

文章编号 1004-924X(2007)11-1644-05

极紫外望远镜角分辨率评价方法

陈波¹,高亮^{1,2},阚珊珊¹,尼启良¹,王晓光¹

(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:极紫外望远镜工作波段与可见光波段相差近两个数量级,其工作波段的衍射极限很低,达到 $0.036''$,使该波段望远镜角分辨率的检测很困难。本文介绍了一种极紫外望远镜角分辨率的评价方法。该方法利用通用可见光波段面形检测仪器,检测出极紫外望远镜光学元件面形误差和装调误差,将检测到的与波长无关的 Zernike 系数代入光学设计程序,计算出极紫外望远镜工作波段的点扩散函数和环绕能分布,进而计算出望远镜在极紫外波段的角分辨率。实验结果表明,极紫外望远镜的角分辨率可以达到 $0.18''$ 。该方法是一种快捷、有效的极紫外波段成像仪器的评价方法。

关键词:极紫外望远镜;角分辨率;点扩散函数;环绕能

中图分类号:TH743 文献标识码:A

Evaluation method of angular resolution for extreme ultraviolet telescope

CHEN Bo¹,GAO Liang^{1,2},KAN Shan-shan¹,NI Qi-liang¹,WANG Xiao-guang¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate school of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The Extreme Ultraviolet Telescope(EUT)'s operational wavelength band is smaller nearly two levels than that of the visible light and its in-band diffraction limit is very low,so it is very difficulty to measure a angular resolution in extreme ultraviolet band. In this paper a new evaluation method using ZYGO interferometer to test the figure error and alignment error of the EUT in visible light is introduced. Then, the Zernike coefficients independent of the operational wavelength are brought into the optical design software, so that the point spread function and diffraction encircled energy in operational wavelengths can be obtained by the optical software. Finally, the angular resolution of the EUT in extreme ultraviolet band is calculated by the relative parameters. Experimental results show that the evaluation method has the advantage of high speed and efficiency for an imaging apparatus in extreme ultraviolet band.

Key words: Extreme Ultraviolet Telescope(EUT); angular resolution; point spread function; encircled energy

收稿日期:2007-06-08;修订日期:2007-08-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60223003);中科院知识创新工程方向性项目

1 引 言

极紫外望远镜(EUT)作为高分辨率空间成像仪器,其检测水平直接影响 EUT 的成像质量。目前,国际上对软 X 射线-极紫外波段望远镜的检测和评价主要有两种方法:一种是采用工作波长检测,这种检测方法主要应用于较低角分辨率的掠入射望远镜,已经建成的掠入射望远镜工作波段检测装置有比利时 CSL(Center Spatial de Liege)的极紫外/X 射线检测装置以及德国马普学会和日本空间天文研究所^[1-2]建成的检测装置等,这些检测装置的检测分辨率均较低。另一种是间接检测,即用菲索型干涉仪或点衍射干涉仪等面形检测仪器检测光学元件的面形精度,再根据望远镜光学元件的面形误差和装调误差计算出望远镜工作波段的点扩散函数,据此判断望远镜的角分辨率^[3-4]。目前,较高分辨率的极紫外望远镜均采用此方法进行检测,如,the Solar and Heliospheric Observatory(SOHO)上的 Extreme Ultraviolet Imaging Telescope(EIT)^[5]。EIT 检测过程中,首先,利用 ZYGO 干涉仪检测光学元件和系统的波像差,根据检测到的光学元件面形精度值计算出 EIT 工作波段的点扩散函数。计算结果表明:在弥散斑直径 15 μm 范围内包含了 80% 的能量。EIT 的焦距为 1 652 mm,由这些参数计算出的几何像差弥散产生的角分辨率降低为 1.96"。

自 2003 年起,本课题组开始了 EUT 技术研究,突破了关键技术,研制了相应的加工和检测装置,集成出一台 17.1 nm 的 EUT 样机。为了对所研制的 EUT 样机进行角分辨率评价,本文采用了间接检测方法对 EUT 进行检测。

2 EUT 检测方法

本课题组所研制的 EUT 由两块极紫外波段多层膜反射镜构成的双反射系统组成,具体参数见表 1^[6]。

EUT 工作波段衍射极限为 0.036",远小于 EUT 的分辨率 0.80",因此,在 EUT 研制和检测中可以忽略衍射对 EUT 的影响,EUT 像差的主要来源为几何像差和散射像差。散射像差由光学元件表面粗糙度产生,它们与表面粗糙度大小以及粗糙度的频率范围密切相关,针对 17.1 nm 的 EUT,频率为 1~200 lp/mm 的中频粗糙度影响最严重。但在表面粗糙度 RMS 值 <0.7 nm 时,粗糙度对 EUT 的影响较小,通常小于几何像差的影响,因此本文不详细介绍表面粗糙度对 EUT 角分辨率的影响。

本文介绍的极紫外望远镜的像差主要包含光学设计残差、光学元件加工误差产生的像差和装调误差产生的像差。检测方案为:首先,利用 ZYGO 干涉仪检测 EUT 中的两块反射镜的面形精度,并且记录下它们的 36 项 Zernike 系数,该系数与波长无关,只反映光学元件的面形精度。其次,在 ZYGO 干涉仪的监控下装调 EUT 达到设计要求。根据 EUT 中的光学元件的面形误差、装调误差和光学设计残差计算出 EUT 的系统点扩散函数。最后,根据计算出的点扩散函数以及 EUT 的焦距得到 EUT 的分辨率。

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'×8.5'
角分辨率	0.80"
焦 距	7 810 mm
口 径	120 mm
主镜曲率半径	4 983 mm(凹球面)
次镜曲率半径	1 975 mm(凸球面)
主次镜间距	1 819 mm

3 EUT 点扩散函数计算

3.1 光学元件检测

为了对 EUT 进行间接检测,首先需要对其所用的多层膜反射镜的面形精度进行检测。本项研究采用美国 ZYGO 公司菲索型干涉仪,该

干涉仪的面形检测精度为 $\lambda/100$, 如果采用绝对式检测方法, 检测精度可达 $\lambda/200$ 。

利用 ZYGO 干涉仪对 EUT 多层膜反射镜检测结果为: 主镜面形精度 P-V 值为 0.131λ , 面形精度 RMS 值为 0.011λ 。次镜面形精度 P-V 值为 0.079λ , 次镜面形精度 RMS 值为 0.007λ 。检测结果如图 1 和 2, 36 项 Zernike 系数见表 2 和 3。

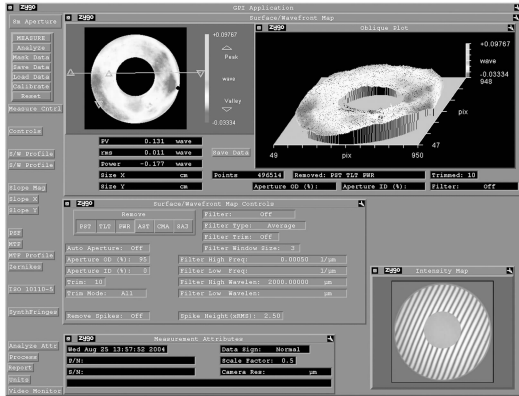


图 1 主镜面形实测结果

Fig. 1 Measured wavefront map of primary mirror

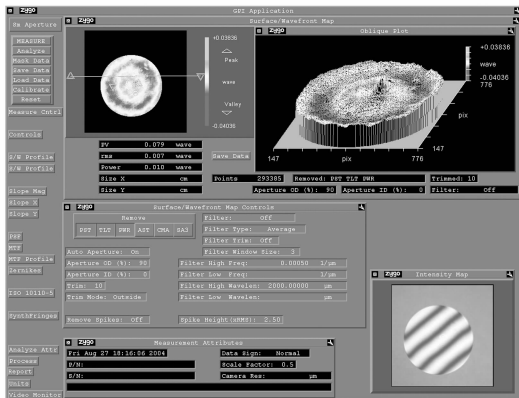


图 2 次镜面形实测结果

Fig. 2 Measured wavefront map of secondary mirror

表 2 主镜 Zernike 系数

Tab. 2 Zernike coefficients of primary mirror

ZYGO		Zernike Polynomials	
Zernike Coefficients from 540543 data points			
Order:	10th Terms:	36 rms:	0.00252
-1.45274	-0.18678	1.68921	-0.08531
0.04522	0.00937	0.01023	-0.00766
-0.00328	-0.00659	-0.00346	0.00255
0.00007	0.00021	0.00531	-0.00420
0.00264	-0.00431	-0.00123	-0.00024
Order:	8th Terms:	25 rms:	0.00322
-1.45687	-0.18680	1.68841	-0.07759
0.04510	0.00958	0.01022	-0.00556
-0.00318	-0.00635	-0.00412	0.00298
0.00037	0.00224	0.00345	-0.00457
Order:	6th Terms:	16 rms:	0.00135
-1.46046	-0.18680	1.68808	-0.06485
0.04522	0.00959	0.00980	-0.00348
-0.00373	-0.00691	-0.00426	0.00286
Order:	4th Terms:	9 rms:	0.00135
-1.45043	-0.18593	1.69055	-0.09492
0.04546	0.00865	0.00912	-0.00817
Order:	Sphere Terms:	4 rms:	0.02470
-1.45575	-0.18623	1.69029	-0.08393
Center X:	491	Center Y:	491
Radius:	461.4		

表 3 次镜 Zernike 系数

Tab. 3 Zernike coefficients of secondary mirror

ZYGO		Zernike Polynomials	
Zernike Coefficients from 363819 data points			
Order:	10th Terms:	36 rms:	0.00295
-0.68302	-0.65543	0.79270	-0.07045
0.00066	-0.00451	0.00053	-0.00554
0.00532	0.00041	0.00187	-0.00160
-0.00007	-0.00145	-0.00031	0.00026
-0.00056	-0.00001	-0.00022	0.00027
Order:	8th Terms:	25 rms:	0.00303
-0.68301	-0.65538	0.79276	-0.00706
0.00069	-0.00448	0.00062	-0.08542
0.00529	0.00041	0.00192	0.00163
-0.00007	-0.00145	-0.00035	0.00026
Order:	6th Terms:	16 rms:	0.00432
-0.68284	-0.65532	0.79297	-0.00758
0.00078	-0.00444	0.00074	-0.00503
0.00535	0.00045	0.00206	0.00171
Order:	4th Terms:	9 rms:	0.00660
-0.68261	-0.65531	0.79331	0.00825
0.00061	-0.00438	0.00074	-0.00437
Order:	Sphere Terms:	4 rms:	0.00785
-0.68272	-0.65531	0.79332	0.00791
Center X:	461	Center Y:	461
Radius:	343.2		

3.2 EUT 装调

在望远镜装调过程中, 首先利用每个反射镜的面形精度检测结果计算出望远镜在理想装调状态下的波像差, 将该波像差与 ZYGO 测出的 EUT 波像差比较, 判断装调水平。本文对 EUT 的装调是在 ZYGO 干涉仪的监控下进行的, 以便随时检测到望远镜装调中所产生的误差以及误差的来源, 进而最大限度地消除产生误差的来源, 达到最佳装调结果。具体装调步骤如下:

首先, 在理想装调条件下, 将测得的 EUT 主镜和次镜的 Zernike 系数代入 ZEMAX 光学设计程序中^[7-8], 计算出望远镜的出瞳波像差, 计算结果如图 3 所示, 出瞳面形精度为 0.166λ (P-V 值)。

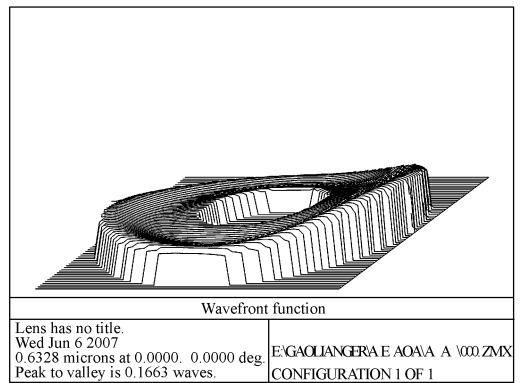


图 3 采用实际的主次镜在理想装调情况下的 ZEMAX 光线追迹

Fig. 3 Wavefront map by ray tracing of ZEMAX using Zernike coefficients of mirrors

其次, 在望远镜的装调过程中, 通过观察 ZYGO 干涉仪上干涉图的变化, 判断产生失调的误差来源, 并且通过调整主镜和次镜间距, 调整主镜和次镜倾角, 获得最佳干涉条纹, 装调结束。

最后,采集装调后 EUT 出瞳面上的干涉条纹,结果如图 4 所示,EUT 出瞳面形精度为 0.152λ (P-V 值)。实际测量结果比理想装调情况下的波像差好 0.014λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),这可能是主次镜之间像差补偿作用的结果。

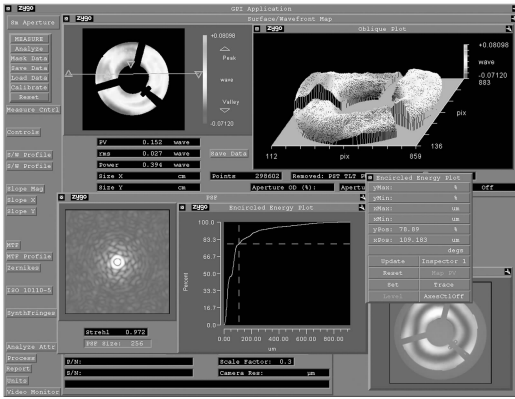


图 4 望远镜装调后实测结果

Fig. 4 Final alignment result of EUT

4 EUT 工作波段角分辨率计算

利用 ZYGO 干涉仪检测 EUT 中的两块反射镜的面形精度,并记录下它们的 36 项 Zernike 系数,该系数与波长无关,只反映光学元件的面形精度。在 ZYGO 干涉仪的监控下完成 EUT 装调后,将用 ZYGO 干涉仪实测的 EUT 主镜和次镜的 Zernike 系数代入 ZEMAX 光学设计程序中,计算出 EUT 在 17.1 nm 的点扩散函数和环绕能分布如图 5、6 所示。

EUT 的角分辨率由下式得到:

$$\delta = \frac{D}{f} \times 206\ 265, \quad (1)$$

其中, δ 为 EUT 的角分辨率, D 为包含 80% 弥散斑能量直径, f 为望远镜的焦距。从图 6 可以得到包含 80% 弥散斑能量直径 $D = 7 \mu\text{m}$,EUT 的焦距为 7 810 mm,将两者的值带入式(1),可得:

$$\delta = \frac{7 \times 10^{-3}}{7\ 810} \times 206\ 265 \approx 0.18'',$$

因此,EUT 几何像差产生的弥散斑的角直径为 $0.18''$,即用 17.1 nm 波长检测 EUT,其角分辨率可以达到 $0.18''$ 。

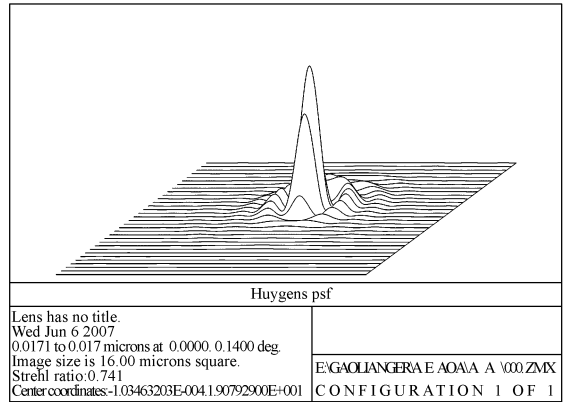


图 5 17.1 nm 点扩散函数

Fig. 5 Point spread function at 17.1 nm

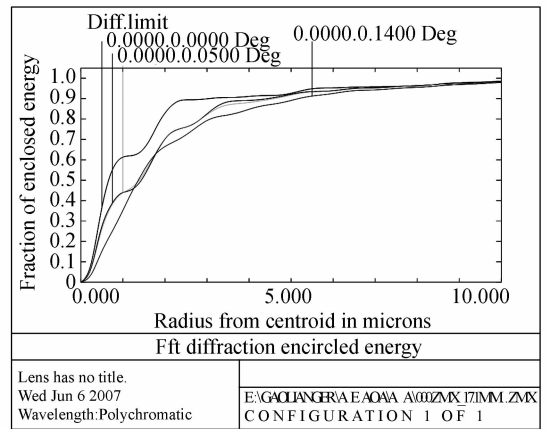


图 6 17.1 nm 环绕能分布

Fig. 6 Diffraction encircled energy at 17.1 nm

5 结 论

本文介绍了一种极紫外望远镜角分辨率评价方法,利用通用的可见光波段面形检测仪器实现对极紫外波段空间太阳望远镜角分辨率的性能检测和评价。实验结果表明:EUT 几何像差产生的弥散斑的角直径为 $0.18''$,即 EUT 在 17.1 nm 处角分辨率可以达到 $0.18''$ 。该方法是一种快捷、有效的极紫外波段成像仪器的评价方法,在极紫外波段成像仪器研制中将发挥重要作用。

6 致 谢

本文研究工作得到了孙强副研究员和马月英高级工程师的大力支持,在此对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] COLLETTE J P, STOCKMAN Y, TOCK J P, *et al.*. Performance of the XMM optical vertical test facility[J]. *SPIE*, 1996, 2808: 350-361.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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: 58770C-1.
- [5] DEFISE J M, MOSES J D, CATURA R C. Calibration of EIT instrument for the SOHO mission[J]. *SPIE*, 1995, 2517: 29-39.
- [6] 陈波, 尼启良, 曹继红. 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. Development of a space soft X-ray and EUV normal incidence telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(4): 315-319. (in Chinese)
- [7] MAHAJAN V N. Zernike polynomials aberration balancing[J]. *SPIE*, 2003, 5173: 1-17.
- [8] Focus Software Incorporated. ZEMAX optical design program user's guide, version 9.0[M]. Tucson: Focus Software Incorporated, 2000.

作者简介: 陈波(1961—), 男, 吉林长春人, 博士, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员, 长期从事短波光学研究。主要研究领域为软 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。E-mail: bochen2000@yahoo.com.cn