

紫外臭氧垂直探测仪高精度在轨光谱定标方法研究

李占峰^{1,2} 王淑荣¹ 黄煜¹ 于向阳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 100049)

摘要 为监测及修正紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)在发射以及在轨运行过程中的光谱位置的偏移,采用了一种全新的高精度在轨光谱定标方法。利用高分辨率参考光谱与仪器狭缝函数进行卷积,并将卷积结果与修正后的测量光谱进行匹配,建立了相关评价函数,计算参考光谱和测量光谱误差最小时的光谱偏移量。对于 SBUS,利用此方法定标得出的光谱偏移量为 0.10 nm。利用 SBUS 星上汞灯光谱验证了定标结果的最大误差为 0.01 nm,满足仪器指标要求。实验结果证明了高精度在轨光谱定标方法的可行性及精度。

关键词 遥感;在轨定标;光谱定标;狭缝函数;卷积

中图分类号 TP722.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0228002

Research on High-Accuracy in-Flight Spectral Calibration of the Solar Backscattered Ultraviolet Spectroradiometer

Li Zhanfeng^{1,2} Wang Shurong¹ Huang Yu¹ Yu Xiangyang¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A new high-accuracy spectral calibration is applied to monitor and correct spectral shift of solar backscattered ultraviolet spectroradiometer (SBUS) in launch and flight. A high-resolution reference spectrum is used to convolve with instrument's slit function. The convolved results is matched with corrected spectrum measured by SBUS, and evaluation function is founded to calculate the value of the spectral shift that minimizes the difference between reference and measured spectrum. For SBUS, the optimal spectral shift is 0.10 nm. Finally, the result is validated by standard spectrum of on-board mercury lamp and the maximal error is 0.01 nm, which meets instrument's requirements. The experimental results verify feasibility and precision of the high-accuracy spectral calibration.

Key words remote sensing; in-flight calibration; spectral calibration; slit function; convolution

OCIS codes 010.0280; 120.6200; 150.1488; 300.6320

1 引 言

紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)是风云三号卫星的主要载荷之一,是一台工作在 160~400 nm 波段的高性能扫描式光谱仪^[1]。它的主要任务是测量太阳紫外光谱辐照度及太阳后向散射紫外光谱辐亮度,进而反演臭氧总量垂直分布。SBUS 采用了

Ebert-Fastie 型光栅双单色仪结构以及精密步进电机-齿轮-凸轮-摆杆的高精度高可靠波长扫描驱动机构^[2],保证实现了高精度高线性的波长扫描探测;对特殊光学元件进行了抗冲击振动加固并配以星上汞灯光谱定标单元,保证了系统的波长稳定性及可靠性。

收稿日期: 2012-06-28; **收到修改稿日期**: 2012-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(41074126)资助课题。

作者简介: 李占峰(1986—),男,博士研究生,主要从事空间紫外遥感仪器在轨定标方面的研究。

E-mail: lizhanfeng115@163.com

导师简介: 王淑荣(1961—),研究员,博士生导师,主要从事空间紫外遥感方面的研究。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn (通信联系人)

SBUS在发射前进行了高精度的光谱定标和响应度定标^[3~7],但由于卫星发射过程中的冲击振动以及在轨运行中受恶劣空间环境的影响,仪器的光谱位置及响应度会生不同程度的变化,因此必须对仪器进行在轨定标^[8,9]。而在轨光谱定标是其他定标的前提和基础。目前常用的在轨光谱定标方法^[10~12]有仪器自带线谱灯法、利用太阳夫琅禾费谱以及大气吸收光谱方法。仪器自带线谱灯法及滤光片法需要增加设计在轨定标光路,尤其是需要增加运动部件,使得仪器的复杂程度及可靠性受到较大影响。而目前常用的太阳及大气吸收特征谱线法由于采用的分立的谱线数量有限,且分布不均匀,限制了光谱定标精度。

为克服以上在轨光谱定标方法的缺陷,采用了一种全新的高精度在轨光谱定标方法^[13]。此方法不需要额外定标装置,而且还能提高光谱定标精度。简介了高精度在轨光谱定标的方法,利用这种定标方法对SBUS进行光谱定标,利用星上汞灯光谱检验了定标结果,定标最大误差为0.01 nm。满足SBUS的光谱精度要求(0.05 nm)。从而验证了高精度在轨光谱定标方法的可行性并为后续仪器光谱定标的指导和参考。

2 定标方法简介

高精度在轨光谱定标方法需要已知的高分辨率的目标光谱作为参考光谱,将参考光谱与仪器的狭缝函数进行卷积,在仪器采集信号所占带宽内对将卷积后的参考光谱进行积分平均。最后将处理后的参考光谱与测量光谱进行匹配,得到两者差别最小的光谱位置变化值,即完成仪器光谱定标。

2.1 参考光谱的处理

高精度在轨光谱定标对参考光谱的绝对幅值要求不高,只要求参考光谱的相对分布,因为绝对幅值的误差可通过对测量光谱的处理来消除。参考光谱可通过软件模拟得到,也可由国际公认的高精度高分辨率仪器测得的光谱,设为 $S(\lambda)$ 。

狭缝函数是指光谱仪的入射狭缝在出射狭缝或探测器上的单色像分布。对于大部分光谱仪来说,当狭缝宽度一定时,狭缝函数为高斯型函数^[14]。所以归一化的狭缝函数形式为

$$f(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中 σ 为与函数半峰全宽(HWFM)相关的一个参数,而HWFM为 $\sqrt{8\ln 2}\sigma$ 。

参考光谱通过光谱仪狭缝的作用在函数运算上等效于参考光谱与光谱仪狭缝函数卷积^[15],即

$$S'(\lambda) = S(\lambda) * f(\lambda). \quad (2)$$

光谱仪输出的信号是离散信号,每一个信号值都是一定带宽内的光谱作用的结果,因此对卷积后的参考光谱进行信号带宽内的积分平均,即在每个信号值的带宽内积分并除以带宽。于是,对作用于第 j 个信号的参考光谱处理为

$$S''(\lambda_j) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_j - \Delta\lambda/2}^{\lambda_j + \Delta\lambda/2} S'(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

式中 λ_j 为第 j 个信号值的中心波长, $\Delta\lambda$ 为每个信号所占带宽。联合(1)式~(3)式得到处理后的参考光谱为

$$S''(\lambda_j) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_j - \Delta\lambda/2}^{\lambda_j + \Delta\lambda/2} S(\lambda) * \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right] d\lambda. \quad (4)$$

2.2 光谱定标形式

对于一般光谱仪器来说,波长定标公式可采用多项式形式,而4次多项式已经可以保证光谱定标高精度要求。假设光谱仪的初始定标公式为

$$\lambda(j) = a_4 j^4 + a_3 j^3 + a_2 j^2 + a_1 j + a_0. \quad (5)$$

仪器工作一段时间后,光谱位置发生了变化,为了便于数据处理及满足精度要求,可采用两个参数表征光谱位置变化:光谱平移 α 和光谱伸缩 β 。变化后的光谱定标公式为

$$\lambda'(j) = a_4 j^4 + a_3 j^3 + a_2 j^2 + (a_1 \beta) j + (a_0 + \alpha). \quad (6)$$

因此光谱变化量为 $a_1(\beta - 1)j + \alpha$,当 $\beta = 1, \alpha = 0$ 时,表明仪器光谱位置没有变化。

本文所采用的光谱定标方法就是通过仪器得到的测量光谱以及参考光谱进行匹配,建立评价函数

$$\chi^2(\alpha, \beta) = \frac{1}{N-2} \sum_{j=1}^N \left[\frac{G(j) - S(j, \alpha, \beta)}{G(j)} \right]^2, \quad (7)$$

式中 $G(j)$ 为光谱仪在波长 $\lambda(j)$ 处的辐射值, N 为光谱总数, $S(j, \alpha, \beta)$ 为参考光谱在波长 $\lambda'(j)$ 处的辐射值。

计算出优化函数 χ^2 最小(即测量光谱和参考光谱差别最小)时的 α 和 β ,再利用(5)式,就可得到仪器定标后的光谱公式。

2.3 测量光谱的处理

由仪器的输出信号和仪器响应度可求出测量的目标光谱,但仪器的测量光谱的幅值和参考光谱的幅值存在一定差别。如果这个差别大到一定程度

时,幅值差别引入的误差远大于波长不匹配引入的误差,此时通过使(7)式最小而求得的 α 和 β 是不正确的,光谱定标就没意义了。

因些在进行(7)式处理前,应对仪器测量光谱进行处理,使它的各波长的幅值与参考光谱尽可能的一致。首先,用参考光谱 $S(i)$ 除以测量光谱 $G(i)$,进而对结果进行多项式拟合,即

$$\frac{S(i)}{G(i)} \xrightarrow{\text{fit}} t(i), \quad (8)$$

式中 $t(i) = \sum_{m=0}^n c_m i^m$ 为 n 次多项式。

因此,处理后的测量光谱为

$$G'(i) = t(i)G(i). \quad (9)$$

将处理后的测量光谱代入(7)式,通过数据处理,求得评价函数最小时的 α 和 β ,再根据(5)式,就可得到仪器当前的光谱公式,进而完成光谱定标。

3 对 SBUS 进行光谱定标及结果验证

因为 SBUS 测量的是 160~400 nm 波段的太阳光谱辐照度,采用国际上公认的太阳光谱此波段的辐照度值作为参考光谱^[16]。如图 1 所示,取值间隔为 0.06 nm,光谱分辨率为 0.1 nm,小于 SBUS 的光谱分辨率(1.0 nm)一个量级。如图 1 所示,由于 160~280 nm 波段的太阳辐照度值很低,而 360~400 nm 波段的太阳辐照度值起伏较大,所以本文的光谱定标波段为 300~360 nm。

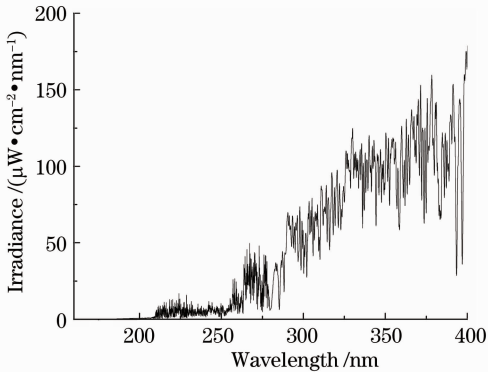


图 1 在 160~400 nm 波段太阳光谱辐照度分布
Fig. 1 Solar spectral irradiance in 160~400 nm

3.1 参考光谱的处理

SBUS 的归一化狭缝函数为

$$f(\lambda) = \frac{1}{0.4756 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{0.4524}\right]. \quad (10)$$

将参考光谱与归一化狭缝函数进行卷积,原参考光谱与卷积后的光谱如图 2 中的两种虚线所示,并根据地面光谱定标(10)式和光谱取样(3)式对卷

积后的参考光谱进行带宽 $\Delta\lambda = 1$ nm 内的积分平均,得到处理后参考光谱,如图 2 中的实线。

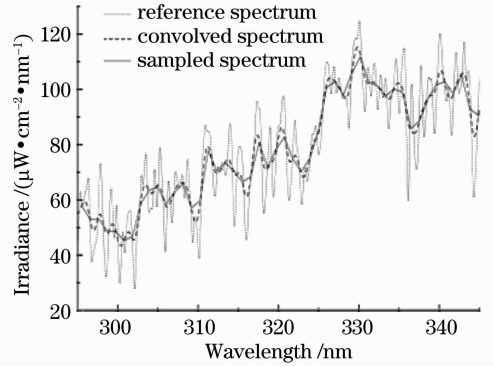


图 2 处理后的参考光谱

Fig. 2 Reference spectrum after treatment

3.2 光谱定标形式

由于 SBUS 采用了步进电机-齿轮-凸轮-摆杆的高精度高可靠波长扫描驱动机构,通过将凸轮廓线设计及精密加工成由两个不同斜率的线性段,从而保证了 SBUS 在 160~400 nm 的太阳光谱辐照度测量范围的光谱定标公式为一次多项式。

SBUS 在发射前进行了实验室光谱定标,使用氙灯和 1.5 m 单色仪构建了光谱定标源,并配合汞灯光谱,采用一次定标公式,定标精度达到 ± 0.04 nm。定标结果为

$$\lambda(j) = 0.21j + 159.79, \quad j = 1, 2, \dots, 1144 \quad (11)$$

式中 j 为与波长对应的步进电机从波长零位起算走过的步数。

由于认为凸轮廓线的线性段的斜率是不会改变的,所以只采用光谱平移 α 来表征 SBUS 光谱位置的偏移,而光谱伸缩 $\beta=1$,变化后的光谱定标公式为

$$\lambda'(j) = 0.21j + 159.79 + \alpha. \quad (12)$$

3.3 测量光谱的处理

由 SBUS 测得的 300~340 nm 波段太阳光谱辐照度与取样后的参考光谱如图 3 所示。由图 3 可知,测量参考光谱和参考光谱的照度值差别较大,所以对将两者比值进行多项式拟合,在根据(9)式可得到处理后的测量光谱,如图 3 中的所示。多项式拟合参数为

$$\begin{aligned} c_4 &= 4.0304 \times 10^{-7}, & c_3 &= -4.4236 \times 10^{-5}, \\ c_2 &= 1.5651 \times 10^{-3}, & c_1 &= -2.0381 \times 10^{-2}, \\ c_0 &= 9.8770 \times 10^{-1}. \end{aligned}$$

将处理后的参考光谱和测量光谱代入(7)式得

$$\chi^2(\alpha) = \frac{1}{49-2} \sum_{j=1}^{49} \left[\frac{G'(\lambda_j) - S''(\lambda_j + \alpha)}{G'(\lambda_j)} \right]^2, \quad (13)$$

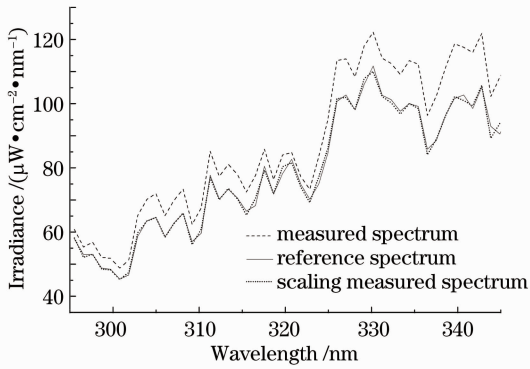


图 3 处理后的测量光谱图

Fig. 3 Measured spectrum after treatment

通过 Matlab 软件编程实现上述计算过程,得到 χ^2 与 α 的关系如图 4 所示。

如图 4 所示当 $\alpha = 0.10$ nm 时,得到 χ^2 的最小值为 0.00314。所以 SBUS 的波长位置偏移了 0.10 nm,得到修正后光谱如图 5 所示,定标结果为

$$\lambda'(j) = 0.21j + 159.79 + \alpha = 0.21j + 159.89. \quad (14)$$

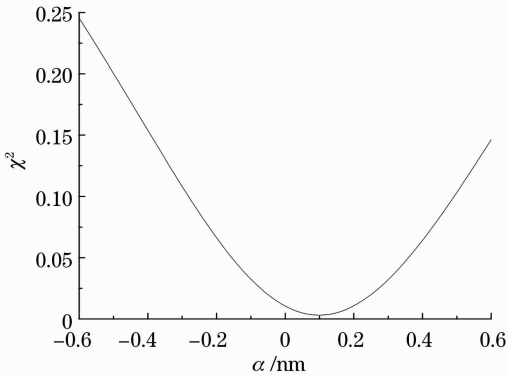


图 4 χ^2 与 α 的关系

Fig. 4 Relation between χ^2 and α

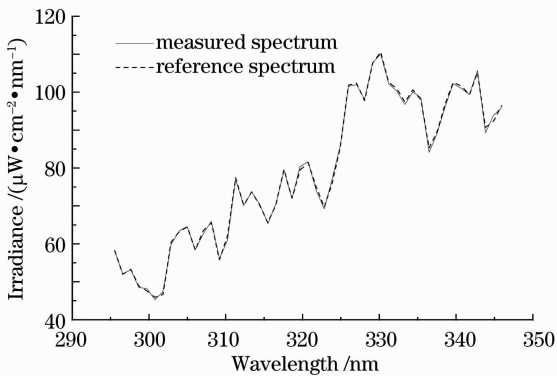


图 5 光谱定标后的测量光谱与参考光谱

Fig. 5 Reference and measured spectrum after spectral calibration

3.4 星上汞灯光谱验证定标精度

为了监测仪器在轨光谱变化,SBUS 装有定标汞灯,每月进行一次光谱定标。当 SBUS 进入轨道阴影后,开启汞灯、预热,标准漫射板移入光路,分别测量汞灯在真空下的四条谱线:184.950、253.728、296.815、365.120 nm。利用 SBUS 扫描汞灯四条谱线,通过高斯拟合找到每条谱线的峰值位置,再利用修正后的光谱定标(13)式得到测量的汞灯谱线,得到结果如表 1 所示。

表 1 对 SBUS 进行高精度光谱定标方法的定标误差

Table 1 Calibration error of the high-accuracy spectral calibration of SBUS

Standard wavelength /nm	Wavelength after the calibration		Error /nm
	Position of peak	Wavelength /nm	
184.950	119.3	184.943	0.007
253.728	446.8	253.718	0.01
296.815	652.0	296.81	0.005
365.120	977.3	365.123	-0.003

由表 1 可知,利用参考光谱对 SBUS 进行光谱定标后测得的汞灯谱线与标准谱线的最大误差为 0.01 nm,而 SBUS 要求的波长精度为 0.05 nm,因此满足仪器指标要求。

4 结 论

使用了一种利用参考光谱对仪器进行光谱定标的新方法,并利用此方法对 SBUS 进行了在轨光谱定标。定标结果表明,由于发射冲击振动等原因,SBUS 波长偏移了 0.10 nm。然后通过 SBUS 的星上汞灯光谱验证了高精度在轨光谱定标结果,得到方法最大误差为 0.01 nm,满足 SBUS 的指标要求。实验结果证明了高精度在轨光谱定标方法的可行性,并为其他光谱仪的光谱定标提供了借鉴和参考。

参 考 文 献

- 1 Wang Shurong, Li Futian, Song Kefei *et al.*. Ultraviolet ozone vertical profile probe for FY-3A meteorological satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2590~2593
王淑荣,李福田,宋克非等. FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2590~2593
- 2 Lin Xuesong, Wang Shurong, Li Futian. Analysis of wavelength mechanism accuracy for the double model ultraviolet spectroradiometer[J]. *Optical Instruments*, 2007, **29**(5): 55~59
林雪松,王淑荣,李福田. 双模式紫外光谱辐射计的波长机构精度分析[J]. *光学仪器*, 2007, **29**(5): 55~59
- 3 Li Guanyu. Analysis of wavelength accuracy and study on new wavelength calibration method for ultraviolet ozone vertical probe [J]. *Chinese J. Science Instrument*, 2010, **31**(12): 2668~2674

- 林冠宇. 紫外臭氧垂直探测仪波长精度分析与波长定标新方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(12): 2668~2674
- 4 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Wu Jun *et al.*. Study on spectral calibration of a novel interferometric spectrometer with super-resolution capability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0528002
- 施海亮, 方勇华, 吴军等. 新型超分辨干涉型光谱仪光谱定标研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 0528002
- 5 Zheng Yuquan. Precise spectral calibration for hyperspectral imager[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(11): 2347~2354
- 郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(11): 2347~2354
- 6 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Futian *et al.*. Study on calibration method of spectral irradiance responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1816~1821
- 张振铎, 王淑荣, 李福田等. 空间紫外遥感仪器光谱辐照度响应度定标方法研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1816~1821
- 7 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu. Spectral irradiance calibration research of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer in air/vacuum conditions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0101004
- 杨小虎, 王淑荣, 黄煜. 大气/真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度定标研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0101004
- 8 J. Skupin, S. Noël, M. W. Wuttke *et al.*. In-flight calibration of the sciamachy solar irradiance spectrum[J]. *Adv. Space Res.*, 2003, **32**(11): 2129~2134
- 9 Q. P. Remund, D. Newell, T. v. Dodriguez *et al.*. The ozone mapping and profiler suite (OMPS): on-orbit calibration design [C]. *SPIE*, 2004, **5652**: 165~173
- 10 E. P. Davenport. Improved hollow cathode light sources for calibration in the ultraviolet and visible visible spectrum for satellite-based instrument[C]. *SPIE*, 1999, **3818**: 64~68
- 11 Ye Zhao, Ren Jianwei, Li Xiansheng *et al.*. Screening device for LED as spaceborne calibration light source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(1): 64~71
- 叶钊, 任建伟, 李宪圣等. 用于星上定标光源的LED筛选装置[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(1): 64~71
- 12 L. Guanter, R. Richter, J. Moreno. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(10): 2360~2370
- 13 J. H. G. M. Van Geffen, R. F. Van Oss. Wavelength calibration of spectra measured by global ozone monitoring experiment by use of a high-resolution reference spectrum[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(15): 2739~2753
- 14 P. C. Von Planta. Experimental study of the slit function of an Ebert spectrometer in the visible and near-infrared[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1957, **47**(7): 629~631
- 15 H. J. Kostkowski, A. M. Bass. Slit function effects in the direct measurement of absorption line half-widths and intensities [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1956, **46**(12): 1060~1064
- 16 G. Thuillier, M. Herse, D. Labs *et al.*. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the solspec spectrometer from the atlas and eureka missions [J]. *Solar Physics*, 2003, **214**: 1~22

栏目编辑：李文喆