

## 远紫外高光谱成像光谱仪的辐射定标技术

肖思<sup>1,2</sup>, 付利平<sup>1,2\*</sup>, 胡秀清<sup>3</sup>, 皮彦婷<sup>1,2</sup>, 贾楠<sup>1,2</sup>, 白雪松<sup>1,2</sup>, 王天放<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;<sup>2</sup>天基空间环境探测与北京市重点实验室, 北京 100190;<sup>3</sup>中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

**摘要** 利用紫外恒星对远紫外高光谱成像光谱仪进行在轨定标是实现高精度定量遥感的重要步骤。然而,在上述过程中,在轨定标系数无法直接用于目标反演。因此,转换在轨定标系数对提升仪器在轨定标精度具有重要意义。推导了定标系数的转换过程,给出了新的定标系数方程,并利用研制的仪器开展了相关验证实验。结果表明,利用修正后的定标系数进行目标反演,可将反演精度提升 40%。

**关键词** 测量; 辐射定标; 远紫外; 遥感探测; 系数转换; 高光谱成像仪

中图分类号 V19

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0212002

## Radiometric Calibration Technology Based on Far Ultraviolet Hyperspectral Imaging Instrument

Xiao Si<sup>1,2</sup>, Fu Liping<sup>1,2\*</sup>, Hu Xiuqing<sup>3</sup>, Pi Yanting<sup>1,2</sup>, Jia Nan<sup>1,2</sup>, Bai Xuesong<sup>1,2</sup>,  
Wang Tianfang<sup>1,2</sup><sup>1</sup> National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;<sup>2</sup> Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China;<sup>3</sup> National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** Using ultraviolet stars to finish the on-orbit calibration of far ultraviolet hyperspectral imaging spectrometer is an important step to achieve high precision remote sensing. However, in this way, the on-orbit calibration coefficients can not be directly used in target inversion. Therefore, the conversion of on-orbit calibration coefficients is of great significance to improve the on-orbit calibration accuracy of instrument. In this paper, the conversion process of the calibration coefficients is derived, a new equation of the calibration coefficients is given, the related verification experiments are carried out by using the developed instrument. The results show that the accuracy of target inversion can be improved by 40% by using the modified calibration coefficients.

**Key words** measurement; radiometric calibration; far ultraviolet; remote sensing; coefficient conversion; hyperspectral imaging instrument

## 1 引言

利用星载远紫外高光谱成像光谱仪对气辉辐射进行探测<sup>[1-6]</sup>,是研究电离层、热层的理想方式之一。利用远紫外波段(120~180 nm)可以获得热层-电离

层中 O、O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 等主要大气成分的气辉辐射强度,进而可以反演出热层氧原子、氧分子和氮分子等柱密度、密度廓线、氧氮比、热层大气温度、电离层电子密度廓线和电离层总电子含量等关键空间天气参量。通过这些空间天气参量可以对热层-电离层及

收稿日期: 2021-05-21; 修回日期: 2021-06-28; 录用日期: 2021-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(41874187)

通信作者: \*fuliping@nssc.ac.cn

其扰动情况进行监测和预报。高精度水平探测的实现不仅取决于仪器本身的性能,还取决于其探测数据的量化反演水平,即通过原始数据产品反演出目标成分的水平。在利用原始数据进行量化反演的过程中,获得成像光谱仪精确的辐射定标系数是不可缺少的步骤。

仪器的辐射定标包括地面辐射定标与在轨辐射定标。在星载远紫外高光谱成像光谱仪的地面辐射定标中,通常采用氙灯光源和真空紫外单色仪提供特定波长的单色光。光源经单色仪分光后,通过准直系统直接进入被测仪器或经漫反射板进入被测仪器,以完成辐照度辐射定标或辐亮度辐射定标。由于太阳光在远紫外波段的辐射出射度过低,无法使用太阳光与漫反射板的定标方法,故利用紫外恒星进行在轨辐射定标是目前星载远紫外高光谱成像光谱仪的重要方法。紫外恒星的等效黑体辐射温度为 40000 K,其紫外光谱响应曲线也可精确获得,并且紫外恒星稳定性高(可达到 2%~3%),故其是非常理想的在轨辐射定标源<sup>[7]</sup>。国外典型的星载远紫外高光谱成像仪,如 DMSP 卫星上工作波段为 120~190 nm 的 SSUSI/SSULI 远紫外光谱仪、TIMED 卫星上的 GUVI 远紫外光谱仪以及 IMAGE 卫星上的 SI 远紫外光谱仪等,均利用紫外恒星完成在轨辐射定标<sup>[8-9]</sup>。为了与在轨辐射定标系数匹配,上述仪器在地面采用辐照度定标方案。然而,国内鲜有该类型载荷辐射定标研究方面的文献论述。

从目前来看,对于星载远紫外高光谱成像光谱仪的地面与在轨辐射定标存在以下问题:1)由于大气气辉是面源扩展目标,需要利用辐亮度定标系数进行数据反演,而紫外恒星为点源目标,在轨定标获得的是辐照度定标系数,故要将在轨定标获得的辐照度定标系数转换为辐亮度定标系数,而二者的转换是一个难点;2)当将紫外恒星作为目标时,由于光学系统像差的影响,仪器成像后在空间维像面上会有多个像元有响应,进而无法准确获得单个像元响应灰度值与照度值的映射关系,故需利用点扩散函数对单个像元灰度值进行修正后才可使用。针对以上问题,本文以解决在轨辐射定标系数转换问题和提高在轨辐射定标精度为研究目的,首先介绍了所研制的星载远紫外高光谱成像光谱仪的设计方案,并给出了光谱仪的指标参数。然后,对辐亮度系数与辐照度系数的转换过程进行了详细推导,并得到了最终的辐射定标系数计算公式。最后,给出了仪器的地面辐射定标方法,并进行了相关实验。本文

的研究结果为同类型仪器在轨和地面辐射定标提供了重要的参考依据和方法。

## 2 仪器介绍

远紫外高光谱成像光谱仪由扫描镜、望远镜、光栅光谱仪和具有 MgF<sub>2</sub> 窗口的 MCP(microchannel plate)二维成像探测器组成。其中,望远系统为抛物面反射镜,光栅分光系统采用的是 Czerny-Turner(C-T)结构。远紫外高光谱成像光谱仪的光路图如图 1 所示,系统设计参数如表 1 所示。

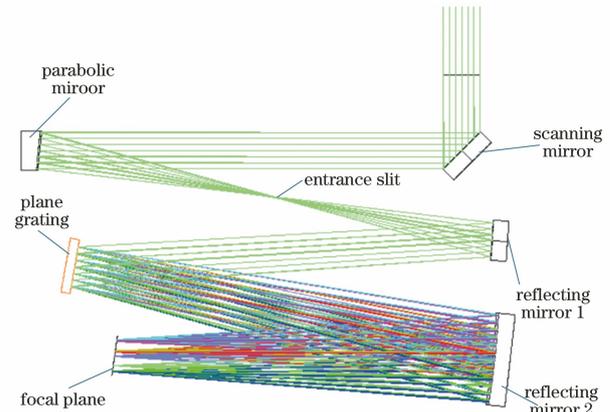


图 1 远紫外高光谱成像光谱仪的光路图

Fig. 1 Light path diagram of far ultraviolet hyperspectral imaging instrument

表 1 设计参数

Table 1 Design parameters

Item	Description of performance indicators
Optical system	Wavelength: 120–180 nm;
	field of view: 4°;
	F-number: 6.3;
	entrance pupil diameter: 30 mm;
	spectral resolution: 4 nm;
Detector	space resolution: 0.1°
	Pixel size: 20 μm;
	pixel number: 720×576
Working environment	Pressure: better than 10 <sup>-3</sup> Pa (vacuum); temperature stability: better than ±2 K

## 3 数据处理方法

远紫外高光谱成像光谱仪探测的大气气辉是面源目标,使用辐亮度定标系数进行目标亮度反演,不同像元( $i, j$ )的辐亮度定标公式<sup>[10-11]</sup>为

$$K_{i,j} = \frac{N_{D_{i,j}} - N_{D_{\text{dark}}}}{L_{i,j}}, \quad (1)$$

式中:  $i$  为空间维方向的像元数或沿狭缝方向的像元数;  $j$  为光谱维方向的像元数或垂直狭缝方向的像元数;  $K_{i,j}$  为不同像元的辐亮度定标系数;  $N_{D_{i,j}}$  为不同像元的灰度值;  $N_{D_{\text{dark}}}$  为暗场下的灰度值;  $L_{i,j}$  为地面定标光源亮度值, 单位为  $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \Omega)$ 。

在轨情况下, 仅能将紫外恒星作为定标光源, 进而得到的是辐照度定标系数。不同像元( $i, j$ )的辐照度定标公式<sup>[10]</sup>为

$$C_{i,j} = \frac{N_{D_{i,j}} - N_{D_{\text{dark}}}}{E_{i,j}}, \quad (2)$$

式中:  $C_{i,j}$  为不同像元的辐照度定标系数;  $E_{i,j}$  为定标光源辐照度值, 单位为  $\text{W}/\text{cm}^2$ 。

仪器在轨探测目标为面源扩展目标, 为了反演目标辐亮度值, 需要获得在轨辐亮度定标系数。然而, 仪器在轨定标目标为点源目标, 利用点源目标仅能获得在轨辐照度定标系数, 若直接将辐照度定标系数用于反演目标亮度, 则会引入误差, 影响定标精度。因此, 需要将  $C_{i,j}$  转换为  $K_{i,j}$ , 进而实现仪器的在轨辐亮度定标。辐照度系数与辐亮度系数的转换过程如下。

当给出的目标为辐亮度值时, 根据光学仪器不同像元( $i, j$ )的响应公式<sup>[10]</sup>, 可得到

$$N_{D_{i,j}} - N_{D_{\text{dark}}} = L_{i,j} \times Q_{i,j} \times t \times S \times \Omega, \quad (3)$$

式中:  $Q_{i,j}$  为不同像元的量子效率;  $t$  为探测积分时间;  $S$  为光学系统入瞳面积;  $\Omega$  为每个像元所对应的立体角。将(3)式与(1)式进行比较, 可以发现

$$K_{i,j} = Q_{i,j} \times t \times S \times \Omega. \quad (4)$$

当给出的目标为辐照度值时, 根据光学仪器不同像元( $i, j$ )的响应公式, 可得出

$$N_{D_{i,j}} - N_{D_{\text{dark}}} = E_{i,j} \times Q_{i,j} \times t \times S, \quad (5)$$

将(5)式与(2)式进行比较, 可得出

$$C_{i,j} = Q_{i,j} \times t \times S. \quad (6)$$

若仪器在立体角  $\Omega$  范围内, 则量子效率  $Q_{i,j}$  是均匀的。此时, 根据(4)、(6)式可得出辐照度系数与辐亮度系数的关系

$$\frac{K_{i,j}}{C_{i,j}} = \Omega. \quad (7)$$

由(7)式可以看出, 辐照度系数与辐亮度系数的比值为单个像元所对应的空间立体角。由国外同类型载荷 SSUSI 的测试结果可知, 仪器在沿狭缝方向的像元响应变化几乎可以忽略, 在垂直狭缝方向的像元响应变化是非常明显的<sup>[8]</sup>, 而仪器在立体角  $\Omega$  范围内, 量子效率  $Q_{i,j}$  是不均匀的, 故无法直接使用像元对应的立体角  $\Omega$  对两个系数进行直接转换。

$R_{i,j}$  可以表示为像元量子效率与像元立体角的乘积, 即

$$R_{i,j} = Q_{i,j} \times \Omega. \quad (8)$$

将像元的量子效率归一化为  $Q_{i,j,0}$ , 即平行光线垂直狭缝入射时像元的量子效率。在立体角范围内, 设像元沿狭缝方向的角度为  $\beta$ , 垂直狭缝方向的角度为  $\theta$ 。当光线沿着狭缝方向变化时, 认为像元的量子效率不发生变化并且均等于  $Q_{i,j,0}$ ,  $Q_{i,\theta}$  表示像元量子效率随着垂直狭缝方向角度变化的值, 进而可以得到像元量子效率与角度的变化关系为

$$R_{i,j} = Q_{i,j,0} \times 4 \tan \beta \times \tan \left( \int Q_{i,\theta} d\theta \right). \quad (9)$$

由(8)、(9)式, 可以得到像元立体角的新表达式

$$\Omega_{\text{eff}} = 4 \tan \beta \times \tan \left( \int Q_{i,\theta} d\theta \right), \quad (10)$$

式中:  $\Omega_{\text{eff}}$  代表新立体角。

将(7)式中的  $\Omega$  替换后可得

$$\frac{K_{i,j}}{C_{i,j}} = \Omega_{\text{eff}}, \quad (11)$$

由(11)式可知

$$\frac{K_{i,j}}{C_{i,j}} = 4 \tan \beta \times \tan \left( \int Q_{i,\theta} d\theta \right), \quad (12)$$

$$K_{i,j} = C_{i,j} \times 4 \tan \beta \times \tan \left( \int Q_{i,\theta} d\theta \right). \quad (13)$$

结合(2)式, 可得到修正后的辐亮度定标公式

$$K_{i,j} = 4 \frac{N_{D_{i,j}} - N_{D_{\text{dark}}}}{E_{i,j}} \tan \beta \times \tan \left( \int Q_{i,\theta} d\theta \right). \quad (14)$$

由于紫外恒星为点源目标, 故仪器对恒星成像时, 目标会弥散到多个像元, 典型的恒星图像如图 2 所示<sup>[12]</sup>。因此, 不同像元的灰度值  $N_{D_{i,j}}$  所对应的  $E_{i,j}$  需要根据仪器的点扩散函数进行修正后再使用, 最终的辐亮度定标公式为

$$K_{i,j} = 4 \frac{N_{D_{i,j}} - N_{D_{\text{dark}}}}{E_{i,j} * F_{\text{PR},i,j}} \tan \beta \times \tan \left( \int Q_{i,\theta} d\theta \right) K_{ij}, \quad (15)$$

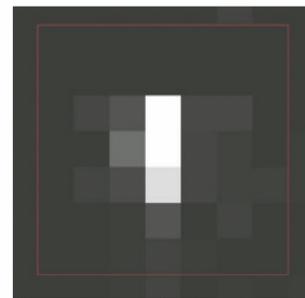


图 2 恒星图像  
Fig. 2 Star image

式中： $F_{PR,i,j}$  代表光学点扩散函数，表达式<sup>[13]</sup>为

$$F_{PR,i,j} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right), \quad (16)$$

式中： $\sigma$  表示高斯函数的标准差，反映了点扩散函数的宽度，其值越小说明光学系统成像质量越好。

## 4 地面辐射定标方法和测试结果

### 4.1 地面辐射定标方法介绍

由于远紫外高光谱成像光谱仪在轨后是利用紫外恒星完成辐照度定标的，故地面辐射定标方法应

与在轨定标方法一致，也采用辐照度定标的方式。此外，地面辐射定标还需获得仪器在垂直狭缝方向（光谱维方向）上不同角度的响应值，用于辐照度系数与辐亮度系数的转换。

在地面辐射定标方案中，将平行光作为定标光源，在真空仓中进行测试，定标原理图如图 3 所示，实际定标图如图 4 所示。地面辐射定标方案涉及的仪器为真空仓、氙灯、单色仪、圆孔靶标、准直系统和真空转台，设备参数如表 2 所示。

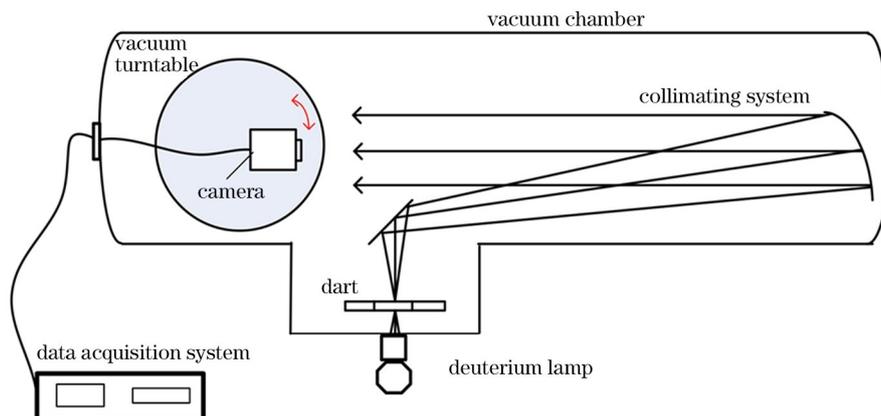


图 3 定标原理图

Fig. 3 Schematic diagram of calibration

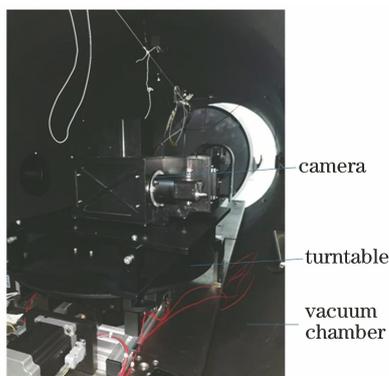


图 4 实际定标图

Fig. 4 Image of actual calibration

表 2 测试设备

Table 2 Test equipments

Equipment	Parameter
Vacuum chamber	Pressure: better than $10^{-3}$ Pa
Deuterium lamp	Wavelength: 120–200 nm; stability: 0.05%
Monochromator	Wavelength: 30–550 nm; spectral resolution: 0.1 nm
Dart	Diameter: 0.5 mm
Collimating system	Wavelength: 120–780 nm
Vacuum turntable	Precision: 0.05°

首先，氙灯光源经单色仪分光后会输出不同波长的单色光，这些单色光会将靶标处小孔照亮。然后，靶标经准直系统准直后会输出平行光束，并照射在放置于转台上的待测仪器上。最后，为了能测量垂直狭缝方向的响应变化，狭缝长度方向应与入射光线方向垂直且与转台转轴方向一致，通过旋转真空转台，仪器可接收到不同角度的准直光线。仪器光谱部分的放大率为 1，仪器焦距为 189 mm，测试狭缝宽度为 2.8 mm，此时在光谱维度  $0.85^\circ$  以内的响应变化，仪器均可测得。

### 4.2 测试过程及结果

开启氙灯光源，输出单色平行光束并照射到待测仪器上，以  $0.05^\circ$  转动角度旋转真空转台，即可获得光线在垂直狭缝方向不同角度下的响应图像。在总转动角度  $1^\circ$  内，共获得 20 幅不同入射角度下的仪器响应图像，仅展示了其中 9 幅图像的局部放大图，如图 5 所示，相应的入射角度分别为  $0.05^\circ, 0.15^\circ, 0.25^\circ, 0.35^\circ, 0.45^\circ, 0.55^\circ, 0.65^\circ, 0.75^\circ$  和  $0.85^\circ$ 。图 5 的每幅图像中，横向为垂直狭缝方向（光谱维方向），纵向为沿狭缝方向（空间维方向）。由于仪器接收的是准直光线，故像面光斑不是狭缝的像。此外，

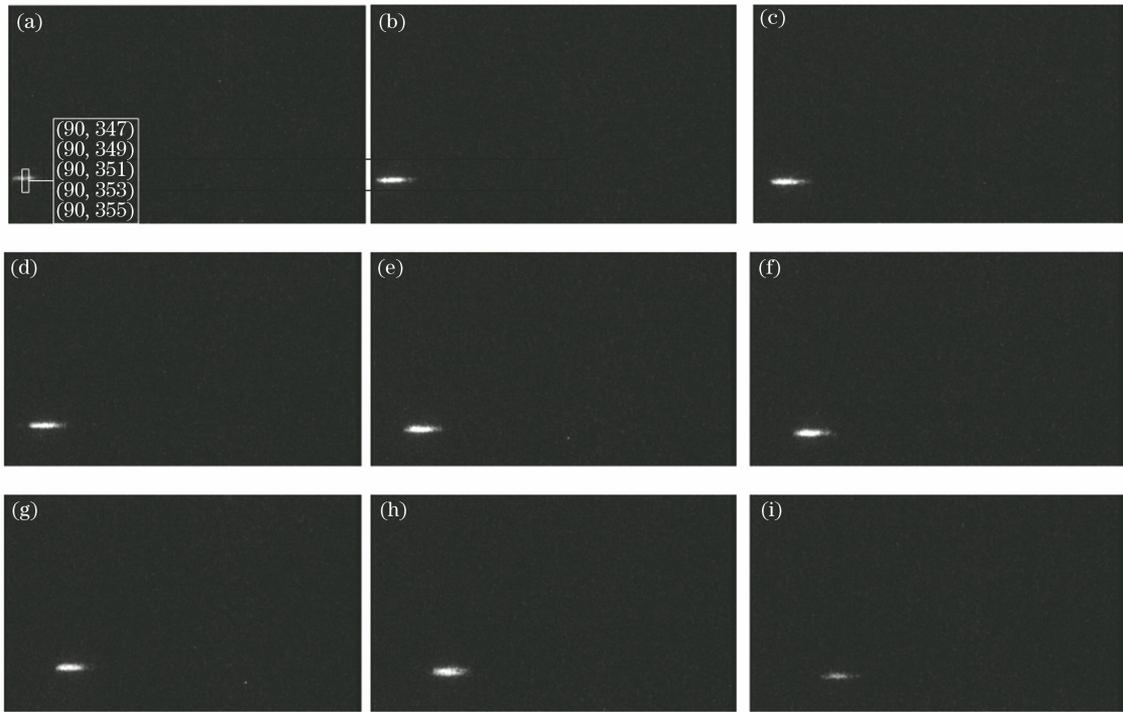


图 5 不同入射角度下的响应图像。(a) 0.05°; (b) 0.15°; (c) 0.25°; (d) 0.35°; (e) 0.45°; (f) 0.55°; (g) 0.65°; (h) 0.75°; (i) 0.85°

Fig. 5 Response images at different incident angles. (a) 0.05°; (b) 0.15°; (c) 0.25°; (d) 0.35°; (e) 0.45°; (f) 0.55°; (g) 0.65°; (h) 0.75°; (i) 0.85°

随着入射角度的变化,光斑沿着光谱维方向移动。

从图 5 中可以看出,探测器本底噪声会对目标信号造成一定的影响,故选取暗背景下的一个像元,绘制它在不同入射角度下的暗噪声响应曲线,如图 6 所示。如图 5 中矩形框所示,选取了像元序号为 (90, 347), (90, 349), (90, 351), (90, 353) 和 (90, 355) 的像元,其中 90 代表光谱维方向(横向)的像元位置,347, 349, 351, 353, 355 代表空间维方向(纵向)的像元位置。像元的选择应满足:1) 在各个入射角度下都有响应;2) 在像面光谱维位置一致,即横向位置一致。绘制上述 5 个像元在不同入射角度下的响应曲线,如图 7 所示。为消除背景噪声的影响,将每个像元的灰度值减去了响应噪声灰度值,并重新绘制响应曲线,如图 8 所示。从图 8 中可以看出,各个像元响应曲线趋势几乎一致。为了消除像元响应不一致和探测器时间噪声的影响,对各个像元灰度值求平均,平均后的响应曲线如图 9 所示。

仪器所设计的单个像元在垂直狭缝方向对应的角度为 0.85°,从图 9 中可以看出,仅在 0.3°~0.7°入射角范围内响应变化不明显,在该角度范围以外的响应变化明显。因此,需要根据测试得到的曲线对像元在垂直狭缝方向所对应的角度进行修

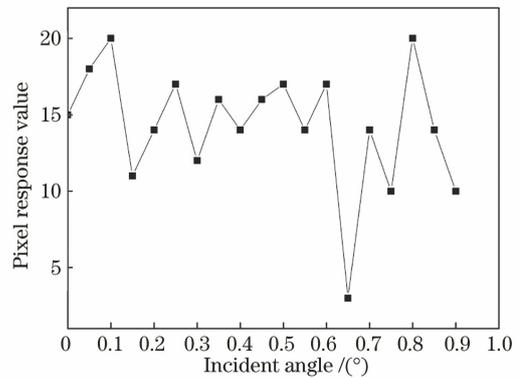


图 6 单个像元的噪声曲线

Fig. 6 Noise curve of single pixel

正。像元响应最大灰度值为 255,对不同角度像元灰度值进行归一化后的平均像元响应曲线如图 10 所示。根据公式  $\int Q_{i,\theta} d\theta$  对曲线进行积分,可以得到修正后像元对应的角度为 0.516°。因此,可以得到修正前后的立体角值

$$\begin{cases} \Omega = 4 \times \tan 0.85^\circ \times \tan 0.85^\circ = 8.8 \times 10^{-4} \\ \Omega_{\text{eff}} = 4 \times \tan 0.85^\circ \times \tan 0.516^\circ = 5.34 \times 10^{-4} \end{cases} \quad (17)$$

可以发现,修正后的立体角约为修正前立体角的 60%。

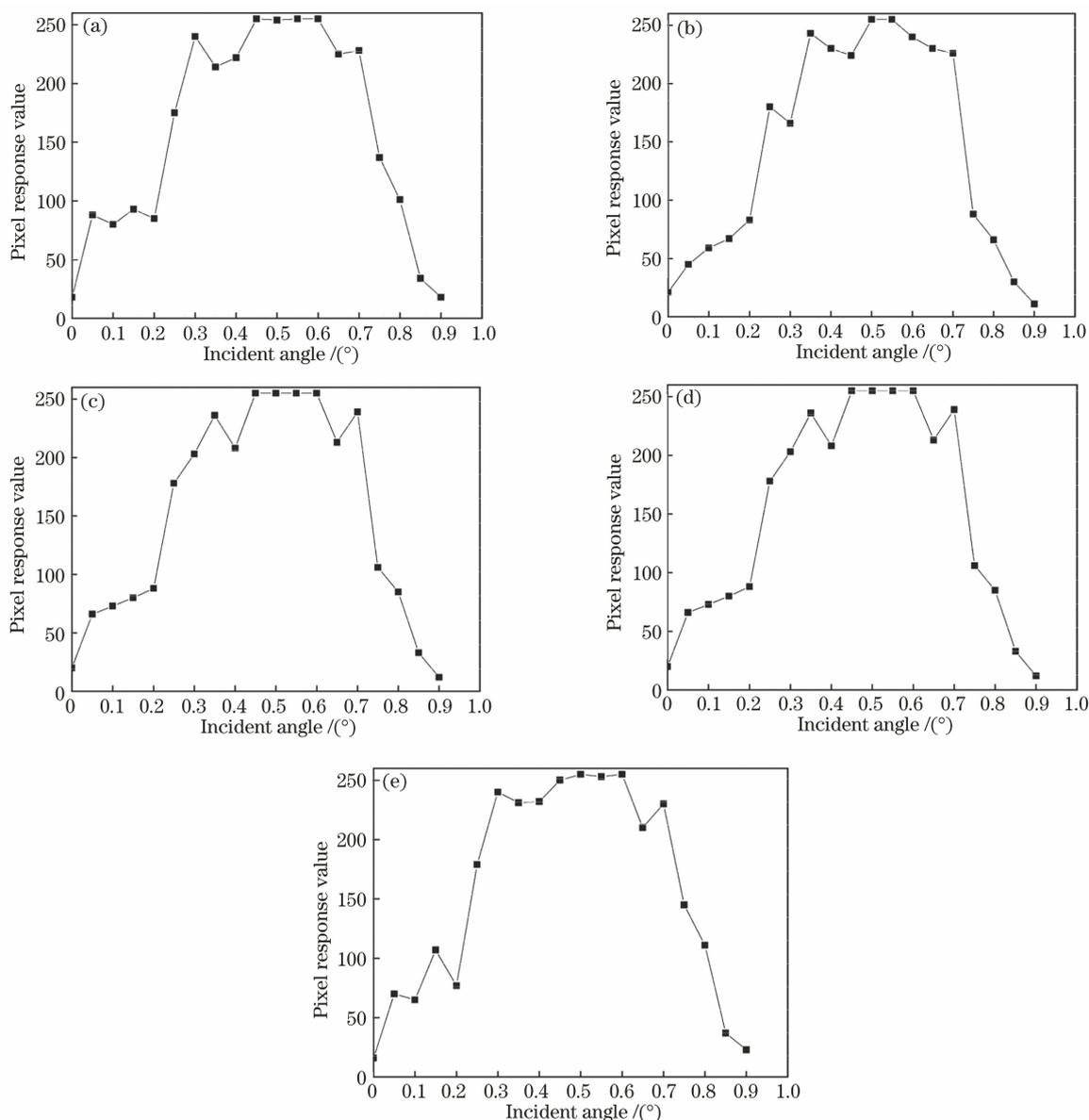


图 7 不同位置处的像元响应曲线。(a) (90,347);(b) (90,349);(c) (90,351);(d) (90,353);(e) (90,355)  
 Fig. 7 Pixel response curves at different positions. (a) (90,347); (b) (90,349); (c) (90,351);  
 (d) (90,353); (e) (90,355)

从(15)式中可以看出,像元有效立体角的值与最终的辐亮度定标系数呈线性关系,故本次修正对定标系数的转换非常关键,会直接影响仪器的辐射定标精度。若不进行此次修正,直接用设计值立体角进行系数的转换,将会引入 40% 的误差,这将大大影响目标辐亮度反演的精度。

## 5 结 论

针对将在轨恒星定标系数用于目标反演时会引入误差的问题,对定标系数间的转换进行了详细的推导,并给出了修正后的辐射定标系数公式。利用研制的远紫外高光谱成像光谱仪开展了地面辐射定

标实验,通过测试得到了仪器在垂直狭缝方向的响应变化情况,并根据测试结果计算出了修正后的像元立体角。根据国外同类型仪器的性能描述可知,仪器在垂直狭缝方向响应不均匀。实验结果表明,仪器在垂直狭缝方向 0~0.5° 范围内响应均匀,在 0.5°~0.85° 范围内响应不均匀,与国外文献描述基本相符。采用本文所推导的公式对定标系数修正后,可将目标反演精度提升 40%,故所提方法对提升在轨辐射定标精度有重要作用。然而,本仪器的探测器时间噪声偏大,故获取到的响应曲线不够平滑,后期拟更换性能更优的探测器进行补充试验,以获得更平滑的响应曲线。由于本次实验中没有尺寸

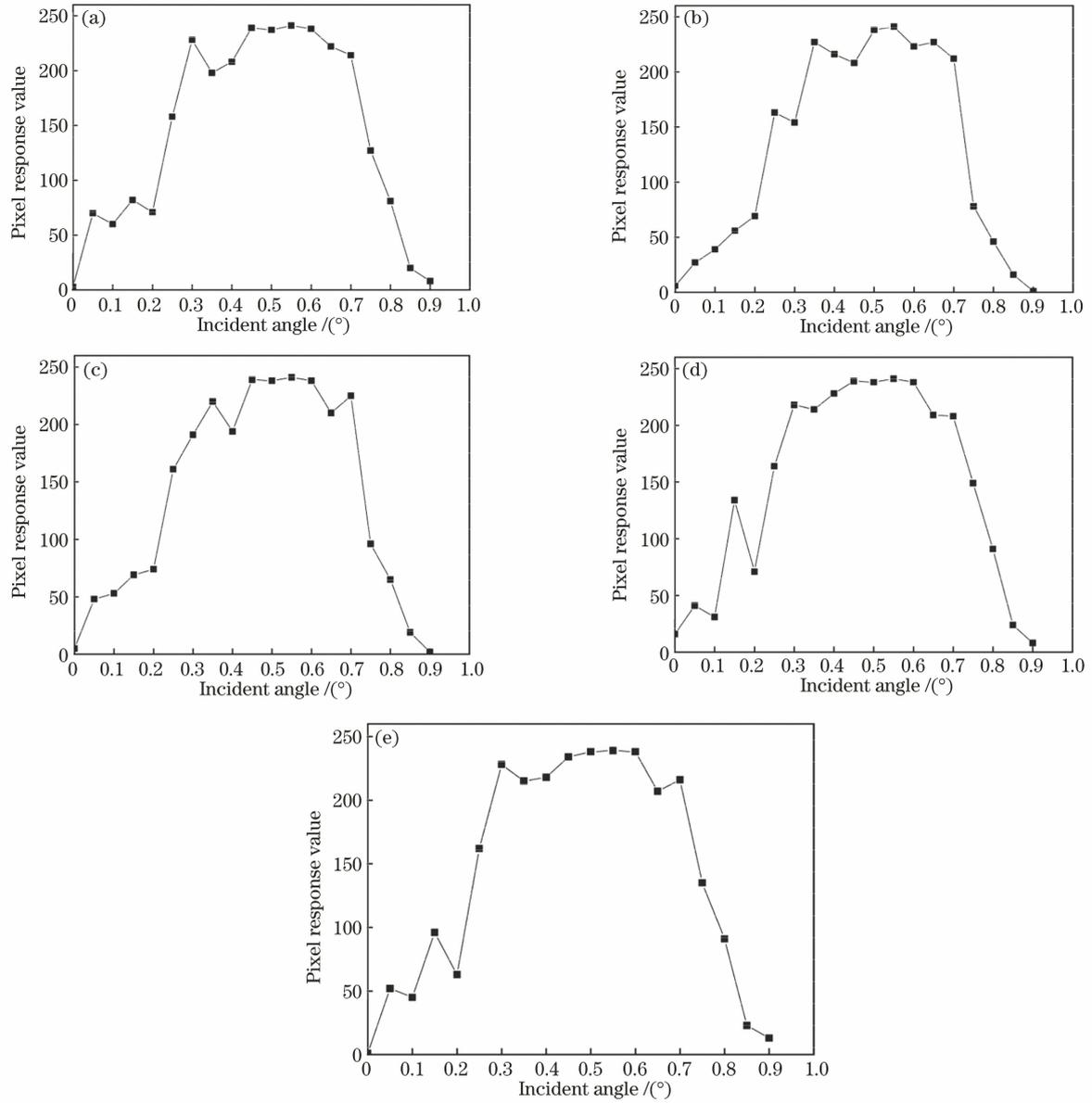


图 8 去除噪声后不同位置处的像元响应曲线。(a) (90,347);(b) (90,349);(c) (90,351);(d) (90,353);(e) (90,355)

Fig. 8 Pixel response curves at different positions after noise removal. (a) (90, 347); (b) (90, 349); (c) (90, 351); (d) (90, 353); (e) (90, 355)

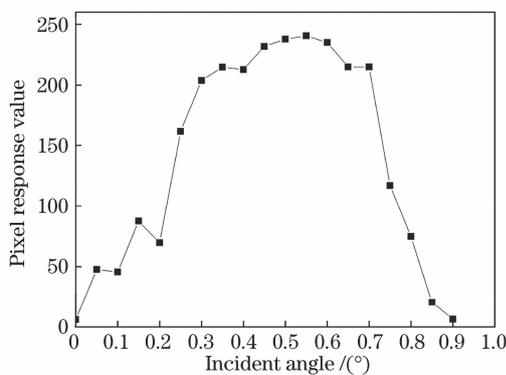


图 9 平均像元响应曲线

Fig. 9 Average pixel response curve

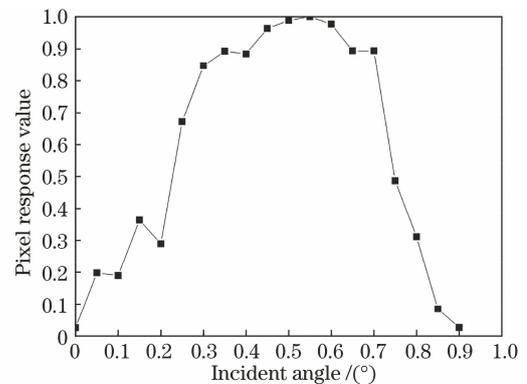


图 10 归一化后的平均像元响应曲线

Fig. 10 Average pixel response curve after normalization

合适的漫反射板,无法获得弥散光源,故无法开展地面辐亮度定标。后续将对设备进行完善,完成辐亮度定标实验,以对两种定标方式的偏差进行研究。本研究结果为同类型仪器在轨和地面辐射定标提供了重要的参考依据和方法。

### 参 考 文 献

- [1] Fu L P, Jia N, Hu X Q, et al. Research progress on on-orbit calibration technology for far ultraviolet payload [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(12): 3673-3680.  
付利平, 贾楠, 胡秀清, 等. 远紫外光学遥感载荷在轨定标技术研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(12): 3673-3680.
- [2] Xue Q S. Optical system design of a spaceborne broadband far ultraviolet hyperspectral imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0321001.  
薛庆生. 星载宽波段远紫外高光谱成像仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0321001.
- [3] Xue Q S. Optical system design of multi-model hyperspectral imager for spaced-based atmospheric remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0822005.  
薛庆生. 空间大气遥感高光谱成像仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0822005.
- [4] Chen W, Zheng Y Q, Xue Q S. Optical system design of airborne wide field-of-view hyperspectral imager [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(10): 1022001.  
陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 宽视场航空高光谱成像仪光学系统设计[J]. *光子学报*, 2014, 43(10): 1022001.
- [5] Wang Y M, Lang J W, Wang J Y. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010008.  
王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010008.
- [6] Humm D C, Paxton L J, Christensen A B, et al. Design and performance of the global ultraviolet imager (GUVI) [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3445: 2-12.
- [7] Humm D C, Ogorzalek B S, Elko M J, et al. Optical calibration of the Global Ultraviolet Imager (GUVI) [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3818: 78-89.
- [8] Morrison D, Paxton L J, Humm D C, et al. On-orbit calibration of the Special Sensor Ultraviolet Scanning Imager (SSUSI): a far-UV imaging spectrograph on DMSP F-16 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4485: 328-337.
- [9] Paxton L J, Christensen A B, Morrison D, et al. GUVI: a hyperspectral imager for geospace [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5660: 228-240.
- [10] Liang S L. Quantitative remote sensing of land surfaces [M]. Fan W J, Transl. Beijing: Science Press, 2009.  
梁顺林. 定量遥感[M]. 范闻捷, 译. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11] Li X, Zhang L M, Si X L, et al. Accuracy verification of on-board radiometric calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0928001.  
李鑫, 张黎明, 司孝龙, 等. 星上辐射定标精度验证方法研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 0928001.
- [12] Bowen H S. Absolute radiometric calibration of the IKONOS sensor using radiometrically characterized stellar sources [EB/OL]. [2021-04-01]. <https://www.isprs.org/proceedings/xxxiv/part1/paper/00000.pdf>.
- [13] Xie X S, Liu Y K, Liang H W, et al. Speckle correlation imaging: from point spread functions to light field plenoptics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111004.  
谢向生, 刘忆琨, 梁浩文, 等. 散斑相关成像: 从点扩展函数到光场全要素[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111004.