

文章编号 1004-924X(2016)05-1036-06

极紫外波段空间相机的辐射定标

何玲平*, 陈波, 张宏吉, 刘世界, 王晓光

(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: 考虑极紫外波段空间相机尚无合适的辐射定标方法和装置, 本文提出了适用于该波段的小目标成像辐射定标方法并基于该方法在实验室建立了辐射定标装置。提出的标定方法首先使用标准传递探测器标定小目标的辐射亮度; 然后, 用待定标相机中心视场对该小目标成像, 获得中心视场部分的辐射强度响应度; 最后, 通过调整转动结构使不同视场对该小目标成像, 得到不同区域的辐射强度响应度。构建的辐射定标装置由光源系统、标准传递探测器、真空罐及四维运动转台等组成。光源系统包括空心阴极光源、极紫外掠入射单色仪、准直反射镜, 能够出射工作波段的准直光束; 标准传递探测器标定出光束照度并计算得到小目标的辐射强度; 运动平台使相机能够以不同视场角对小目标成像, 测得不同视场的辐射强度响应度。利用该装置对一台极紫外相机进行了辐射定标实验, 并进行了误差源分析。实验结果表明该装置的定标精度优于15%, 能够实现整机状态下的辐射定标。

关键词: 空间相机; 辐射定标; 小目标成像; 标准传递探测器; 极紫外波段

中图分类号: TP731; V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162405.1036

Radiation calibration of EUV space cameras

HE Ling-ping*, CHEN Bo, ZHANG Hong-ji, LIU Shi-jie, WANG Xiao-guang

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

* Corresponding author, E-mail: hlp200201@163.com

Abstract: There are no proper radiation calibration methods and devices for EUV space cameras, so this paper proposes a small target imaging radiation calibration method suitable for the EUV band and establishes a radiation calibration device based on the method in a lab. This method uses a standard transfer detector to calibrate the radiance of the small target. Then, a EUV space camera is used to take the small target's image in its center Field of View(FOV) and to get its radiance responsivity. Finally, by adjusting the motion platform, the small target's images in different FOVs are taken by the EUV camera, and the radiance responsivity in different FOVs are obtained. The developed radiation calibration device consists of a light source system, standard transfer detectors, a vacuum tank and a four-dimensional motion platform fixed in the camera. The light source system consists of a hollow cathode light source, an extreme ultraviolet grazing incidence monochromator, and a collimating mirror generating a parallel monochromatic beam. The standard transfer detectors are used to calibrate the beam's photon flux and small target's radiance and the motion platform enables the camera to take the small target's images in different FOVs and to get camera's responsivity in different FOVs. A EUV camera has been calibrated by this device, and the error sources are analyzed. The

收稿日期: 2015-03-25; 修订日期: 2015-05-25.

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新基金资助项目(No. Y3CX1SS145)

calibration results indicate that its accuracy is better than 15% and implements the radiation calibration for whole bands.

Key words: space camera; radiation calibration; small target imaging; standard transfer detector; extreme ultraviolet band

1 引言

随着空间探测技术的发展,人类在对地观测、天文探测等方面的需求越来越多,卫星平台上搭载的空间成像仪器层出不穷。由于摆脱了大气的吸收作用,空间相机的观测波长范围从可见、紫外波段延伸到了极紫外、软 X 射线波段。包括太阳在内的众多恒星产生了大量的极紫外波段辐射,所以极紫外波段空间相机成为天体目标观测、日-地空间环境监控以及空间天气预报的重要工具。欧、美、日等在过去几十年里发射了大量搭载极紫外波段空间相机的卫星,如 SOHO、TRACE、PLANAT-A、PLANAT-B、SDO、GEOS 系列、PRABA 系列卫星、STEREO 系列卫星等,用于监测太阳等天体活动对地球空间环境变化的影响。我国在嫦娥 3 号搭载了国内首台极紫外波段空间相机^[1-5],通过月基观测和监控地球等离子体层的变化来监测地球的空间环境。

空间相机辐射定标能够建立所获取数据与探测目标辐射强度之间的关系,所以是空间遥感图像数据量化测量的关键。常见的辐射定标方法主要有漫反射板辐射定标、积分球辐射定标以及自然目标辐射定标(晨昏时刻均匀照明的天空、太阳、月球等)。这些辐射定标方法都是在大气下进行的,而极紫外波段相机必须在真空下成像,且该波段缺乏漫反射材料,没有漫反射板、积分球等朗伯特特性均匀目标进行辐射定标,因此需要根据此波段特点研制适合该波段使用的辐射定标方法及装置^[9-11]。在国外,该波段辐射定标多采用部件级别的方法,分别测量光路中各光学元器件的效率,然后计算得到整体的响应度,以及对目标的辐射强度响应关系;但是,由于不是整机状态下的定标结果,可能存在误差^[12]。目前,国内缺乏极紫外波段整机辐射定标装置,仅在长春光机所及合肥中科大同步辐射实验室等少数地方能够进行光学元件的性能测量^[13-14]。本文提出了一种基于小目标成像的极紫外空间相机辐射定标方法,并

建立地面定标装置,能够实现整机状态下相机的辐射定标。

2 小目标成像辐射定标原理

地面辐射定标是发射前的主要辐射定标手段,是大多数空间相机必须进行的一项工作。目前,国内空间相机的主要工作波段集中在紫外、可见、红外波段。常用的辐射定标方法主要是根据波段、定标精度等因素选择不同的漫反射板、积分球光源、黑体等均匀性和朗伯特特性满足要求的扩展光源,近距离离焦成像获得覆盖全像面的辐射响应定标图像。定标时要求光源目标满足全视场覆盖的要求,同时出射光束完全覆盖相机的入瞳面积,且要求目标的辐射发散角度大于视场角。定标时,使用标准灯或者标准探测器标定扩展辐射源的辐射亮度,其原理示意图如图 1 所示。但是,基于积分球光源等扩展源的辐射定标方法只能在大气试验条件下进行,远紫外、极紫外等短波段辐射不能够在大气下传播,现有技术条件下的镀膜材料在短波光学波段的反射率极低,无法研制出极紫外波段的积分球或漫反射板。因此,极紫外波段光学相机无法采用扩展光源近距离成像的方法进行辐射定标。

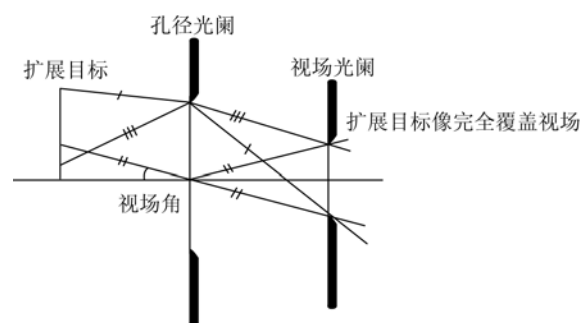


图 1 扩展目标近距离辐射定标

Fig. 1 Configuration of radiation calibration of near extended source

为了实现极紫外波段空间相机整机状态下的辐射响应定标,本文采用小目标远距离成像方法

进行极紫外波段的辐射定标,其定标原理如图 2 所示。成像小目标与相机入瞳要求相隔一定距离,不要求模拟无限远,但要求小目标像在视场光阑范围内。为了减少小目标照明均匀性的影响,只使用小目标像中心区域的响应度测量数据,通过转动机构使得小目标中心区域成像在像面不同区域,得到整个像面的响应度数据。该辐射定标方法具有易于实现、在焦成像、适合极紫外波段使用等优点,但也有视场覆盖不全面,试验条件难于满足(距离要求)及测量精度不高等缺点。实际试验时一般要求目标与相机距离不少于焦距的 10 倍,这将导致测量系统体积过于庞大,且测试信噪比容易受背景杂光的影响。

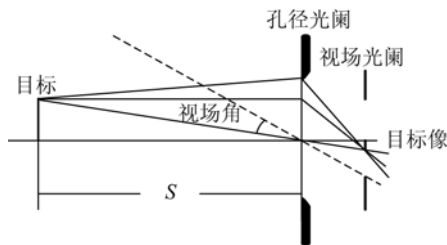


图 2 小目标远距离辐射定标

Fig. 2 Configuration of radiation calibration of distant small source

为了克服其缺点,本文改进了该方法,在定标系统中引入一块准直抛物反射镜,并将成像小目标置于该反射镜的焦平面上,原理如图 3 所示。改进方法具有以下优点:(1)目标像尺寸由准直反射镜焦距、相机系统焦距及目标尺寸决定,反射镜与相机距离可以很近,便于真空条件下实施;(2)杂散光便于控制;(3)目标像尺寸易于调节,不再受距离限制;(4)目标辐射能量更集中,提高测量结果的信噪比。因此,该方法尤其适合应用于极紫外等短波段光学相机的辐射定标。

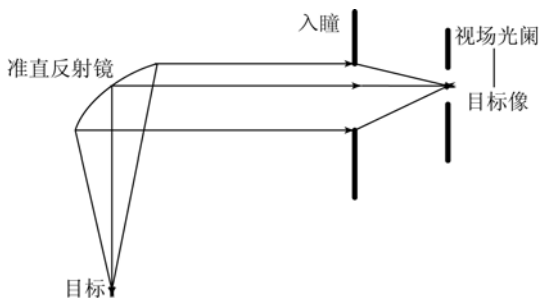


图 3 改进的小目标辐射定标示意图

Fig. 3 Improved distant small source radiation calibration

首先,使用标准传递探测器测量准直光束的照度 E ,得到:

$$E = \frac{V}{\Omega \cdot R_d \cdot e \cdot A}, \quad (1)$$

式中: V 为标准探测器的输出信号, Ω 为探测器反馈电阻, R_d 为标准传递探测器的响应度, e 为探测光子能量, A 为标准传递探测器面积。由照度、小目标尺寸 d 及准直反射镜焦距 f 可以计算小目标的辐射亮度 L :

$$L = E / \left(\frac{d}{f} \right)^2 = \frac{E \cdot f^2}{d^2}. \quad (2)$$

空间天文学常用 Rayleigh 作为辐射亮度单位,即:

$$1 \text{ Rayleigh} = \frac{10^6}{4\pi} \text{ photons}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}).$$

因此式(2)可以改写为:

$$L = \frac{4\pi \cdot E \cdot f^2}{d^2 \cdot 10^6} \text{ Rayleigh}. \quad (3)$$

待定标空间相机对目标进行成像,采集目标图像,读取单位时间内小目标像的像元灰度值 S ,即可计算相机图像中像元灰度 S 与目标辐射亮度 L 的关系,有:

$$R_t = \frac{S}{L}. \quad (4)$$

3 地面定标装置建立

根据上述原理,本课题组研制了一套极紫外波段空间相机的辐射定标装置,如图 4 所示。该装置包括光源系统、运动机构、标准传递探测器及真空系统。

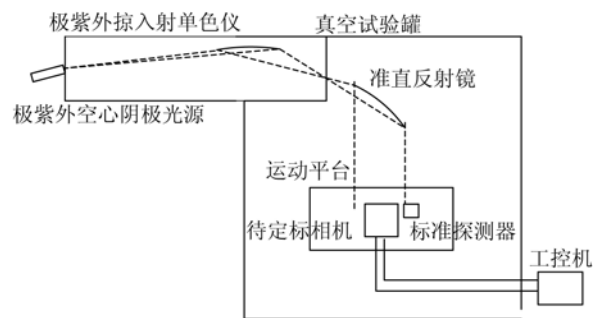


图 4 极紫外成像系统辐射定标装置

Fig. 4 Devices for EUV camera radiation calibration

3.1 光源系统

光源系统包括极紫外空心阴极放电光源、极紫外掠入射单色仪及准直反射镜。空心阴极光源是一种辉光放电光源,能够出射较高强度线光谱,真空条件下使用标准探测器对光源强度的稳定性进行了测试,结果如表1所示。由表可知光源工作45 min后的稳定性优于5%。

表1 光源稳定性(电压400 V,电流500 mA)

Tab.1 Stability of light source (V=400 V, I=500 mA)

时间/min	信号/mV	时间/min	信号/mV
0	164.6	120	179.2
10	182.1	150	173.6
20	193.4	180	175.1
35	185.6	210	171.6
45	178.2	240	174.1
60	173.5	270	175.8
90	174.8	300	176.7

该光源采用紧凑的无窗两级差分泵浦系统,一级由气嘴导入高纯度稀有气体,气体在阴极的高压下发生辉光放电,一级保持较好的真空度且与单色仪的真空室相连。紫外单色仪是罗兰圆掠入射单色仪,光谱分辨能力覆盖5~250 nm。工作时,空心阴极光源固定在单色仪入射狭缝法兰上,在运动机构驱动下沿罗兰圆轨道移动,在单色仪出射狭缝处出射指向不变的不同波长的单色光束。通过更换不同种类的高纯稀有气体,空心阴极光源能够提供多条可用于相机定标的高亮度高稳定性的极紫外波段线光谱,主要光谱及对应稀有气体如表2所示。准直反射镜为一块准直抛物反射镜,焦距为200 mm。单色仪出射狭缝位于准直抛物反射镜的焦平面位置,作为辐射定标成像小目标,狭缝宽度在0.1~3 mm调节,长度在0.1~10 mm调节。

3.2 运动机构

该定标装置包含一个四维运动平台,能够进行水平、垂直平动和方位、俯仰转动,标准探测器和待定标空间相机都安装于此平台上。通过平动使得标准探测器对准光束,标定光束在相机入瞳处的光照度,然后计算目标的辐射亮度。空间相机通过此平台,能够以不同的视场角对光束成像,并标定出像面中心的亮度响应度。

表2 稀有气体与产生谱线

Tab.2 Noble gases and its spectra

波长/nm	气体	波长/nm	气体
16.95	ArIII	76.92	ArIII
21.26	NeIV	88.41	KrII
26.71	NeIII	91.98	ArII
30.11	NeIII	96.50	KrII
30.38	HeII	104.82	ArII
44.50	NeIII	110.04	XeII
58.43	HeI	123.58	KrI
71.81	ArIII	146.96	XeI
73.59	NeI		

3.3 标准传递探测器

该装置使用美国NIST标定的AXUV100G二极管作为标准传递探测器,能够在5~250 nm以较高精度标定光束强度。配合高灵敏度的静电计电路,该二极管能够测量fA级别的光电信号。AXUV100G响应稳定性较好,适合作为标准传递探测器。图5为该标准探测器波长响应度的标定曲线。

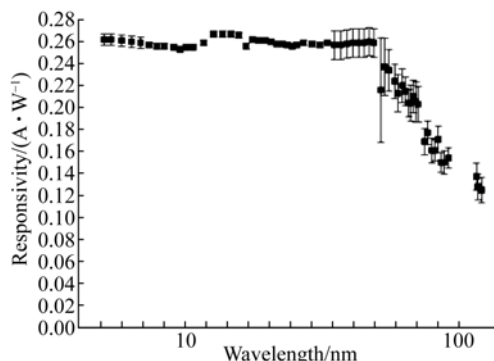


图5 AXUV100G 响应度曲线

Fig.5 Responsivity curve of AXUV100G

4 极紫外空间相机定标试验

本文利用建立的地面辐射定标装置,对一台极紫外空间相机样机进行了定标试验。该相机是工作波段为30.4 nm的单反射镜系统,像元分辨率为 0.1° ,入瞳面积A为 80 cm^2 ,焦距为150 mm,采用微通道板光子计数探测器作为像接收器。定标时,单色仪狭缝为 $2.5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,对相机张角立体角为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ sr}$ 。标定内容主要分为两部分:

(1) 光束照度、目标辐射亮度标定。根据待定标极紫外相机的工作波段, 选择能够产生对应 30.4 nm 线光谱的高纯氦气作为放电气体。抽真空前准确连接光源、单色仪、真空室, 调节好反射镜指向。打开光源电源, 调整工作电流至工作值。调整运动平台, 使得 AXUV100G 正对平行光束。读取信号幅值, 利用式(1)~式(3)计算光束的光通量、照度 (AXUV100G 面积为 1 cm^2) 和狭缝亮度。标定结果如表 3 所示。

表 3 目标辐射特性测试结果

Tab. 3 Test results of light beam's flux and irradiance

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均
V/mV	2.41	2.23	2.32	2.33
$\Phi/(10^5 \text{ photon} \cdot \text{s}^{-1})$	1.45	1.33	1.39	1.39
$E/(10^5 \text{ photon} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1.45	1.33	1.39	1.39
L/Rayleigh	7 288.5	6 685.3	6 986.9	6 986.9

(2) 待定标相机采集单色仪出射狭缝目标图像。驱动运动平台, 使得相机入瞳正对平行光束, 拍摄单色仪出射狭缝的目标图像, 此时单色仪出射狭缝在相机像面中心成像, 读取目标像元灰度, 利用表 3 数据和式(4)可计算相机的辐射亮度响应度。调整相机视场角, 使得狭缝成像在相机焦平面不同的视场位置, 得到像面上不同视场的辐射亮度响应度, 测试结果如表 4 所示。将不同视场的狭缝像叠加在一幅图像中, 如图 6 所示。

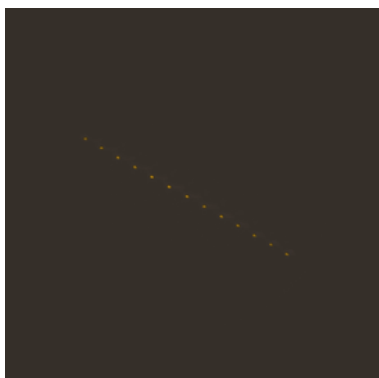


图 6 目标在不同视场成像的叠加图

Fig. 6 Composition of different field images of same object

表 4 不同视场探测灵敏度

Tab. 4 Sensitivities with different field of views

视场/(°)	像元灰度	亮度	亮度响应/(cps · R ⁻¹)
0	611		0.087
+2	570		0.082
-2	585	6 986.9 Rayleigh	0.084
+4	572		0.082
-4	554		0.079
+6	516		0.074
-6	528		0.076

5 定标精度分析

极紫外相机辐射定标的误差来源主要有: 空心阴极光源稳定性、AXUV100G 标准传递误差、AXUV100G 信号测量误差、狭缝目标辐射亮度均匀性误差及余弦特性误差和极紫外相机图像采集误差。表 2 测试数据表明, 空心阴极光源稳定工作后强度波动误差不超过 5%; NIST 的标定报告给出 AXUV100G 标准传递误差在极紫外波段的平均值优于 4%; AXUV100G 信号的电路测量误差约为 10%; 狭缝目标相对于相机立体角的辐射亮度余弦特性误差可以忽略; 使用 MCP 光子计数成像探测器在狭缝后方对其成像, 结果表明其均匀性误差小于 8%; 极紫外波段空间相机像面是光子计数探测器, 图像噪声带来的误差可以忽略。由于上述误差属于非相干误差项, 可以将它们的均方根作为定标的综合误差:

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_d^2 + \sigma_{\text{cali}}^2 + \sigma_{\text{lit1}}^2 + \sigma_{\text{lit2}}^2 + \sigma_{\text{IMG}}^2}$$

将上述各部分误差代入式中, 计算该极紫外相机的辐射定标精度优于 15%。

6 结 论

本文提出了一种基于小目标成像的辐射定标方法。该方法不使用散射板、积分球等二次散射目标, 而是通过光阑和准直镜等手段构造一个直接来自于光源的小目标, 避免了散射体对极紫外波段辐射的强烈吸收, 适用于该波段空间相机的辐射定标。详细介绍了该方案的定标原理及定标过程, 并在实验室建立了一套基于此方案的极紫外波段辐射定标装置。利用该定标装置对一台极紫外相机样机进行了辐射定标试验, 并分析了该定标方法及装置的定标误差来源。实验结果表明, 该定标装置的定标精度优于 15%, 符合设计要求。

参考文献:

- [1] WOODS T, RODGERS E, BAILEY S, *et al.*. TIMED solar EUV experiment: pre-flight calibration results for the XUV photometer system [J]. *SPIE*, 1999, 3756: 255-262.
- [2] BERGHMANS D, HOCHEDÉZ J F. SWAP on-board PROBA2, a new EUV imager for solar monitoring [J]. *Advances in Space Research*, 2006, 38: 1807-1811.
- [3] TSUNETA S. The soft X-ray telescope for the Solar-A mission [J]. *Solar Physics*, 1991, 136: 37-67.
- [4] JUDGE D L, MCMULLIN D R, OGAWA H S, *et al.*. First solar EUV irradiances from SOHO by the CELIAS/SEM [J]. *Solar Phys.*, 1998, 177: 161-173.
- [5] CHENG B, SONG K F, LI ZH H, *et al.*. Development and calibration of the moon-based EUV camera for Chang'e-3 [J]. *Res. Astron. Astrophys.*, 2014, 14: 1654-1660.
- [6] EPARVIER F G, WOODS T N. The EUV variability experiment (EVE) aboard the NASA solar dynamics observatory [J]. *SPIE*, 2004, 5660: 48-55.
- [7] 刘亚侠. TDI CCD 相机实验室辐射定标的研究[J]. *光电工程*, 2007, 345: 71-74.
LIU Y X. Research on the laboratory radiometric calibration of the TDI CCD camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 345: 71-74. (in Chinese)
- [8] HEATH D F, WEI ZH Y, FOWLER W K. Comparison of spectral radiance calibrations of SBUV2 satellite ozone monitoring instruments using integrating sphere and flat plate diffuser techniques [J]. *Metrologia*, 1993, 30: 259-264.
- [9] GU Y, ERSON J M. An approach to the spectral and radiometric calibration of the VIFIS system [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1999, 20(3): 535-548.
- [10] CHANDER G, HELDER D L, MARKHAM B L, *et al.*. Landsat-5 Tm reflective-band absolute radiometric calibration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004 (42): 2747-2760.
- [11] FURST M L, GRAVES R M, MADDEN R P. Synchrotron ultraviolet radiation facility (SURF-ID) radiometric instrumentation calibration facility [J]. *Optical Engineering*, 1993, 32 (11): 2930-2935.
- [12] SANDEL B R, BROADFOOT A L, CURTIS C C, *et al.*. The extreme ultraviolet imager investigation for the IMAGE MISSION [J]. *Space Science Reviews*, 2000, 91: 197-242.
- [13] 薛松, 邵景鸿, 卢启鹏, 等. 合肥同步辐射反射率测量装置[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5): 480-484.
XUE S, SHAO J H, LU Q P, *et al.*. Reflectivity measuring device in the National Synchrotron Radiation Laboratory [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 480-484. (in Chinese)
- [14] 尼启良, 刘世界, 陈波. 小型高精度软 X 射线-极紫外反射率计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1886-1890.
NI Q L, LIU SH J, CHEN B. Compact high-precision soft X-ray and extreme ultraviolet reflectometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1886-1890. (in Chinese)

作者简介:



何玲平(1982—),男,江西新余人,副研究员,2010年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事短波段空间光学仪器设计及检测定标的研究。E-mail: hlp200201@163.com



陈波(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984年于吉林大学获得学士学位,主要从事软 X 射线-极紫外波段光学和空间光学的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)