

文章编号 1004-924X(2008)09-1673-04

# 极紫外太阳望远镜分辨率的检测

高亮<sup>1,2</sup>, 杨林<sup>1,2</sup>, 王晓光<sup>1</sup>, 尼启良<sup>1</sup>, 陈波<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**极紫外太阳望远镜(EUT)作为高分辨率空间成像仪器,其检测水平的高低直接影响 EUT 成像质量。在完成 EUT 的装调工作之后,对其成像质量进行了检测。具体方法是将分辨率板置于平行光管的焦点处,由可见光照明该分辨率板,透射光经平行光管后成为平行光束并充满待测 EUT 入瞳,再经 EUT 成像在 CCD 相机上,根据所得图像来判断待测望远镜分辨率。实验结果表明,EUT 在可见光波段( $\lambda=570$  nm)的分辨率为  $1.22''$ ,接近此波段的衍射极限( $1.20''$ )。根据可见光检测结果估算出 EUT 工作波段的分辨率可以达到  $0.32''$ ,能够满足设计要求。

**关键词:**极紫外太阳望远镜;角分辨率;分辨率板

**中图分类号:**TH743;P111.41 **文献标识码:**A

## Resolution test of Extreme Ultraviolet Telescope

GAO Liang<sup>1,2</sup>, YANG Lin<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-guang<sup>1</sup>, NI Qi-liang<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** The Extreme Ultraviolet Telescope (EUT), as a high-resolution imaging instrument, its optical performance measurement directly impacts on the image quality, so the imaging performance of aligned EUT is tested in this paper. The measuring method is to place a resolution test-target on the focal point of a collimator and the target is illuminated by a visible light. Then, the visible light is becomeed a parallel light to go through the EUT and image at focal plane on the CCD. By analysis the image, the resolution of the telescope can be obtained. The test results indicate that the angular resolution of the EUT is  $1.22''$  ( $\lambda=570$  nm), which is very close to the resolution limit ( $1.20''$ ). After the computation, it concludes that the operation wavelength resolution is  $0.32''$ , which can meet the requirement for design.

**Key words:** Extreme Ultraviolet(EUV) telescope; angular resolution; resolution test-target

## 1 引言

极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)天文学在揭示太阳活动区物理、耀斑物理、以及日地物理过程等方面有着重要的地位,但由于地球大气对 EUV 波段吸收严重,对太阳的 EUV 波段观测必须在空间进行。目前,在轨飞行的多颗卫星都搭载极紫外太阳望远镜(Extreme Ultraviolet Telescope, EUT),如美国的 TRACE 卫星、欧空局的 SOHO 卫星上的 EIT 及日本的 SOLAR-B 等卫星<sup>[1-3]</sup>。长春光机所自 2003 年起开始 EUT 关键技术研究,现已研制出一台 17.1 nm EUT 样机。该望远镜由两块极紫外波段多层膜反射镜构成的双反射系统,系统焦距为 6 917 mm,设计分辨率为 0.80"<sup>[4-5]</sup>。本文首先利用 ZYGO 干涉仪完成了望远镜系统的装调工作,系统波像差的 P-V 值为 0.152  $\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm),与理论模拟在理想装调情况下的波像差相符合<sup>[6-8]</sup>。下一步需要对 EUT 的成像质量进行检测,考察望远镜的实际分辨率。由于 EUT 工作波段的检测比较困难,所以在进行工作波长检测前,首先要完成 EUT 的可见光波段分辨率的检测工作,为实现 EUT 工作波段的成像性能检测做好前期准备,并获得经验。检测结果表明,EUT 在可见光波段的角分辨率为 1.22",接近衍射极限(1.20"),根据可见光检测结果估算 EUT 工作波段的分辨率,结果表明其分辨率可以达到 0.32",满足设计需要。

## 2 EUT 装调

在对 EUT 进行成像质量检测之前必须先完成对 EUT 系统的装调工作。首先利用 ZYGO 干涉仪对 EUT 多层膜反射镜面形精度进行检测,检测结果为:主镜面形精度 P-V 值 0.131  $\lambda$ ,面形精度 RMS 值 0.011  $\lambda$ ;次镜面形精度 P-V 值 0.079  $\lambda$ ,次镜面形精度 RMS 值 0.007  $\lambda$ ,检测结果如图 1 和 2 所示。然后对望远镜系统进行装调。

具体方法是先将测得的主镜和次镜的 Zernike 系数代到 ZEMAX 光学设计软件中,在理想的装调条件下,计算出望远镜的出瞳波像差;然后在望远镜的装调过程中,通过观察 ZYGO 干

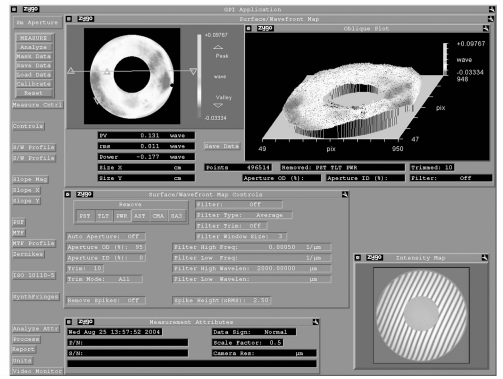


图 1 主镜面形精度实测结果

Fig. 1 Measured wavefront map of primary mirror

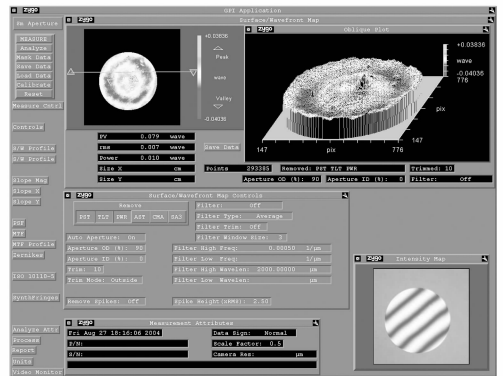


图 2 次镜面形精度实测结果

Fig. 2 Measured wavefront map of secondary mirror

涉仪上的干涉图的变化情况,判断产生失调的误差来源,并且通过调整主镜和次镜间距以及主镜和次镜倾角,获得最佳干涉条纹。装调结果是 EUT 出瞳面形精度为 0.152(P-V 值)与理想装调情况下的波像差 0.166 ( $\lambda=632.8$  nm)基本相符。在上述实验中采用的是美国 ZYGO 公司菲索型干涉仪,该干涉仪的面形检测精度为  $1/100 \lambda$ 。

表 1 EUT 光学参数

Tab. 1 Optical parameters of EUT

项 目	参 数
工作波段	17.1 nm
视 场	8.5' $\times$ 8.5'
角分辨率	0.80"
焦 距	6 917 mm
口 径	126 mm
主镜曲率半径	3 616 mm(凹球面)
次镜曲率半径	1 097 mm(凸球面)
主次镜间距	1 402.6 mm

### 3 原理

EUT 成像质量检测采用“网栅”测分辨率的方法。具体方法是:在平行光管的焦点处放置一块有确定空间频率和线宽的透射网栅作为无穷远目标,由可见光照明该网栅,透射光经平行光管后成为平行光束,平行光束照射并充满待测 EUT 入瞳,再经 EUT 成像,根据所得透射网栅像即可判断待测望远镜分辨率<sup>[9]</sup>。由下面简单的关系式求出待测望远镜的分辨率:

$$\sigma = \frac{f'}{f_{align}} \cdot \sigma_0 \text{ (lp/mm)},$$

式中,  $f'$  和  $f_{align}'$  分别表示待测望远镜和平行光管的焦距。 $\sigma$  和  $\sigma_0$  分别表示望远镜焦面上可分辨最小间距和平行光管焦面上网栅线宽。图 3 和 4 分别为检测装置的光路图和实物图。在实际工作中使用分辨率板代替金属网栅。

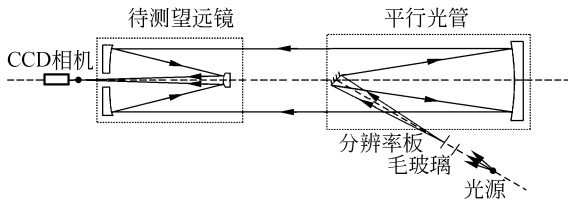


图 3 检测装置光路图

Fig. 3 Optical layout of testing system



图 4 测量装置实物图

Fig. 4 Real testing system

### 4 实验

图 5 为分辨率板图,图 6 为 CCD 接收到的分辨率板图像。利用公式  $l = 2^{K+(N-1)/6}$  可以得到图像

的空间分辨率(单位为 lp/mm),其中,  $K$  为条纹所在组数,  $N$  为条纹号。从图 6 中得出可分辨的条纹为第五组的第四对条纹,根据公式得到:

$$l = 2^{K+(N-1)/6} = 2^{5+(4-1)/6} = 45.25 \text{ (lp/mm)},$$

得出  $\sigma_0 = 22.1 \mu\text{m}$ ,由公式  $\sigma = \frac{f'}{f_{align}} \cdot \sigma_0$ ,得望远镜的分辨率  $\mathcal{R} = 1.22''$ 。而这一波段衍射极限分

$$\mathcal{R}_{\text{Rayleigh}} = \frac{1.22\lambda}{D} \times 206\,265 = \frac{1.22 \times 570 \times 10^{-6}}{120}$$

$\times 206\,265 = 1.20''$ ,二者相吻合。

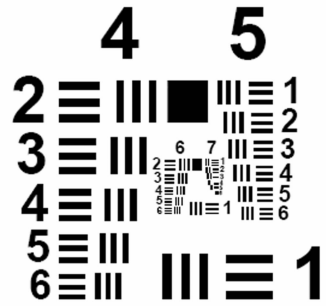


图 5 分辨率板

Fig. 5 Resolution test-target

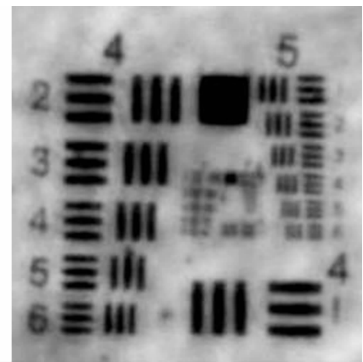


图 6 CCD 接收到的分辨率板图像

Fig. 6 Image of resolution test-target received by CCD

### 5 EUT 工作波长分辨率估计

根据文献[10],一个光学系统的实际分辨率由瑞利判据分辨率与分辨率误差组成,公式如下<sup>[10]</sup>:

$$\mathcal{R}_m^2(r, \lambda) = \mathcal{R}_{\text{Rayleigh}}^2(r, \lambda) + \epsilon_\theta^2(r, \lambda), \quad (1)$$

其中,  $\mathcal{R}_m(r, \lambda)$  代表波长为  $\lambda$ 、视场半径为  $r$  时的实际分辨率,  $\mathcal{R}_{\text{Rayleigh}}(r, \lambda)$  为此波段的衍射极限分辨率,  $\epsilon_\theta(r, \lambda)$  为分辨率误差,由下式决定:

$$\varepsilon_{\theta}(r, \lambda) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_{\theta_i}^2(r, \lambda)} = \sqrt{\delta_{\theta_1}^2(r, \lambda) + \delta_{\theta_2}^2(r, \lambda) + \dots + \delta_{\theta_n}^2(r, \lambda)}, \quad (2)$$

其中,  $\delta_{\theta_i}(r, \lambda)$  为几何像差, 装调误差, 电子噪声, 环境影响等产生的互不相关的分辨率误差。

设  $\sigma_{\text{jitter}}$  为卫星指向精度误差,  $\sigma_{\text{surface}}$  为光学原件表面粗糙度引起的误差, 因为  $\varepsilon_{\theta}(r, \lambda_{\text{EUV}}) \leq \varepsilon_{\theta}(r, \lambda_{\text{visible}})$ , 则有 EUT 工作波长分辨率为:

$$\mathcal{R}_{\text{telescope}}(r, \lambda_{\text{EUV}}) \leq \sqrt{\mathcal{R}_{\text{Rayleigh}}^2(r, \lambda_{\text{EUV}}) + \varepsilon_{\theta}^2(r, \lambda_{\text{visible}}) + \sigma_{\text{jitter}}^2 + \sigma_{\text{surface}}^2} \leq \mathcal{R}_m(r, \lambda_{\text{visible}}), \quad (3)$$

由式(1)得到:

$$\varepsilon_{\theta}^2(r, \lambda_{\text{visible}}) = \mathcal{R}_m^2(r, \lambda_{\text{visible}}) - \mathcal{R}_{\text{Rayleigh}}^2(r, \lambda_{\text{visible}}), \quad (4)$$

而  $\mathcal{R}_{\text{Rayleigh}}(r, \lambda_{\text{visible}}) = 1.20''$ ,  $\mathcal{R}_m(r, \lambda_{\text{visible}}) = 1.22''$ ,

$\mathcal{R}_{\text{Rayleigh}}(r, \lambda_{\text{EUV}}) = 0.036''$ ,  $\sigma_{\text{jitter}} \approx 0.1''$ ,  $\sigma_{\text{surface}} \approx$

$0.21''^{[11]}$ 。据此, 估算出 EUT 工作波段的分辨率为:  $\mathcal{R}_{\text{telescope}}(r, \lambda_{\text{EUV}}) \leq \sqrt{0.036^2 + (1.22^2 - 1.20^2) + 0.1^2 + 0.21^2} = 0.32''$ 。

## 5 结 论

利用可见光完成了 EUT 的分辨率检测, 结果表明 EUT 在此波段的分辨率为  $1.22''$ , 接近衍射极限( $1.20''$ ), 验证了望远镜的装调水平和成像质量。合理估算了 EUT 的工作波段分辨率, 结果表明其分辨率可以达到  $0.32''$ , 满足设计需要。下一步工作是进行 EUT 的工作波长检测工作, 即在地面考察 EUT 在  $17.1 \text{ nm}$  的分辨率水平, 为望远镜最后升空做准备。

## 参考文献:

- [1] DOMINGO V. Soho, Yohkoh, Ulysses and trace; the four solar missions in perspective and available resources [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2002, 282: 171-188.
- [2] HANDY B N, ACTON L W, KANKELBORG C C, *et al.*. The transition region and coronal explorer [J]. *Solar Physics*, 1999, 187: 229-260.
- [3] DEFISE J M, MOSES J D, CATURA R C, *et al.*. Calibration of EIT instrument for the SOHO mission [J]. *SPIE*, 1995, 2517: 29-39.
- [4] 陈波, 尼启良, 曹继红, 等. 空间软 X 射线/极紫外波段正入射望远镜研究 [J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(4): 315-319. CHEN B, NI Q L, CAO J H, *et al.*. Development of a space soft X-ray and EUV normal incidence telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(4): 315-319. (in Chinese)
- [5] CHEN B, NI Q L, WANG J L. Soft X-ray and extreme ultraviolet optics in CIOMP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1862-1868.
- [6] COLLETTE J P, STOCKMAN Y, TOCK J P, *et al.*. Performance of the XMM optical vertical test facility [J]. *SPIE*, 1996, 2808: 350-361.
- [7] BRAEUNINGER H, BURKERT W, HARTNER G D, *et al.*. Calibration of hard X-ray (15~50 keV) optics at the MPE test facility PANTER [J]. *SPIE*, 2004, 5168: 283-293.
- [8] KIM E D, CHIO Y W, KNAG M S, *et al.*. Lessons learned from the optics and focal plane alignment of a wide field of view RC telescope [J]. *SPIE*, 2005, 5877: 1.
- [9] 巩岩. 极紫外太阳望远镜成像检测系统设计 [J]. *光学 精密工程*. 2006, 14(6): 969-973. GONG Y. Testing system for performance of EUV solar telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 969-973. (in Chinese)
- [10] GORE D B, HADAWAY J B, HOOVER R B, *et al.*. Optical focusing and alignment of the multi-spectral solar telescope array II payload [J]. *SPIE*, 1995, 2515: 532-542.
- [11] 陈波. 空间极紫外望远镜光学性能研究 [D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2003. CHEN B. *The optical characteristic studies of space EUV solar telescope* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2003.

作者简介: 高亮 (1980-), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 主要研究方向为极紫外-软 X 射线光学仪器的装调与检测。E-mail: gao\_lianger@126.com

导师简介: 陈波 (1961-), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 主要从事软 X 射线-真空紫外波段光源、探测器、辐射计量及空间光学仪器的研究。E-mail: bochen2000@yahoo.com.cn