  引起的待测系统归一化调制传递函数下降可表示为

$$F_{\text{fall}}(\rho) = \frac{2J_1 \left( \pi \rho \frac{\Delta}{F_{\text{lens}}} \right)}{\pi \rho (\Delta/F_{\text{lens}})} = \frac{2J_1 \left[ \frac{\pi \omega \delta (f_{\text{len}}/f_{\text{coli}})^2}{F_{\text{lens}}} \right]}{\frac{\pi \omega \delta (f_{\text{len}}/f_{\text{coli}})^2}{F_{\text{lens}}}}, \quad (3)$$

式中  $J_1$  表示贝塞尔函数。根据(3)式, 若波长  $\lambda = 550 \text{ nm}$ ,  $F_{\text{lens}}$  分别为 8、10、20, 焦距比分别为 5、3、1, 空间频率  $\rho = 38.5 \text{ lp/mm}$  (对应 Nyquist 频率), 光管分划板装调误差  $\delta$  与其引起的待测系统 MTF 下降之间的数学关系如图 2 所示。

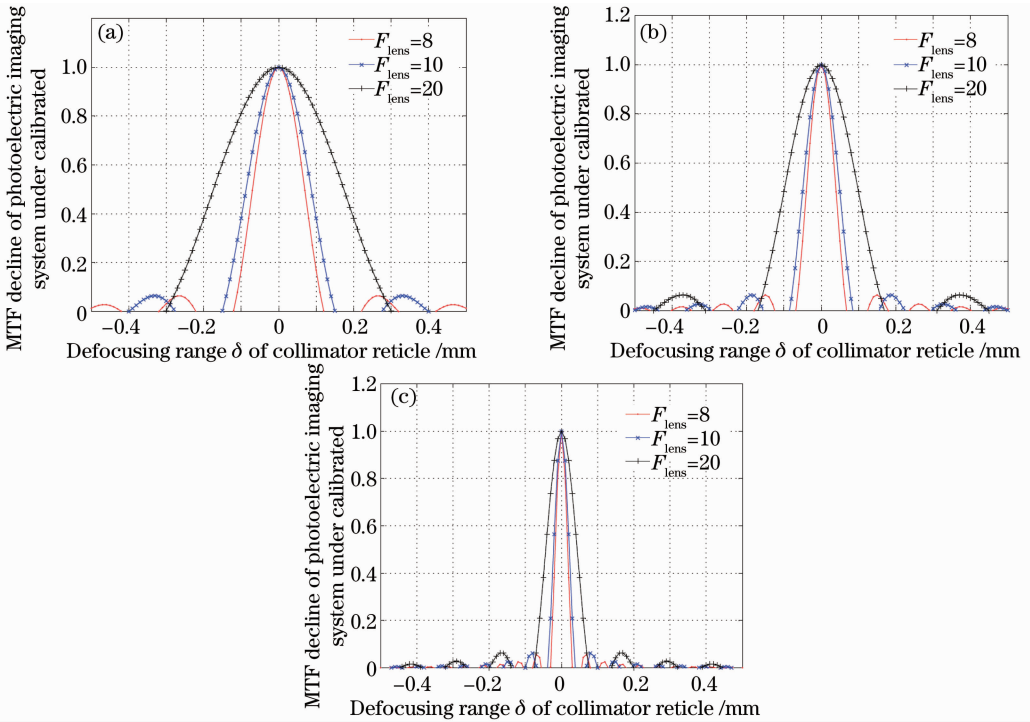


图2 分划板沿轴离焦量与待测系统 MTF 下降之间数学关系仿真曲线。(a)  $f_{\text{coli}}/f_{\text{len}}=5$ ;

(b)  $f_{\text{coli}}/f_{\text{len}}=3$ ; (c)  $f_{\text{coli}}/f_{\text{len}}=1$

Fig. 2 Function curves indicates the relationship between the reticle alignment accuracy and the MTF decline.

(a)  $f_{\text{coli}}/f_{\text{len}}=5$ ; (b)  $f_{\text{coli}}/f_{\text{len}}=3$ ; (c)  $f_{\text{coli}}/f_{\text{len}}=1$

图2中横坐标表示平行光管分划板装调误差在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 范围内取值。纵坐标表示光电成像系统在特定频率处,其归一化调制传递函数下降值,并在此假设调制传递函数的最高值为无损失理论值,等于1。

仿真结果表明,若使用平行光管进行光电系统探测器位置标定,待测系统 MTF 的下降速度与其  $F$  数,以及光电系统与光管间的焦距比有关。焦距比确定时,  $F_{\text{lens}}$  越小,光管分划板装调误差引发的待测系统 MTF 下降越快,待测光电系统  $F_{\text{lens}}$  一定时,焦距比越小,光管分划板装调误差引起的待测系统 MTF 下降速度越快。

例如,若待测系统  $F_{\text{lens}}=10$ ,平行光管焦距为待测系统焦距 5 倍,当光管分划板装调误差  $\delta=0.023\text{ mm}$ ,其引起待测系统  $F_{\text{fall}}(\rho)$  下降约为 0.01。在上述条件下,若平行光管焦距与待测光电系统焦距相等,则  $F_{\text{fall}}(\rho)$  下降 0.01 对应的分划板装调精度需要达到  $0.0012\text{ mm}$ 。也就是说,若使用图 1 所示的方法对光电系统探测器位置进行标定,焦距比由 5 倍降至 1 倍,若要获得相同标定精度,则平行光管分划板的装调精度需要提高 20 倍以上。

### 3 基于干涉原理的装调方法

#### 3.1 装调步骤

装调的基本思路是使用平面数字干涉仪与平行光管、改进后的特殊分划板构成自准直干涉光路,分两步进行分划板与平行光管之间的装调。

第一步进行粗对准如图 3 所示,使用相对口径与平行光管相当的球面反射镜作基准,将球面反射镜连同微调机构摆放至平行光管焦面附近。将口径与平行光管口径相当的数字平面干涉仪摆放至平行光管出射端,使干涉仪口径基本覆盖光管口径。

此时,通过观察干涉条纹对干涉仪与球面反射镜的姿态和相对位置进行调整,直到出现稳定的准零级条纹。若由条纹计算得到的波像差数值最小,则表明球面反射镜、平行光管、干涉仪光轴共线,并且球面镜焦点与平行光管轴上焦点齐焦。

第二步进行分划板与平行光管焦面间精密装调。将特制分划板安装至平行光管焦面附近的调整机构内,使图案刻划面朝向干涉仪,并保持平行光管与干涉仪之间的相对位置不变。通过目视观察会聚光斑的大小与位置,微调分划板使分划板中心刻划有准直点的区域与汇聚光斑对准。

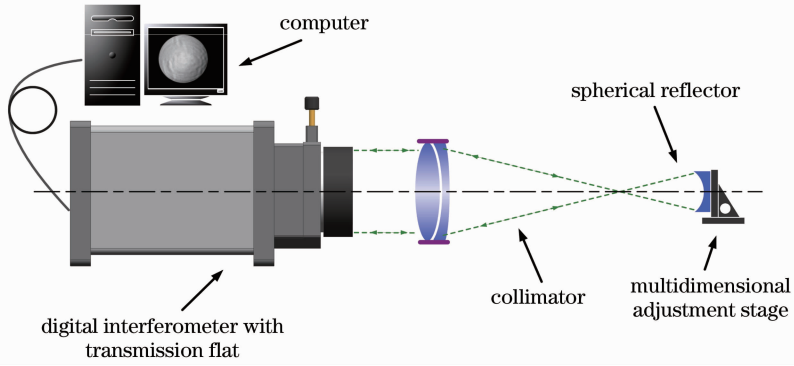


图 3 装调光路粗对准方法

Fig. 3 Schematic depiction of the first step in alignment procedure

根据“猫眼”干涉原理<sup>[23]</sup>,若忽略平行光管自身波像差,只有当分划板表面与光管实际焦面之间不存在离焦和倾斜误差,才会再次出现稳定零级条纹。因此可根据干涉条纹和 Zernike 系数,微调分划板的俯仰角、方位角,并沿光轴方向对分划板进行前后离焦调整,直至系统波像差接近光管波像差。上述调整过程如图 4 所示。

对传统光学分划板<sup>[24]</sup>改进后,可应用于上述装调过程。改进后的分划板如图 5 所示,在分划板中心刻划直径为 1 mm 的高反射率圆形靶面后,可将分划板中心区域等同于高精度平面反射镜。使干涉仪出射光束经光管聚焦后位于该圆形靶面内,再反射形成干涉条纹。

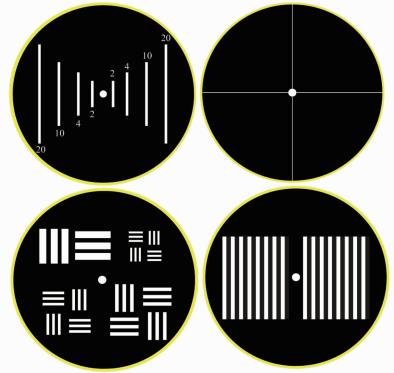


图 5 带有中心圆形靶面的特制分划板示意图

Fig. 5 Design of circular high reflectivity target in the centre of the special reticle

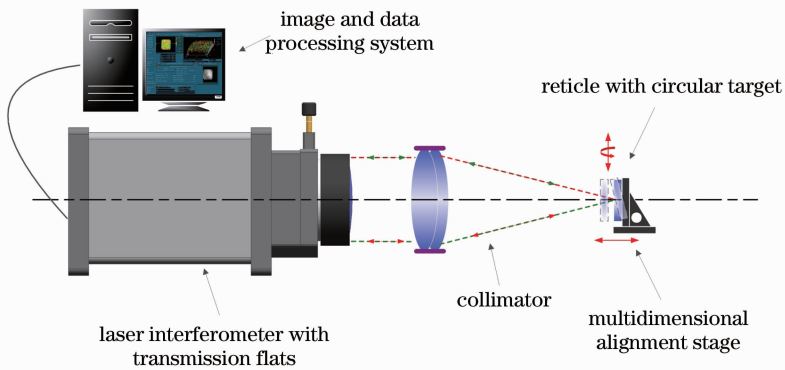


图 4 分划板高精度装调方法

Fig. 4 Schematic depiction of the fine alignment process in the second step

为消除分划板倾斜误差对装调精度的影响,根据零级干涉条纹产生条件,可在垂直光轴的平面内对分划板进行二维微量平移,若零级干涉条纹保持不变,则表明分划板与光轴间的倾斜误差可忽略。

### 3.2 装调精度分析

通过计算干涉条纹,可获得与波像差相关的 Zernike 系数,其中  $Z_{power}$  项与分划板离焦量  $\delta$  相关。 $\delta$  与 Zernike 系数中  $Z_{power}$  项、平行光管口径  $D_{coli}$ 、焦

距  $f_{coli}$ 、平行光管波像差中的  $Z_{coli-power}$  项之间具有如下数学关系:

$$\delta = \frac{Z_{Power} - Z_{coli-power}}{[\sqrt{4f_{coli}^2 - D_{coli}^2}/(2f_{coli})] - 1} = (Z_{Power} - Z_{coli-power}) / \left( \sqrt{1 - \frac{1}{4F_{coli}^2}} - 1 \right). \quad (4)$$

根据(4)式可计算出分划板离焦量  $\delta$ ,并通过计算结果正负判断调整方向。根据 Zernike 系数中  $Z_{power}$

值的大小与正负, 逐次调整分划板位置与姿态, 直到  $Z_{\text{power}}$  与  $Z_{\text{colli-power}}$  的差值最小。此外(4)式表明, 具有不同  $F_{\text{colli}}$  的平行光管, 使用上述方法获得的分划板装调精度并不相同。假设平行光管自身波像差为固定值, 可仿真计算得到  $F_{\text{colli}}$  与分划板装调误差  $\delta$  间的关系曲线, 如图 6 所示。

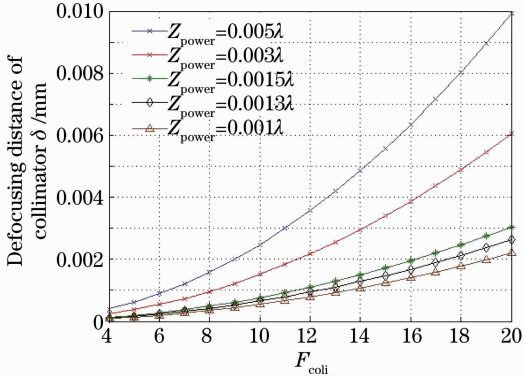


图 6 光管相对孔径与装调精度关系曲线  
Fig. 6 Defocusing range of collimator reticle as a function of  $F_{\text{colli}}$  with different  $Z_{\text{power}}$

图 6 的仿真结果表明, 分划板装调精度随  $F_{\text{colli}}$  增大而下降。Zernike 系数中  $Z_{\text{power}}$  值越小, 分划板装调精度对  $F_{\text{colli}}$  的敏感度越低。

举例说明, 若  $Z_{\text{power}}$  与  $Z_{\text{colli-power}}$  的差值接近  $0.001\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ), 对于口径为  $\Phi 680 \text{ mm}$ , 焦距  $7000 \text{ mm}$  的平行光管, 使用口径  $\Phi 800 \text{ mm}$  的数字干涉仪对光管焦面处的分划板进行装调, 理论上可获得  $0.0007 \text{ mm}$  的装调精度。将上述结果代入(3)式, 若使用平行光管对一口径  $\Phi 650 \text{ mm}$ , 焦距  $6500 \text{ mm}$  的光电成像系统进行探测器位置标定, 由分划板装调误差引起的待测光电成像系统 MTF 的下降小于  $0.01$ 。

为了验证上述分析结果与装调方法, 进行验证实验。由于干涉测量的不确定度受环境影响较大, 需要尽量缩短测试光路, 以避免气流扰动、温度梯度等随机噪声对验证实验精度的影响。首先使用上述方法在平行光管焦面上装调分划板, 再使用它对另一光电成像系统的探测器位置进行标定, 其焦距与光管焦距相当。依据 MTF 级联相乘原理, 比对单独测试与集成测试的 MTF 值, 可分离出探测器位置误差引起的系统 MTF 下降, 据此对分划板的实际装调精度进行验证。

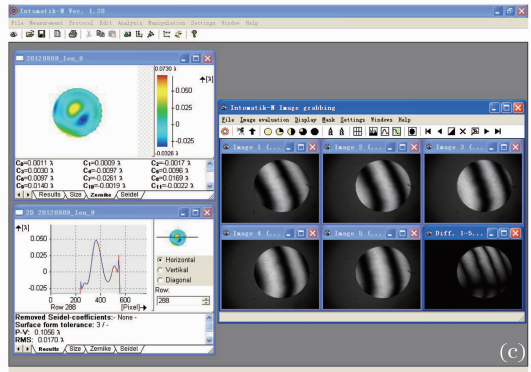
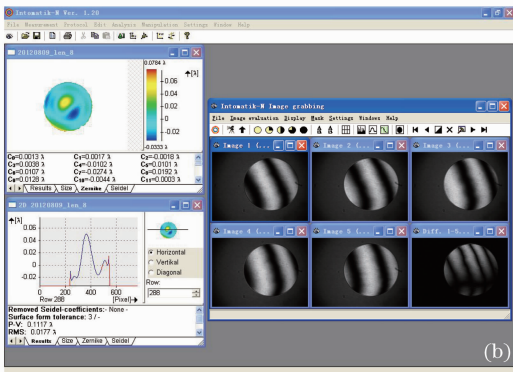
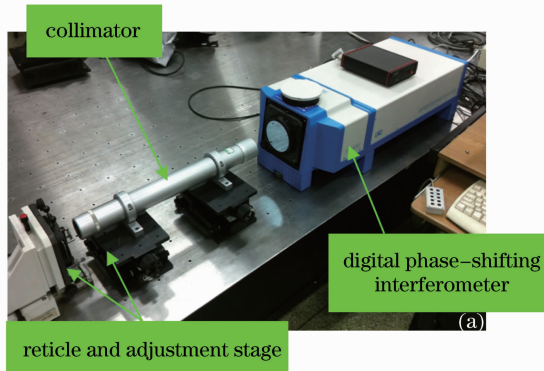


图 7 分划板装调实验现场与测试结果。(a)分划板装调实验现场; (b)干涉仪采集条纹与计算结果 1; (c)干涉仪采集条纹与计算结果 2

Fig. 7 Alignment process setup and results in the verification experiment. (a) Alignment process for collimator reticle; (b) fringes and calculation results 1; (c) fringes and calculation results 2

## 4 装调实验

为降低环境因素的影响,验证实验在气浮隔振平台以及气流控制较好的实验室中进行。所选平行光管焦距为 550 mm、口径  $\Phi 50$  mm,可以进一步缩短测试光路,降低环境噪声影响。

实验中使用口径  $\Phi 80$  mm,精度  $\lambda/80$  [峰谷(PV)值,  $\lambda=632.8$  nm]的 MÖLLER V-100/P 相移干涉仪及平面标准镜(TF)。测试过程中主要依据干涉仪显示的 Zernike 系数计算结果及相对变化量作为计算分划板离焦量的依据。并且通过多次重复测量并配合使用高精度多维调整台,进一步提高数据重复性与灵敏度。

使用上述方法完成分划板装调,实验现场与结果如图 7(a)~(c)所示。在接近光管焦面的位置,干涉条纹分布对分划板位置十分敏感,微小位移量即引起干涉图发生较大变化,这与图 6 的仿真结果比较吻合。经多次迭代调整后,当计算得到的  $Z_{power}$  与光管自身 Power 值十分接近时,则认为分划板在平行光管的焦面内装调完毕。

接着分别对待测光电系统的探测器与光学系统的 MTF 进行测试。所选光电系统口径  $\Phi 50$  mm,焦距 530 mm。其中光学成像系统的调制传递函数在空间频率  $\rho_{Nyquist}=38.5$  lp/mm 处对应的  $F_{opt}(\rho_{Nyquist})=0.65$ 。CCD 探测器及处理系统调制传递函数在空间频率  $\rho_{Nyquist}=38.5$  lp/mm 处对应的  $F_{elec}(\rho_{Nyquist})=0.45$ 。这样根据传递函数的级联相乘原理,光电系统 Nyquist 频率处的理论值( $F_{system}$ )为 0.293。

分别完成上述单独测试以及光管与分划板装调后,使用装调好分划板位置的平行光管对上述待测系统的光学系统与 CCD 探测器进行集成,标定探测器位置,实验现场如图 8 所示。

再使用传递函数测试仪对集成后的整机系统进行 MTF 测试,其在空间频率 38.5 lp/mm 处对应的  $F_{system}(\rho_{Nyquist})=0.28$ 。也就是说由 CCD 探测器离焦误差引起的系统调制传递函数下降约为 0.013。其与理论值的偏差主要来自于数字干涉仪所用探测器灰阶响应灵敏度,以及环境不确定等综合因素。

## 5 结 论

平行光管是实验室条件下标定光电系统探测器位置的基准器具之一,其分划板装调精度直接影响探测器位置标定的准确性。论文对分划板装调误差引发的待测光电系统探测器离焦及系统 MTF 下降

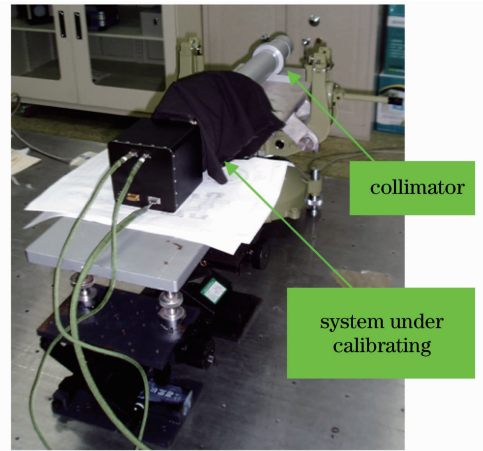


图 8 使用平行光管校准探测器位置实验现场  
Fig. 8 Setup of the detector position of electro-optical imaging system by using collimator to calibrate

进行数学分析,结果表明当光管焦距与待测光学系统焦距接近时,分划板沿轴方向 0.02 mm 的装调误差将导致使用其定标的光电成像系统 MTF 下降 0.25。为解决上述问题,改进了一种基于数字干涉仪的分划板装调方法,利用特殊分划板、平行光管、干涉仪构成准直干涉光路,再根据 Zernike 系数与离焦量之间的数学关系指导调整方向与调整量。经过数学分析与实验验证,对于相对孔径 F10 的平行光管,若使用精度为  $\lambda/80$  (PV,  $\lambda=632.8$  nm)的相移式干涉仪有望获得接近 0.001 mm 的分划板装调精度。使用该平行光管对焦距与之相当的光电成像系统的探测器位置进行标定,标定误差引起待测系统 Nyquist 频率处的 MTF 下降约为 0.013。上述数学分析与验证试验表明,利用这一装调方法,使用与待测系统焦距相当的平行光管,也可满足光电成像系统高精度标定与测试需求。

## 参 考 文 献

- 1 B McComas, R Rifelli, A Barto, *et al.*. Optical verification of the James Webb space telescope [C]. SPIE, 2006, 6271:62710A.
- 2 D Sabatke, S Meyer, N Siegel, *et al.*. Vertically configured collimator for cryogenic, vacuum testing of meter scale optical systems [C]. SPIE, 2007, 6671: 667108.
- 3 Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang, *et al.*. Influence of surface-profile error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (4): 0422002.
- 4 庞志海, 樊学武, 陈钦芳, 等. 大口径反射镜面误差对光学系统像差特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422002.
- 5 P J Lindberg. A collimator with variable focal length and tilted test plate for testing cameras [J]. J Opt Soc Am, 1952, 42(10): 748-751.
- 6 S C West, S H Bailey, J H Burge, *et al.*. Wavefront control of the large optics test and integration site (LOTIS) 6.5 m collimator [J]. Appl Opt, 2010, 49(18): 3522-3537.

- 6 A G Bugaenko, Y P Nikitin, N L Pantelev. Collimators for testing thermal-vision sights [J]. *J Opt Technol*, 2004, 71(2): 90-93.
- 7 A M Tareev. Testing collimators using a nonmisadjustable optical unit and a telescope [J]. *J Opt Technol*, 2000, 67(11): 1014-1017.
- 8 Zhao Man, Jiang Bo, Fan Xiuying, *et al.*. Measurement and analysis on the modulation transfer function of CCD camera [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 071201.  
赵曼, 姜博, 范秀英, 等. CCD相机调制传递函数的测试分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 071201.
- 9 J H Burge, D W Kim. The thermal sieve; a diffractive baffle that provides thermal isolation of a cryogenic optical system from an ambient temperature collimator [C]. *SPIE*, 2012, 8442: 84421L.
- 10 A Krol, M A McGrath, B T Carey, *et al.*. Comparative studies of collimator performance in DaTscan (Ioflupane I-123) striatal SPECT [C]. *SPIE*, 2013, 8672: 867204.
- 11 Zhang Yaoyu, Li Min. A new test method of optical-axis parallelism for three-meter reflex light-tube [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 121205.  
张尧禹, 李岷. 3 m长折转光管光轴平行性检测新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 121205.
- 12 R M Bell, G C Robins, C Eugeni, *et al.*. LOTIS at completion of collimator integration [C]. *SPIE*, 2008, 7017: 70170D.
- 13 S B Hutchison, A Cochrane, S McCord, *et al.*. Updated status and capabilities for the LOTIS 6.5 meter collimator [C]. *SPIE*, 2008, 7106: 710618.
- 14 Zhang Lei, Zhang Lu, Hu Yuan. Research on testing method of wide distance optical axis parallelism [C]. *SPIE*, 2009, 7283: 72833O.
- 15 R O Naess. A measuring interferometer for high accuracy alignment [J]. *Appl Opt*, 1968, 7(11): 2315-2317.
- 16 M E Germain. Alignment of optical delay lines for long-baseline stellar interferometry [J]. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19(1): 81-89.
- 17 K A Goldberg, P Naulleau, J Bokor. Fourier transforms interferometer alignment method [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(8): 4477-4483.
- 18 S C Burkhart, E Bliss, P D Nicola, *et al.*. National ignition facility system alignment [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(4): 1136-1157.
- 19 Han Juan, Duan Jiayou, Chen Jianjun, *et al.*. An alignment of primary and secondary mirrors for optical system in large telescopic [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0716001.  
韩娟, 段嘉友, 陈建军, 等. 大口径望远系统中主次镜系统的装调方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0716001.
- 20 Cao Zhirui, Wu Guodong. Installation method of collimator reticle based on digital interferometer [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2013, 28(16): 4-7.  
曹智睿, 吴国栋. 基于数字干涉仪的平行光管分划板安装方法[J]. *光电技术应用*, 2013, 28(3): 4-7.
- 21 Cao Zhirui, Wu Guodong. The Alignment Procedure for Collimator Reticle According to Interference Principle, Chinese Patent; CN102853992A [P]. [2013-01-02].  
曹智睿, 吴国栋. 一种提高平行光管分划板安装精度的方法, 中国发明专利; CN102853992A [P]. [2013-01-02].
- 22 He Xu, Wu Guodong. The Alignment Procedure for Collimator Reticle According to Interference Principle, Chinese Patent; CN103149013A [P]. [2013-06-12].  
何煦, 吴国栋. 基于平面干涉原理的分划板高精度装调方法, 中国发明专利; CN103149013A [P]. [2013-06-12].
- 23 Danile Malacara. *Optical Shop Testing (3rd Edition)* [M]. Yang Li, Wu Fan Transl. Beijing: China Machine Press, 2012. 4.  
D 马拉卡拉. *光学车间检测(第3版)* [M]. 杨力, 伍凡, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012. 4.
- 24 Wang Lei, Wang Shouyin, Zhou Hu, *et al.*. Basic principles and use method of collimator [J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2006, 27(6): 980-982.  
王磊, 王守印, 周虎, 等. 平行光管的基本原理及使用的方法[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(6): 980-982.

栏目编辑: 何卓铭