

## 远紫外光学遥感载荷在轨定标技术研究进展

付利平<sup>1,2</sup>, 贾楠<sup>1,2,3</sup>, 胡秀清<sup>4\*</sup>, 毛田<sup>4</sup>, 江芳<sup>1,2</sup>,  
王云冈<sup>4</sup>, 彭如意<sup>1,2</sup>, 王天放<sup>1,2,3</sup>, 王大鑫<sup>3</sup>, 窦双团<sup>3</sup>

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190
2. 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 国家卫星气象中心, 北京 100081

**摘要** 远紫外波段(115~200 nm)光学遥感是在卫星上获得空间环境参数,如 O, N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 等中性大气原子分子柱密度及廓线分布、电离层电子密度 TEC、电子密度廓线、等离子体含量、大气温度廓线、太阳 EUV 流量、能量粒子沉降等信息的重要探测技术,也是最具发展潜力的空间天气探测方法之一。定量获得这些物理参量的重要过程之一是载荷的辐射定标,包括发射前实验室定标和在轨定标。发射前定标给出载荷的原始定标系数,而在轨定标则给出仪器在轨运行一段时间后定标系数的变化。远紫外探测技术用于中高层大气、电离层、磁层、太阳活动等方面的研究从 19 世纪 70 年代就已经开始,以美国为代表的一些国家已将远紫外探测列入空间天气监测的长期规划,并且开展了大量的在轨定标技术研究,确保载荷数据的长期定量应用。我国在本世纪初才开展远紫外波段载荷技术的研究,在轨定标技术基本属于空白。在轨定标方法包括基于外部标准辐射源定标、基于内部辐射标准源定标和替代定标三种。以国际上具有代表性的远紫外探测载荷为例,分析和总结这三种定标方法分别用于成像探测、光谱成像探测和光度计三种主要的探测类型仪器上的定标方案、在轨定标数据处理方法及处理结果。对多种类型载荷及不同定标准源定标方法及结果分析表明,对于视场较大,且具备深空观测能力的远紫外波段成像仪器及成像光谱仪,首选外定标源法,即采用远紫外辐射相当稳定且已知光辐射强度的紫外恒星作为辐射标准源,根据运行轨道进行定标模式合理设计,并结合实验室定标数据,实现在轨全视场定标;对于光度计类的单点探测仪器,由于视场限制,极少有恒星观测条件,故推荐采用替代定标方式,实现载荷在轨长期监测,但在定标数据的选取及时空匹配方面应详细分析,以提高定标精度;而利用内部标准源进行定标的方法,标准源本身的衰减问题是亟待解决的问题。

**关键词** 远紫外; 遥感探测; 空间天气; 在轨定标

**中图分类号:** P356 **文献标识码:** R **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3673-08

### 引言

气辉是空间光学辐射背景中一种重要的自然发光现象,日气辉主要由太阳紫外辐射直接或间接激发大气分子、原子产生,而夜气辉则主要产生于原子或带电粒子光化反应或辐射复合过程<sup>[1-3]</sup>。对气辉的时空分布特性进行观测,通过反演可以获得高层大气、电离层中多种微量成分及电子、离子密度、极光沉降粒子等的分布特性。

地球大气中主要成分(N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, O 和 O<sup>+</sup>等)在远紫外

(for ultraviolet, FUV)波段(100~200 nm)范围均有特征气辉发射谱线,由于地球热层大气的吸收,来自于地表辐射及瑞利散射的波长短于 200 nm 的光辐射无法传递到热层以上高度<sup>[2-3]</sup>,因此,在卫星上对中高层、电离层高度远紫外气辉进行监测时,地球背景辐射的影响可以忽略不计,即探测背景非常干净。此外,对不同波段的远紫外波段探测可获得大量空间环境参量,如表 1 所示<sup>[2,4-5]</sup>,因此,利用卫星平台对远紫外波段气辉辐射进行探测,是研究电离层、中高层大气的理想探测手段。

**收稿日期:** 2018-07-08, **修订日期:** 2018-11-22

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41774195, 41874187), 国家重点研发计划课题(2018YF80504900, 2018YF80504901)资助

**作者简介:** 付利平, 1972 年生, 中国科学院国家空间科学中心研究员 e-mail: fuliping@nssc.ac.cn

\* 通讯联系人 e-mail: huxq@cma.gov.cn

表 1 远紫外探测波段及对应空间环境参量  
Table 1 Environmental parameters by different FUV colors

	H I (121.6 nm)	O I (130.4 nm)	O I (135.6 nm)	N <sub>2</sub> (LBHS 140~160 nm)	N <sub>2</sub> (LBHL 160~180 nm)
白天临边测量	H 原子扩线及逃逸速度	O <sub>2</sub> 扩线分布	O 扩线分布	O <sub>2</sub> 吸收率(O <sub>2</sub> 扩线)	N <sub>2</sub> 扩线分布、温度
白天天底测量		O <sub>2</sub> 吸收总量	于 LBHs 共同得到 O/N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , 太阳 EUV	太阳 EUV
夜间临边测量			电离层电子密度扩线		
夜间天底测量			电离层 TEC、电离层峰值电子密度 NmF <sub>2</sub>		
极光测量	质子沉降区域	极光边界及 O <sub>2</sub> 柱含量	电子沉降及质子沉降区域	与 LBHL 共同获得 E <sub>0</sub> 及离子化速率及电导率	获得有效沉降流量获得, E <sub>0</sub> 及离子化速率及电导率

远紫外光学遥感载荷是否能获得有价值的科学数据, 既取决于光学遥感载荷的设计和研制, 也取决于仪器的定量化水平, 而影响仪器定量化水平的决定性因素之一是辐射定标。光学遥感载荷全过程辐射定标包含发射前实验室定标和发射后在轨定标两部分, 载荷在轨运行一段时间后, 由于空间辐射、原子氧、高能粒子等作用, 光学器件、探测器的性能将会发生变化, 原有的实验室定标系数将不再适用, 需要进行在轨定标, 以提供新的定标系数。因此, 在轨定标是光学遥感载荷长期业务化、定量化运行所必不可少的。

## 1 远紫外光学遥感载荷在轨定标技术

光学载荷在轨定标通常采用外部辐射参考标准(如太阳辐射、星体辐射、月光等), 或者采用内部参考标准(如传递标准光源、传递标准探测器等)方式进行。除这种直接利用标准源(含内部标准源和外部标准源)进行定标的方法外, 替代定标也是进行星上定标的方法之一。

远紫外遥感探测从探测形式上可分为成像仪、光谱成像仪和光度计三大类, 而利用外部辐射标准源进行标定的类型主要包括光谱成像仪载荷和成像仪载荷, 光度计类载荷则以替代定标为主。

下面分别就外部辐射标准、内部参考标准和替代定标三种定标方式进行阐述。

### 1.1 外部辐射参考标准源定标方法

对于工作波段在为紫外、可见和近红外波段的光学遥感仪器来说, 太阳是一种非常理想的外部辐射参考标准源, 在日地平均距离上大气层外太阳的总辐照度的经年变化 < 0.5%<sup>[8]</sup>, 可以满足 260 nm 以上工作波段光学遥感探测仪器的辐射定标要求, 并已得到广泛应用。

对于 200 nm 以下波段, 太阳辐射强度的变化非常大。对太阳 20 年的观测表明, 在 160~200 nm 波段范围内太阳强度变化 15%; 而 65~160 nm 间该变化量在 15%~70% 间; 1~65 nm 波段间太阳强度变化达到 1.5 倍, 甚至 7 倍。由此可知, 太阳在 200 nm 以下的辐射并非稳定值, 因此在远紫外波段太阳不适合作为外部辐射标准源。而相对太阳温度更高的紫外星(如 O 星的表面温度 > 25 000 °C, B 星的表面温度在 11 000~25 000 °C 间, A 星的表面温度在 7 500~11 000 °C 间), 其远紫外波段的光谱辐射相当稳定, 光谱辐

射量变化不超过 5%<sup>[9-10]</sup>, 是远紫外光学遥感仪器的最佳外部辐射标准点源<sup>[2]</sup>。目前国际上多数远紫外仪器如美国 DM-SP(Defense Meteorological Satellite Program) 卫星上紫外扫描光谱成像仪 SSUSI(Special Sensor Ultraviolet Scanning Imager)<sup>[11-13]</sup>、紫外临边成像仪 SSULI(Special Sensor Ultraviolet Limb Imager)<sup>[14-15]</sup>、TIMED(The Thermosphere, Ionosphere, and Mesosphere Energetics and Dynamics) 卫星上全球紫外成像仪 GUVI(Global Ultraviolet Imager)<sup>[6-7, 16]</sup>、IMAGE 卫星上宽带相机 WIC(Wideband Imaging Camera)<sup>[17]</sup>、光谱成像仪 SI(Spectrographic Imager)<sup>[18-19]</sup>、Advanced Research and Global Observation Satellite (ARGOSE) 卫星上高分辨率气辉极光光谱仪 High Resolution Airglow and Aurora Spectrograph(HIRAAS)<sup>[20-21]</sup>、全球电离层监测仪 Global Imaging Monitor of the Ionosphere(GIMI)<sup>[22-23]</sup> 等均利用紫外星作为在轨辐射标准, 开展星上定标研究。

#### 2.1.1 远紫外成像光谱仪定标

远紫外成像光谱仪由于可以获得光谱信息, 被广泛用于获得 H, O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, 电子密度 TEC、峰值电子密度 NmF<sub>2</sub> 及全球分布信息, 代表性仪器包括 HIRAAS, GUVI, SSUSI 等。以 ARGOS 卫星上的 HIRAAS 载荷为例对光谱成像仪类载荷星上定标方法及结果进行讨论。

ARGOS 卫星<sup>[20]</sup>于 1999 年 2 月发射, 卫星上装载有 9 台载荷, 其中包括美国海军实验室研制的低分辨率气辉极光成像仪 LORAAS。该仪器工作波段 80~170 nm, 带宽 1.8 nm, 为扫描式临边光谱成像探测仪, 仪器扫描角 96°~117°。

由于 LORAAS 是临边探测模式, 因此在轨可实现对紫外星的探测, 通过分析所测到的紫外星的光谱强度信息, 实现对仪器的在轨长期稳定性监测。

仪器在轨利用紫外星开展以下几方面的在轨测试:

##### (1) 狭缝函数测量

LORAAS 卫星为光谱成像仪, 其狭缝函数包括光谱方向和空间方向的两类, 因此在轨期间, 该载荷分别对两类狭缝函数进行了测试。

LORAAS 于 1999 年 12 月 8—12 日对 B1 星 HD52089 进行了观测, HD52089 在 130~163 nm 光谱区间、6°视场范围内的亮度比其他星亮度高近 50 倍, 是非常理想的点光源。研究人员对连续 70 轨 130 幅定标数据图进行处理, 获得仪器视场方向狭缝函数, 如图 1 所示<sup>[20]</sup>。

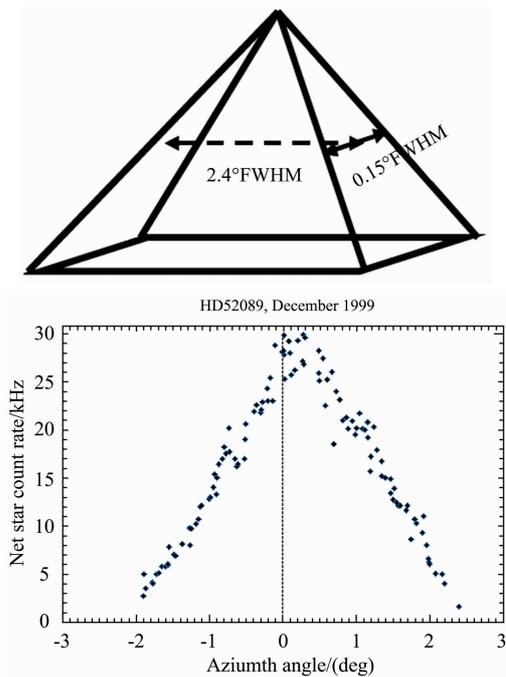


图 1 仪器视场方向狭缝函数设计值与在轨测量值比较

(a): 理想化狭缝函数; (b): 在轨测试结果

Fig. 1 Compare between the Idealizes slit throughput function and the on-orbit measurement

(a): Idealized slit throughput function;

(b): Results from on-orbit measurement

图 1(a)为理论狭缝函数值,图 1(b)为在轨实测的狭缝函数,图中横坐标为 HD52089 的方位角,纵坐标为计数。测量结果显示,在轨获得的视场方向狭缝函数半高宽与理论值  $2.4^\circ$  符合很好,但中心点与卫星飞行方向有约  $0.3^\circ$  的偏差,可能是仪器安装时导致的偏差。

在轨定标时,紫外星 HD52089 通过载荷前置望远镜系统成像到狭缝上,并随着卫星飞行,紫外星的像将穿过整个狭缝,因此可以获得光谱方向的狭缝函数,在轨测试结果如图 2 所示<sup>[20]</sup>。

图 2(a)在轨测量结果表明,仪器光谱方向的 FWHM 值为  $0.098 \pm 0.001^\circ$ 。与发射前实验室狭缝函数测量结果  $0.15^\circ$  (FWHM)[如图 2(b)所示]比较,在轨测量结果偏小,产生差异的主要原因是实验室利用 253.7 nm 进行测量,而在轨测试时的所选用的测量谱段则是 130 nm。

(2) 在轨灵敏度(响应度)监测

LORAAS 在轨期间,利用紫外星完成的最重要的工作是对仪器的灵敏度进行长期监测。光谱成像仪灵敏度进行在轨监测的关键点是利用紫外星的点光源特性,因此设计定标方案和评估定标结果时需考虑仪器视场。ARGOS 卫星轨道为太阳同步轨道,针对同一颗定标紫外星,每天可以观测到 14 次,3 d 内可以覆盖整个视场,实现全视场定标。

利用 1999 年和 2000 年紫外星 HD52089 观测结果对仪器在轨灵敏度进行在轨评估(HD52089 的参考辐射强度从 IEU(International Ultraviolet Explorer)卫星谱和 Kurucz 模

式(90~115 nm)<sup>[24-25]</sup>获得),定标结果如图 3 所示<sup>[20]</sup>。

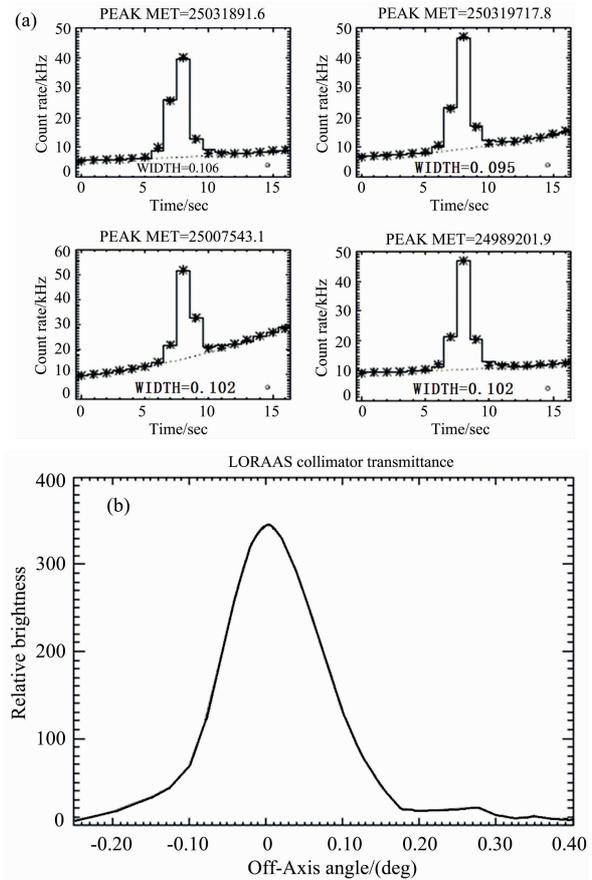


图 2 仪器光谱方向狭缝函数在轨测量结果与实验室测量结果比较

(a): 在轨测量结果; (b): 实验室测量结果

Fig. 2 Compare between the vertical/dispersion slit function measured in laboratory and on-orbit

(a): Four detections of HD52089 constrain the shape of the slit function; (b): Vertical/dispersion slit function measured in the laboratory

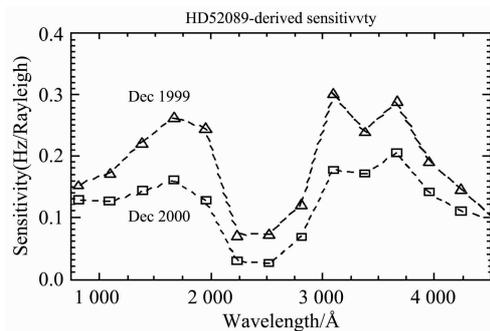


图 3 LORAAS 灵敏度 1999 年—2000 年变化情况

Fig. 3 Sensitivity versus wavelength derived by averaging several stellar spectra of the 1999 and 2000 apparitions

图 3 中横坐标为波长,纵坐标为灵敏度。在轨灵敏度监测结果表明,仪器灵敏度最大为 0.3 counts/s/Rayleigh,与实验室测量结果 0.7 counts/s/Rayleigh 相比,明显偏小。此

结果与同类仪器 SSUSI 定标结果类似。经分析, 导致此偏差的主要原因是实验室定标时定标光源带外光污染探测通道, 导致实验室测量结果偏大。

### 1.1.2 远紫外成像仪定标

远紫外成像仪通过成像探测直接获得某波段内的二维图像信息, 从而获得极光、电离层气辉等形态特性。远紫外成像仪代表性的仪器包括 VIKING 卫星上紫外相机(UVI)、POLAR 卫星上紫外相机 UVI(UV Imager)、IMAGE 卫星上 WIC、ARGOSE 卫星上 GIMI 仪器等。这些仪器在轨定标方式基本相同, 下面以 ARGOSE 卫星上 GIMI 仪器和 VIKING 卫星上紫外相机(UVI)为例介绍相机在轨定标情况。

GIMI 是 ARGOSE 卫星上遥感载荷之一, 主要目的是通过对电离层远紫外波段辐射进行成像探测, 获得电离层  $O^+$  和电子密度的全球分布及  $N_2$  和  $O_2$  的廓线分布。此外, 该载荷还可对深空星体及远紫外辐射背景进行探测。

GIMI 包括 2 台成像仪组成, 分别为极紫外成像仪(75~110 nm)和远紫外成像仪(131~160 和 131~200 nm), 视场为  $9^\circ \times 9^\circ$ , 空间分辨率约 1 毫弧。仪器在轨有 3 种工作模式<sup>[22]</sup>: 在轨定标模式, 科学探测模式和自检模式。在轨定标模式可进行在轨深空背景探测, 获得背景星体及光辐射信息; 科学探测模式则进行高层大气和电离层观测; 自检模式主要对相机暗电流等基本参数进行监测。仪器在轨工作示意图见图 4<sup>[22]</sup>。

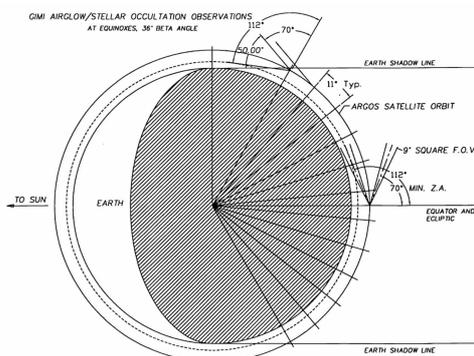


图 4 GIMI 在轨工作模式图

Fig. 4 Three modes of GIMI working On-Orbit

在执行在轨定标模式时, GIMI 相机对已知亮度的紫外星进行观测, 利用仪器自身的转动及紫外星本身的运动, 实现在轨全视场标定。按照 ARGOSE 卫星的实际运行轨道, 在轨定标所使用的紫外星在 GIMI 视场中每天将产生  $1^\circ$  的位置移动, 而 GIMI 总视场为  $9^\circ \times 9^\circ$ , 因此 9 d 可以完成对 GIMI 全视场的定标。

GIMI 在轨定标主要开展的工作包括: 绝对灵敏度测量、各像元间相对灵敏度测量等。

图 5<sup>[22]</sup> 为 1999 年 5 月 GIMI 在轨定标获得的一幅典型的定标图像, 图 5(a) 为直接成像结果, 除了观测的紫外星的拖影外, 部分天空背景的漫射光同样可以看到; 图 5(b) 是对图 5(a) 结果进行垂直方向的积分信号。

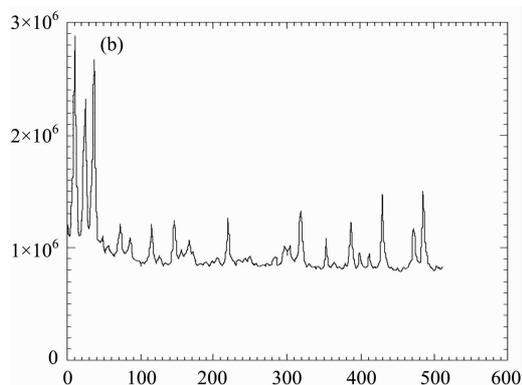
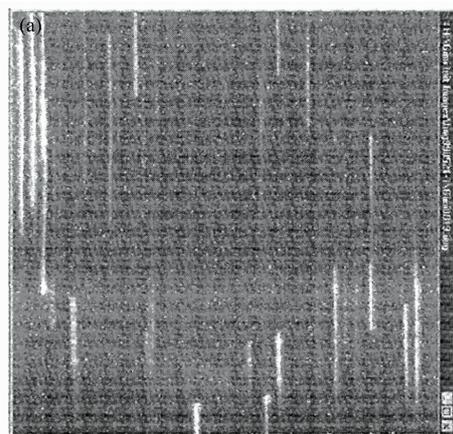


图 5 GIMI 在轨定标测量典型结果

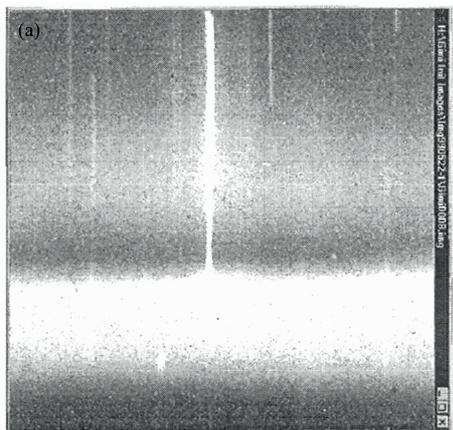
(a): 定标测量原始图像; (b): 光强积分信号

Fig. 5 A typical image taken with GIMI Camera in Earth shadow and vertically-summed intensity vs. horizontal position

(a): A typical image taken with GIMI Camera;

(b): Vertically-summed intensity vs. horizontal position

图 6 为典型的高层大气和电离层探测数据, 其中较淡的成像拖影为被  $O_2$  部分吸收后的恒星的光谱。与图 5 比较, 很显然, 在利用紫外星进行在轨标定时, 避开气辉对冷空进行探测是非常重要的。



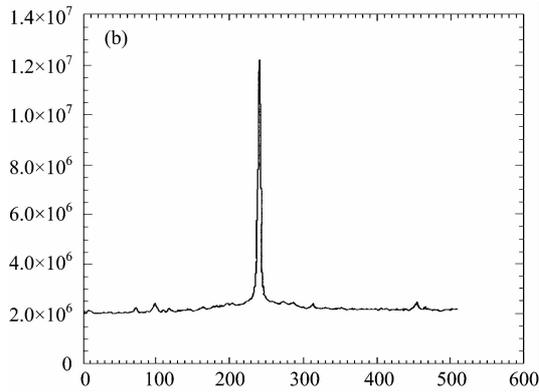


图 6 典型大气电离层气辉测量结果  
 Fig. 6 Typical GIMI Camera 2 observation of ionospheric emission

Kurucz<sup>[24]</sup> 模拟给出不同温度的星体的相对光谱辐射强度与波长的关系, 如图 7<sup>[24]</sup> 所示。

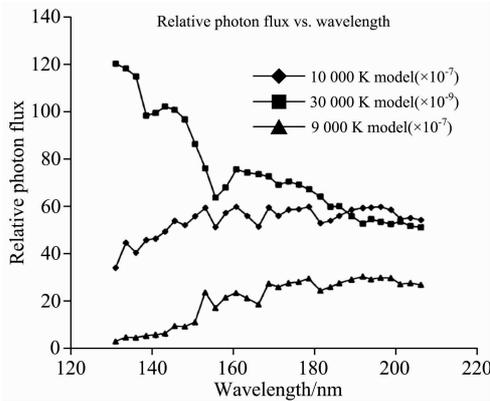


图 7 不同温度恒星相对光子流量模拟结果  
 Fig. 7 Relative photon flux of stellar model atmospheres of various effective temperatures

图 7 中 9 000 K 对应 AO 类型星体, 10 000 K 对应 B9 类型星体, 而 30 000 K 则对应 BO 类型星体。

根据图 7 给出的不同星体光谱分布情况和图 5 给出的定标测量结果, 卷积得到 GIMI 灵敏度结果, 如图 8 所示<sup>[22]</sup>。

瑞典于 1986 年发射的 VIKING 卫星上装载了紫外成像仪(UVI), UVI 包括 2 台成像仪, CAMERA 0 工作波段在 135~180 nm, CAMERA 1 则工作在 130~160 nm, 主要探测目的是获得高时空分辨率的极光形态演变过程, 采用 IC-CD 作为成像探测器。针对 UVI, 研究人员利用紫外星开展了仪器在轨定标工作, 给出了成像仪的响应度<sup>[27]</sup>。

卫星发射前, 在实验室首先对相机的光谱响应特性进行测试, 结果如图 9 所示<sup>[27]</sup>。

图 9 中, 横坐标表示波长, 纵坐标表示仪器相对响应。

UVI 在轨运行期间, 与 GIMI 类似, 对多个不同类型的紫外星进行了观测, 测量点覆盖仪器的整个相面。

UVI 灵敏度系数  $K$  (单位  $kR/DN$  ( $1 kR = 10^9$  photons/cm<sup>2</sup>/s/4 $\Pi$ )) 与观测计数  $DN$ 、恒星绝对光谱强度

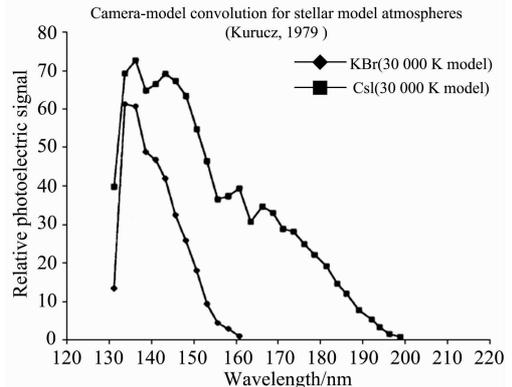
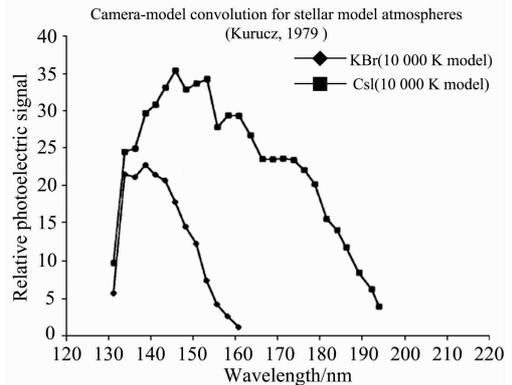
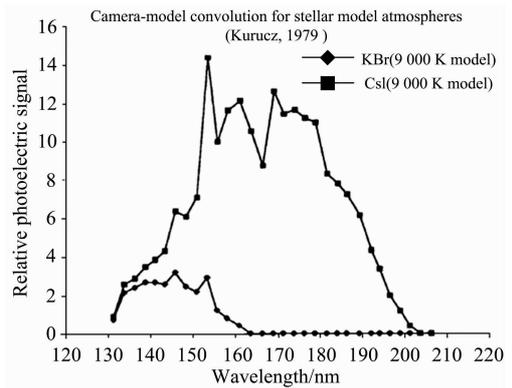


图 8 紫外星亮度与 GIMI 光谱响应特性卷积结果  
 Fig. 8 Convolutions of the atmosphere photon flux distributions with the GIMI camera sensitivities

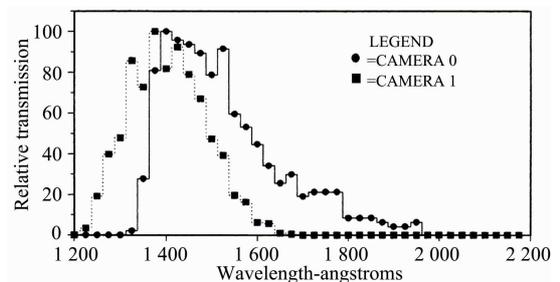


图 9 Viking 发射前实验室光谱响应测量数据  
 Fig. 9 The relative transmission as a function of wavelength for the two Viking cameras as determined during pre-flight calibrations

$\frac{dF}{d\lambda}$  [ergs  $\cdot$  (cm<sup>2</sup>  $\cdot$  sec  $\cdot$  A)<sup>-1</sup>] 及成像仪的相对光谱响应  $T(\lambda)$  之间的关系可表示为

$$K \sum_{star} DN = (8.89 \times 10^4) \int_{\lambda=0}^{\infty} T(\lambda) \frac{dF}{d\lambda} \lambda d\lambda \quad (1)$$

利用式(1), 得到仪器整个像面灵敏度系数。仪器在轨获得的像面上不同区域上灵敏度系数分布情况如图 10 所示<sup>[27]</sup>。

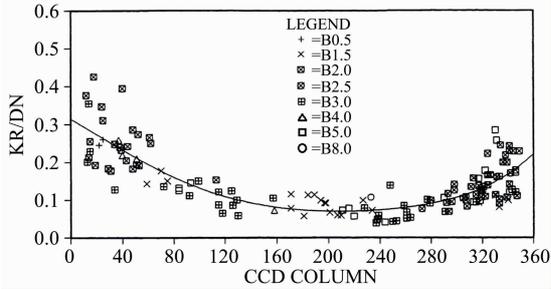


图 10 UVI 相机灵敏度与 CCD 像元关系

Fig. 10 The sensitivity coefficient  $K$ , versus CCD column number of UVI determined in flight using far ultraviolet stars

理论上, 灵敏度系数  $K$  在 ICCD 像面上任何一点都是相同的, 但由于光学相差、耦合光锥透过率变化及不同的入射视角都会造成像面上的灵敏度有所差异。对测试结果进行多项式拟合, 相机 0 和相机 1 中心位置的系数定标系数分别为: 0.069 和 0.070 kR  $\cdot$  DN<sup>-1</sup>。

### 1.2 内部辐射参考标准源定标方法

氙灯光源是实验室常用的远紫外波段辐射定标源, 也是在轨定标首选的内部定标光源。以氙灯为定标源开展在轨定标工作的代表仪器为高层大气探测卫星 UARS (Upper Atmospheric Research Satellite) 卫星上的太阳紫外光谱辐射监测仪 SUSIM (Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor), 该仪器是测量 115~410 nm 波段范围内的太阳光谱的光学遥感载荷<sup>[28]</sup>。

SUSIM 包含两个独立设计的双光栅光谱仪, 定标氙灯放置在光谱仪的入射狭缝前, 两个光谱仪中一个可兼顾观测太阳和定标氙灯, 另一个则仅监测定标光源。

SUSIM 所使用的氙灯光源由英国 Cathodeon 公司研制、英国国家物理实验室 (National Physical Laboratory (NPL)) 进行标定。氙灯外形结构如图 11 所示。

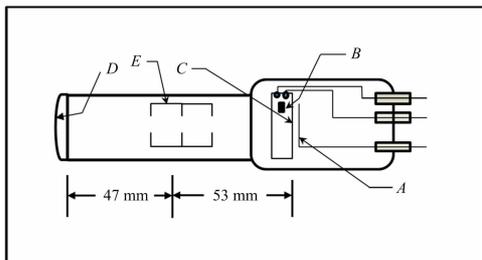


图 11 SUSIM 内部定标氙灯光源外形图

Fig. 11 Schematic of a SUSIM lamp

由于定标氙灯在太空中会受短波紫外辐照和高能粒子的影响, 性能将发生衰减, 同时, 考虑定标氙灯光源 300 h 寿命, 为确保仪器寿命周期内均可开展在轨标定, SUSIM 仪器内部带了 4 个氙灯用于跟踪仪器在轨飞行期间的衰变情况<sup>[28]</sup>, 4 个定标灯在轨使用频率分别为: 1 个月, 3 个月, 6 个月和 12 个月, 定标灯开启时所产生的功耗为 30 W。采用内部光源定标主要关注定标光源的稳定性, SUSIM 在轨期间对氙灯光源辐亮度变化、重复性及波长漂移进行了长期监测, 测试结果如图 12 所示<sup>[28]</sup>。

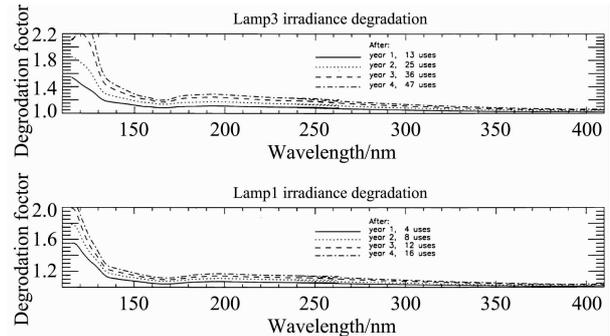


图 12 1 号灯和 3 号灯辐亮度 4 年衰变情况监测结果

Fig. 12 The accumulated degradation of the irradiance from Lamp3 (upper panel) and Lamp1 (lower panel) at the end of each of four years of use

对定标灯衰减变化情况进行分析, 定标灯辐射亮度在短波 (<150 nm 波段) 衰变较快, 在第 3~4 年后, 性能变化趋于稳定。氙灯在轨亮度降低的主要原因是太阳直射到仪器内, 同时氙灯开启后功耗大, 二者共同导致仪器局部或整体温度升高, 仪器材料挥发加速, 挥发出来的有机污染物聚合到 MgF<sub>2</sub> 透镜窗口上, 导致定标灯辐射亮度发生衰减。

由于氙灯本身在轨会发生衰减, 且功耗大, 因此在轨定标以氙灯作为定标源的载荷极少。

### 1.3 替代定标

在轨的远紫外探测仪器除成像仪和成像光谱仪外, 还有一类仪器是单波段单点探测仪器, 即光度计。该类载荷所占卫星资源小, 灵敏度高, 非常适合装载在组网式微小卫星群上使用<sup>[29-31]</sup>。光度计载荷通常采用替代定标或交叉法定标式完成在轨标定。

2006 年, Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (COSMIC/FORMOSAT-3) 星座在美国成功发射, 该星座由 6 颗卫星组成, 每颗卫星包含 3 台有效载荷, GPS 掩星探测仪 (GOX)、电离层光度计 (TIP) 和三频信标 (TBB)<sup>[31]</sup>。其中电离层光度计是工作在远紫外波段的小型高灵敏度光学遥感探测载荷, 通过对 O I 135.6 nm 波段辐射进行探测<sup>[3]</sup>, 反演获得星下点电离层峰值电子密度及电子密度 TEC。

电离层光度计包括一片离轴抛物镜和 SrF<sub>2</sub> 滤光片, 探测器选用日本滨松公司 R7511 型光电倍增管。仪器组成如图 13 所示<sup>[31]</sup>。

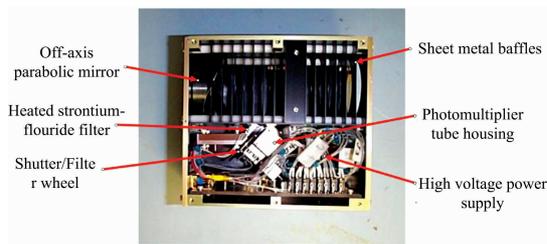


图 13 电离层光度计内部结构图

Fig. 13 TIP sensor assembly interior

TIP 在轨定标采用替代定标的方法, 最初设计定标方案是当卫星飞过非相干散射雷达(ISR)上空时, 非相干散射雷达给出此时测量的  $O^+$  和电子密度, 基于 ISR 测量数据, 通过正演算法计算出此时 135.6 nm 辐射强度, 以此为辐射强度标准实现在轨定标。但可能由于时空可匹配的 ISR 与 TIP 数据少, 后续没有文献报道 TIP 利用 ISR 数据实现在轨定标。

COSMIC 是 6 颗卫星组网的星座, 星上装载的 GOX 可获得电离层峰值电子密度参数, 而 TIP 也可获得同样的参数, 二者观测路径有差别。但在卫星入轨初期进行轨道调整时, 6 颗星上的 GOX 掩星测量点会产生大量与 TIP 测量点时空可匹配的数据, 利用这些时空可匹配的 GOX 测量的电离层参数与 TIP 测量的电离层参量进行比较, 间接获得 TIP 在轨灵敏度的变化情况, 实现在轨替代定标。

定标所选用的数据为典型太阳活动谷年数据, 地磁指数  $A_p < 2$ ,  $F_{10.7} \sim 81 \times 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ , 这种条件下, 电离层变化小; 在匹配数据选取上, GOX 数据选取后向掩星事件, 且卫星轨道平面  $\pm 15^\circ$  范围内, 电离层峰值高度在 220 km 以上, 这样可以最大程度减小定标误差。

利用该方法进行替代定标结果如表 2 所示<sup>[33]</sup>。

表 2 TIP 在轨定标结果

Table 2 TIP on-orbit calibration results

卫星标识	定标所用掩星事件	灵敏度及不确定度
CF3-1	8	$341 \pm 72 \text{ ct/s/Rayleigh}$
CF3-3	3	$420 \pm 122 \text{ ct/s/Rayleigh}$
CF3-5	4	$551 \pm 104 \text{ ct/s/Rayleigh}$
CF3-6	4	$573 \pm 163 \text{ ct/s/Rayleigh}$

对这种替代定标方法精度进行评估, 在轨定标精度约 25%。

## 2 结 论

远紫外遥感探测技术已经成为研究磁层、电离层及各大气层之间耦合的重要观测手段, 相关载荷在空间天气监测、预报等方面实现了业务运行。我国在远紫外探测方面还处于初级阶段, 2017 年 11 月发射的风云三号 D 星上装载的电离层光度计和广角极光成像是我国首次在太空中开展远紫外波段探测的仪器, 实现我国远紫外遥感探测零的突破。但遗憾的是, 这两台载荷没有在轨定标功能。目前主要采用与国际同类仪器的交叉定标和模拟比对解决在轨定标问题, 后续卫星这两类仪器在轨定标将主要通过配备专门的星上定标设备提升定标精度。

目前国内在远紫外光学遥感载荷在轨定标方面的研究为空白, 本文通过对国际上成功实现在轨定标的相关载荷进行研究, 给出不同类型远紫外波段光学遥感载荷在轨定标方案的建议, 为后续开展的远紫外波段的在轨定标技术研究提供基础。

## References

- [1] Chamberlain J W, Landshoff R. *Physics Today*, 1962, 15(2): 44.
- [2] Larry J Paxton, Schaefer R K, Zhang Y, et al. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, JA023578, 2017, 122(2): 2706.
- [3] Meier R R. *Space Science Reviews*, 1991, 58(1): 1.
- [4] Tinsley B A, Bittencourt J A. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 1975, 80(16): 2333.
- [5] Strickland D J, Evans L S, Paxton L J. *JGR: Space Physics*, 1995, 100(A7): 12217.
- [6] Paxton L J, Christensen A B, Morrison D, et al. *SPIE*, 2004, 5660: 228.
- [7] Christensen A B, Walterschied R L, Ross M N, et al. *SPIE*, 1994, 2266: 451.
- [8] Gerd W Proloss. *Physics of the Earth's Space Environment*, Springer ISBN-13: 978-3-642-05979-7. 98.
- [9] Trunshak D A, Bohlin R A C, Williamson R L, et al. *Astronomical Journal*, 1990, 99(4): 1243.
- [10] Bohlin R C, Harris A W, Holm A V, et al. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1990, 73: 413.
- [11] Larry J Paxton, Ching-I Meng, Glen H Fountain, et al. *SPIE*, 1992, 1745: 2.
- [12] Daniel Morrison, Larry Paxton, Dave Humm, et al. *SPIE*, 2002, 4485: 328.
- [13] Larry J Paxton, Daniel Morrison, Zhang Yongliang, et al. *SPIE*, 2002, 4485: 454268.
- [14] Dymond K F, Nicholas A C, Budzien S A, et al. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, 122: 2674 (doi: 10.1002/2016JA022763).
- [15] Walker P W, Nicholas A C, Budzien S E, et al. *SPIE*, 2015, 9604: 1.
- [16] Humm D C, Ogorzalek B S, Elko M J, et al. *SPIE*, 1999, 3818: 78.
- [17] Mende S B, Heeterdks H, Frey H U, et al. *Space Science Review*, 2000, 91(1-2): 271.
- [18] Mende S B, Heeterdks H, Frey H U, et al. *Space Science Reviews*, 2000, 91(1-2): 287.

- [19] Frey H U, Mende S B, Immel T J, et al. *Space Science Reviews*, 2003, 109: 255.
- [20] Kenneth F Dymond, Scott A Budzien, George R Carruthers, et al. *SPIE*, 1999, 3818: 126.
- [21] Scott A Budziena, Kenneth F Dymonda, Stefan E, et al. *SPIE*, 2002, 4485: 394.
- [22] George R Carruthers, Timothy D Seeley. *SPIE*, 1996, 2831: 65.
- [23] George R Carruthers, Timothy D Seeley, Kevin K Shephard, et al. *SPIE*, 2002, 4485: 316.
- [24] Kurucz R L. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 1979, 40: 1.
- [25] Kurucz R L, Barbuy B, Renzini A. *IAU Symposium 149, The Stellar Populations of Galaxies*, 1992. 225.
- [26] Torr M R, Torr D G, Zukic M, et al. *Space Science Reviews*, 1995, 71: 329.
- [27] Gattinger R L, Little R W, Meo F, et al. *SPIE*, 1993, 2050: 132.
- [28] Dianne K Prinza, Linton E Floy, Lynn C Herringb, et al. *SPIE*, 1996, 2831: 25.
- [29] Fu L, Peng R, Shi E, et al. *Astrophysics and Space Science*, 2015, 355: 1.
- [30] Coker C, Dymond K F, Budzien S A, et al. *Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences*, 2009, 20(1): 227.
- [31] Phillip C Kalmanson, Scott Budzien, et al. *SPIE*, 2004, 5660: 259.
- [32] Hajj G A, Ibanez-Meier E R, Kurzinski, et al. *J. of Imag. Syst. and Tech.*, 1994, 5: 174.
- [33] Kenneth F Dymond, Scott A Budzien, Clayton Coker, et al. *SPIE*, 2009, 7438: 743814-1.

## Research Progress on On-Orbit Calibration Technology for Far Ultraviolet Payload

FU Li-ping<sup>1,2</sup>, JIA Nan<sup>1, 2, 3</sup>, HU Xiu-qing<sup>4\*</sup>, MAO Tian<sup>4</sup>, JIANG Fang<sup>1,2</sup>, WANG Yun-gang<sup>4</sup>, PENG Ru-yi<sup>1,2</sup>, WANG Tian-fang<sup>1,2,3</sup>, WANG Da-xin<sup>3</sup>, DOU Shuang-tuan<sup>3</sup>

1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** Far Ultraviolet wavelengths (FUV 115 to 200 nm) optical remote sensing detection on satellite is one of the most promising technologies on space weather. This technology can be effectively used to obtain some important space environment parameters, such as O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> column density and profile distribution, total electron content (TEC) of ionosphere and electron density profile. It also yields valuable information on content of plasma, temperature profile of the atmosphere, solar EUV flux and energy particle. In the processes of obtaining these physical parameters quantitatively there is one key step—the radiation calibration, including pre-launch laboratory calibration and on-orbit calibration: the former gives original calibration coefficient of the load before launch; the latter checks the change of the calibration coefficient of the instrument's on-orbit performance after a set period. In the West, FUV technology application to upper atmosphere, ionosphere, magnetosphere and solar activity started in the 1970s, and has been applied to the long-term Space Weather Program Strategic Plan by U. S. federal government. In China, this technology was carried out at the beginning of the 21<sup>st</sup> century, and the in-flight calibration is still a research gap now. This paper introduces on-orbit calibration technologies for some representative far ultraviolet payload based on the external standard radiation source, internal radiation standard source and vicarious calibration, and then analyses the data processing method and the results on three kinds of FUV remote sensing: Imager, Spectrometer Imager and Photometer. The results suggest that the best on-orbit calibration method for imager or spectrometer imager is using UV stellar as an external radiation standard; the instrument can catch the known radiation from the stellar; using the radiation from the stellar and the spectral responsibility from the lab, the sensitivity of the instrument will be known as in-flight. The internal standard radiation source, like deuterium lamp, is not a good choice for in-flight calibration because radiation itself from lamp attenuates. On single-point detection instrument, like a photometer with limited visual field, the vicarious calibration is a good way to realize on-orbit calibration. During the process of calibration, data selecting and spatio-temporal matching should be cautiously conducted in order to enhance the calibration accuracy.

**Keywords** Far ultraviolet; Remote sensing; Space weather; On-orbit calibration

\* Corresponding author

(Received Jul. 8, 2018; accepted Nov. 22, 2018)