

文章编号 1004-924X(2010)06-1271-07

地外太阳紫外光谱测量

王淑荣¹,李福田¹,宋克非¹,王立朋¹,汪龙祺¹,林冠宇¹,

黄煜¹,刘海波¹,曲艺¹,黄富祥²,王维和²

(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. 中国气象局 国家卫星气象中心,北京 100081)

摘要:介绍了我国自主研发的用于地外太阳紫外光谱测量的FY-3紫外臭氧垂直探测仪,利用该仪器成功获得了地外太阳紫外光谱数据。该紫外臭氧垂直探测仪是一台结构紧凑,工作波段为160~400 nm的紫外-真空紫外光谱辐射仪。报导了该探测仪的组成和工作原理,描述了它的3种工作模式,即大气模式、太阳模式和标准灯模式。介绍了太阳模式下该探测仪的光谱辐照度定标,受光源性能所限,光谱辐照度定标分160~300 nm和250~400 nm两个波段进行。最后,给出了利用紫外臭氧垂直探测仪获得的太阳紫外光谱和数据处理结果。结果表明,利用该探测仪在轨获得的160~400 nm太阳连续光谱和250~340 nm间12个特征波长的太阳分立光谱与美国SBUV/2获得的测量数据的一致性在±5%以内。

关键词:紫外臭氧垂直探测仪;紫外光谱;太阳光谱

中图分类号:TP73 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101806.1271

Measurement of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum

WANG Shu-rong¹, LI Fu-tian¹, SONG Ke-fei¹, WANG Li-peng¹, WANG Long-qi¹, LIN Guan-yu¹,

HUANG Yu¹, LIU Hai-bo¹, QU Yi¹, HUANG Fu-xiang², WANG Wei-he²

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,*

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. National Satellite Meteorologic Center, Chinese Meteorologic Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The Ultraviolet Ozone Vertical Profile Probe (UOVPP) on FY-3A meteorological satellite developed by our country is introduced for measuring the extraterrestrial solar ultraviolet spectra, and the spectral irradiance data are obtained by the probe successfully. The UOVPP is a compact UV-VUV spectral radiometer worked at 160~400 nm. The composition and principle of the probe are reviewed and three kinds of working modes, namely, atmospheric mode, solar mode, and standard lamp mode, are described. Furthermore, the spectral irradiance calibration of the probe under the solar mode is introduced, which is carried out at 160~300 nm and 250~400 nm respectively owing to the limitation of source characteristics. Finally, the solar ultraviolet spectrum captured by the UOVPP and processed data are given. It is shown that the solar continuous spectrum at 160-400 nm and solar

收稿日期:2008-10-29;修订日期:2008-12-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40775024)

discrete spectrum of 12 characteristic wavelengths at 250–340 nm measured from UOVPP on orbit are in good agreement with those from SBUV/2, and their measurement uncertainty is within $\pm 5\%$.

Key words: Ultraviolet Ozone Vertical Profile Probe(UOVPP); ultraviolet spectrum; solar spectrum

1 引言

太阳紫外光谱及其随时间的变化对研究地球大气层中的光电离和动力学过程以及地球气候和环境的变化,进而对太阳物理、大气物理、气候学、环境学等科学研究均有重要价值。

近年来,随着空间技术的发展,太阳紫外光谱研究日益活跃,大量的测试结果给出了地外太阳紫外光谱及其随时间的变化,为太阳物理、高层大气物理和气候学研究提供了资料。但由于测试方法和仪器精度的限制,数据分散较大(至 80 年代约 25%),提高精度的测试也在不断进行。80 年代美国国家宇航局 Goddard 空间飞行中心研制了太阳后向散射紫外光谱辐射计(BUV 和 SBUV),取得了 160~400 nm 太阳紫外光谱辐照度数据^[1]。90 年代初美国海军研究实验室研制成功太阳紫外光谱监视器(SUSIM),美 Colorado 大学研制成功太阳与恒星辐照度比对实验装置(SOLSTICE),并搭载于上层大气研究卫星(UARS)进行了太阳紫外光谱观测^[2-3]。本世纪初美国 Colorado 大学研制成功光谱辐照监视器(SIM),搭载于 SORCE 卫星进行了宽波段(0.2~2.0 μm)、高精度太阳光谱辐照度测量^[4]。在 SORCE 上还有太阳与恒星辐照度比对实验装置(SOLSTICE),用于 115~400 nm 波段的光谱测量。

长春光机所 21 世纪初开始研制紫外臭氧垂直探测仪,该探测仪已于 2008 年 5 月搭载 FY-3 气象卫星发射升空。这是一台小型化、高精度紫外光谱辐射计,已获取了 160~400 nm 太阳紫外光谱辐照度数据。本文报导 FY-3 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪的结构、工作原理、工作模式、太阳模式下辐射定标及地外太阳光谱测试结果。

2 结构及工作原理

FY-3 紫外臭氧垂直探测仪(如图 1 所示),是一台能在 160~400 nm 波段测量大气绝对光谱辐照度和太阳绝对光谱辐照度的扫描式光谱辐

射计,它由探测头部和电箱两部分组成。仪器主要性能指标如表 1 所示。紫外臭氧垂直探测仪光学系统由汞灯波长定标光源、漫反射器、消偏器、调制器、Ebert-Fastie 光栅双单色仪、光电倍增管探测器及云层光度计组成,见图 2。



图 1 紫外臭氧垂直探测仪

Fig. 1 UV ozone vertical profile probe

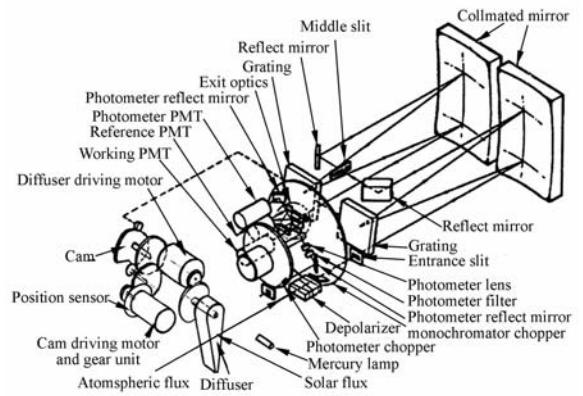


图 2 紫外臭氧垂直探测仪光学系统图

Fig. 2 UOVPP optical system layout

光栅双单色仪由球面准直-聚光镜,平面和屋脊转向镜,光栅及入射、出射和中间狭缝组成。为使结构紧凑、色散相加,亦为使两个单色仪的光栅可同轴驱动,在两个单色仪之间采用了屋脊反射镜和平面镜进行光学传递。单色仪球面准直-聚光镜焦长 250 mm,视场角为 $11.3^\circ \times 11.3^\circ$,镜表面镀 Al+MgF₂ 膜。光栅刻线面积为 52 mm × 52 mm,刻线密度为 2 400 l/mm,表面镀 Al+MgF₂ 膜。入射光通过光调制器,经光栅双单色仪色散,形成单色光,又经单色仪后狭缝出射,经

后置交叉反射镜和成像镜分别投射到主光路探测器和参考探测器。探测器为光电倍增管,引进参考探测器作为备份,提高可靠性;同时作为参考,修正探测器可能出现的微小增益漂移。步进电机经齿轮传动系统转动凸轮,凸轮推动与光栅相联的摆杆进而转动光栅,实现波长扫描。对波长扫描机构中的轴承、齿轮、凸轮和滚轮进行了防冷焊处理,防冷焊膜层耐磨、抗冲击并有一定的润滑作用。

紫外臭氧垂直探测仪安装在 FY-3 卫星平台上,仪器光轴指向地心,有 3 种主要工作模式:

大气模式:部分偏振的太阳后向散射辐射经两楔形晶体石英制成的消偏器后成为非偏振辐射,经光栅双单色仪色散,不同波长的单色辐射依次通过后狭缝和后置光学系统,由探测器-放大器转变为太阳后向散射紫外光电光谱,完成 250~340 nm 间 12 个特征波长处太阳后向散射紫外光谱辐射亮度测量。

太阳模式:在便于进行太阳观测的极地区域,漫反射器移入光路,太阳辐射在与仪器光轴垂直方向经过漫反射器、消偏器进入臭氧垂直探测仪,完成 160~400 nm 波段太阳连续光谱辐照度测量及 250~340 nm 间 12 个特征波长处太阳分立光谱辐照度测量。

标准灯模式:在两轨光照区,分别对两漫反射器^[5](工作漫反射器和偶尔使用的参考漫反射器)进行太阳连续谱测量比对;期间在阴影区汞灯通电,完成汞灯光谱测量。标准灯模式主要进行仪器波长定标及漫反射器双向反射率(BRDF)变化监测。

用来监测云层覆盖情况的云层光度计独立于单色仪系统,由光学调制器、石英透镜组、滤光片、光电倍增管探测器组成,视场角 $11.3^{\circ} \times 11.3^{\circ}$ 。

入射光经调制器,视场光阑,又经石英三透镜系统,中间经滤光片,最后由光电倍增管接收。滤光片中心波长为 379 nm,带宽为 3 nm。在单色仪进行大气或太阳 12 个分立谱测量的同时,光度计在 379 nm 波长处完成 12 次云量监测。

电子学系统由 3 路高压电源、3 路弱信号处理单元、2 路步进电机驱动器、参考信号发生器、汞灯电源、单片机控制单元和 1553B 通讯接口部分组成,见图 3。电子学系统采用数字同步累加解调法^[6]完成 10^6 动态范围的信号测量。弱信号处理单元将接收的太阳辐射和大气后向散射辐射转换成具有一定信噪比并可由单片机进行采集的数字光谱信号,以单片机为核心的系统控制单元与 1553B 通讯接口相配合完成仪器控制,工作模式转换以及与数据管理系统的信息交换和数据传输。电控系统可实现 3 个通道信号的同步并行测量,以“数据注入”方式接收地面命令,以“科学数据包”的形式下传测量数据。

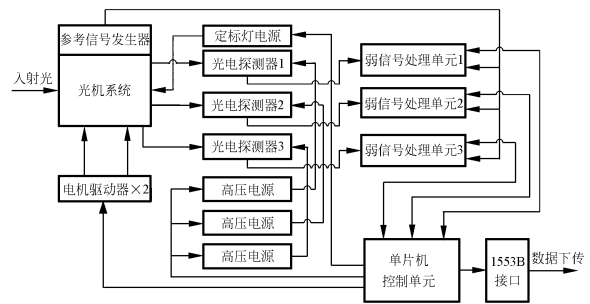


图 3 紫外臭氧垂直探测仪电系统方框图

Fig. 3 Layout of electrical system in UOVPP

由太阳模式数据得到地外太阳紫外光谱辐照度,由大气模式数据得到太阳后向散射紫外光谱辐亮度,由太阳模式和大气模式数据反演得到地球大气层臭氧垂直廓线。

表 1 FY-3 紫外臭氧垂直探测仪的主要性能指标

Tab. 1 Specifications of FY-3 UOVPP

项目	技术指标	项目	技术指标
工作波段/nm	160~400	动态范围	4×10^6
波长重复性/nm	0.01	最小可测光谱辐照度响应度(160 nm)	$0.05 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$
波长精度/nm	0.03	最小可测光谱辐亮度响应度(252 nm)	$1.2 \times 10^{-4} \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
光谱带宽/nm	1.03~1.08	重量	34 kg
光谱杂光	2×10^{-6}	功耗	31 W

3 仪器光谱辐照度响应度定标

光谱辐照度定标装置由干式泵、低温泵抽真空的无油真空室(真空度约 10^{-6} Pa)、仪器台架和标准光源组成。标准灯穿过真空室窗口直接照明仪器前置漫反射板,进行仪器飞行前光谱辐照度响应度地面定标。由于光源性能所限,光谱辐照度定标需分 160~300 nm 和 250~400 nm 两个波段进行。160~300 nm 光谱辐照度定标采用德国物理研究院(PTB)标准氙灯^[7-9]作光源,由稳定性好于 $\pm 0.05\%$ 直流稳流电源供电,工作电流

300 mA。250~400 nm 光谱辐照度定标采用美国国家标准技术研究院(NIST)光谱辐照度标准石英卤钨灯作光源,工作电流为 8.5 A,由稳定性好于 $\pm 0.05\%$ 的直流稳流电源供电。

仪器光谱辐照度响应度可以表示为:

$$R_E(\lambda) = \frac{E_W(\lambda)}{V_W(\lambda)}, \quad (1)$$

式中: $E_W(\lambda)$ 为光谱辐照度标准灯在仪器漫反射器处的光谱辐照度值; $V_W(\lambda)$ 为紫外臭氧垂直探测仪对标准灯的读出值。仪器光谱辐照度响应度定标误差由仪器读数误差和标准灯不确定度组成,见表 2。

表 2 160~300 nm 和 250~400 nm 光谱辐照度响应度定标精度

Tab. 2 Spectral irradiance calibration uncertainties from 160–300 nm and 250–400 nm

项 目	相对扩展不确定度	
	160~300 nm	250~400 nm
仪器读数误差	1.4%	1.0%
PTB30W 光谱辐照度标准氙灯(含电源不稳定性)	3.5%	/
NIST1000W 光谱辐照度标准石英卤钨灯(含电源不稳定性)	/	1.6%
总 计	3.8%	1.9%

由仪器光谱辐照度 $R_E(\lambda)$ 响应度和极地上方在星上测得的太阳模式下仪器读出值 $V_E'(\lambda)$, 得到待测太阳光谱辐照度为:

$$E(\lambda) = R_E(\lambda) \times V_E'(\lambda) \times \sigma(\lambda, t) \times \eta(\lambda, \alpha, \beta) \times I(i, j) \times L(v), \quad (2)$$

其中, $\sigma(\lambda, t)$ 为工作漫反板与参考漫反板输出之比,用于修正工作漫反板在轨测量期间由于长期辐照引起的反射率衰减; $I(i, j)$ 为换档比,包括光电倍增管高压换档(i 为 900 V 和 1 500 V),静电计放大器换档(j 为 10^{-6} A, 10^{-7} A 和 10^{-8} A 档),用换档比将数据统一到 900 V 和 10^{-6} A 档; $L(v)$ 为光电倍增管探测器系统非线性修正系数,用于修正发生在 1 500 V, 10^{-8} A 档读数的非线性; $\eta(\lambda, \alpha, \beta)$ 为仪器光谱辐照度响应度随入射光方向的变化因子, α 为入射光和轨道平面夹角, β 为轨道平面内入射光和仪器光轴夹角。

太阳模式下紫外臭氧垂直探测仪在极地上方(轨道高度约 800 km)测量一幅光谱图约需 3 min(包括波长扫描机构回零时间),在此期间,由于仪器随卫星沿轨道做圆周运动,太阳在轨道平面和

仪器光轴夹角 α 不断变化($-4^\circ \sim +14^\circ$);由于季节,太阳和轨道平面夹角 β 也逐渐变化($+12^\circ \sim +39^\circ$)。测量期间太阳在仪器漫反射器上的入射角在变化,因此需要确知仪器光谱响应度的方向特性。太阳模式下,太阳光线经前置漫反射器、经消偏器进入仪器。漫反射器由铝板研磨制成,其双向反射率按余弦特性变化。因此,仪器响应随太阳入射角大略按余弦特性变化,即仪器光谱辐

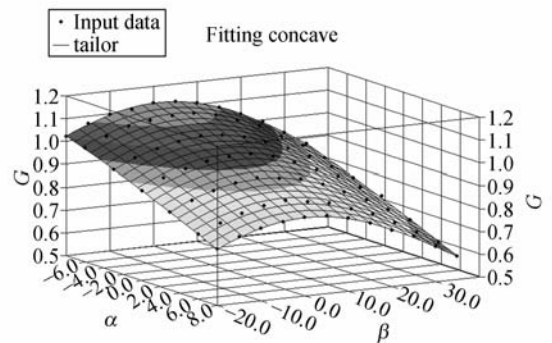


图 4 光谱辐照度响应度随角度变化的拟和曲面
Fig. 4 Fitting curved face for solar ultraviolet spectral irradiance responsivity with angle

照度响应度随角度大略按余弦特性变化。为准确给出这一变化值,建立了紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度响应度方向特性测试装置,实测了仪器光谱辐照度响应度随角度的变化,即 $\eta(\lambda, \alpha, \beta)$ 。该装置由氙灯光源、平面反射镜、球面准直镜、二维转台、二维转台的步进电机驱动系统及安装在二维转台上的紫外臭氧垂直探测仪组成^[10]。图 4 给出了 310 nm 处光谱辐照度响应度随角度变化的泰勒级数拟和曲面。测量数据经两个四阶泰勒级数拟合形成 $\eta(\lambda, \alpha, \beta)$, 拟合公式为:

$$\eta(\lambda, \alpha, \beta) = G_{\text{fit}}(\alpha, \beta) \cdot G_{\text{wave}}(\lambda, \beta), \quad (3)$$

其中:

$$G_{\text{fit}}(\alpha, \beta) = a + b\alpha + c\beta + d\alpha^2 + e\beta^2 + f\alpha\beta + g\alpha^3 + h\beta^3 + i\alpha^2\beta + j\alpha\beta^2 + k\alpha^4 + l\beta^4 + m\alpha^3\beta + n\alpha^2\beta^2 + o\alpha\beta^3,$$

$$G_{\text{wave}}(\lambda, \beta) = A + B\lambda + C\beta + D\lambda^2 + E\beta^2 + F\lambda\beta + G\lambda^3 + H\beta^3 + I\lambda\beta^2 + J\lambda^2\beta + K\lambda^4 + L\beta^4 + M\lambda^3\beta + N\lambda^2\beta^2 + O\lambda\beta^3,$$

式中 $a \sim o$ 和 $A \sim O$ 分别为两个泰勒级数的拟合系数,测试和拟合精度高于 1%。

4 测量结果和数据处理

2008 年 6 月 4 日 FY-3A 紫外臭氧垂直探测仪开机,经历了七个多月的在轨测试,包括每天 1 次太阳、每轨 48 次大气、每 7 天 1 次太阳分立谱、每月 1 次的标准灯,全部功能均响应并工作正常。

在轨测试太阳光谱例见图 5,其表明太阳连续光谱测量模式响应正常,160~400 nm 光谱波段正确;图 6 给出 7 月 17 日太阳辐照度离散谱观测数据及其与美国 NOAA 卫星 SBUV/2 的比较情况^[11],一致性为 $\pm 5\%$,达到国际同类仪器的先进水平。

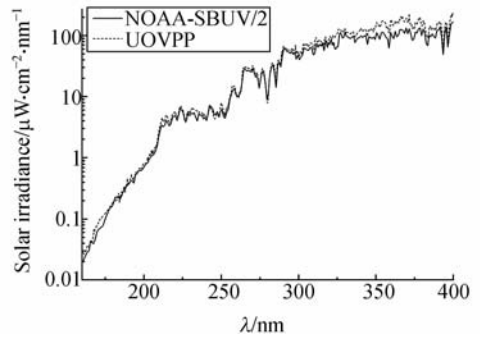


图 5 在轨太阳辐照度连续光谱图例
Fig. 5 Example of solar spectral irradiances measured on orbit

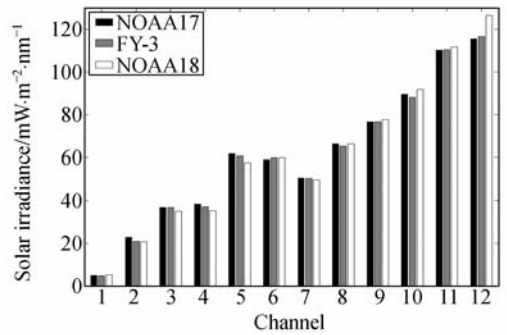


图 6 太阳分立光谱辐照度观测数据与 SBUV/2 比较
Fig. 6 Comparison of discrete solar spectral irradiances measured at 12 wavelengths with those of SBUV/2

在轨测试时,以太阳为光源,以 6 月 11 日至 7 月 2 日期间太阳辐照度分立光谱在轨测量值为例,给出均值、标准差及相对偏差,最大相对偏差为 1.2%,见表 3。

表 3 在轨太阳辐照度离散光谱测量数据

Tab. 3 Data of solar discrete spectral irradiance on orbit

λ/nm	Spectral irradiance				AVE	SD	RSD/%
	080611	080618	080625	080702			
252.00	5.20	5.20	5.10	5.10	5.15	0.058	1.12
273.62	21.00	20.70	20.60	20.60	20.73	0.189	0.91
283.10	35.70	35.10	34.80	34.80	35.10	0.424	1.21
287.70	35.70	35.20	35.10	35.00	35.25	0.311	0.88
292.29	58.30	57.60	57.60	58.20	57.93	0.377	0.65
297.59	60.90	59.70	60.00	59.60	60.05	0.592	0.99
301.97	50.30	49.70	49.70	49.70	49.85	0.300	0.60
305.87	67.10	66.40	66.50	66.60	66.65	0.311	0.47
312.57	79.00	77.70	77.90	77.80	78.10	0.606	0.78

5 结 论

本文介绍了 FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪的组成、结构和工作原理,描述了探测仪的 3 种工作模式,给出了太阳模式下的辐射定标和地外太阳光谱。在轨获得了 160~400 nm 太阳

连续光谱和 250~340 nm 间 12 个特征波长的太阳分立光谱。测试结果表明:FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪测得的太阳光谱辐照度与 SBUV/2 测得结果的一致性好于 $\pm 5\%$ 。在轨大气后向散射辐亮度测量结果及利用在轨太阳辐照度和大气辐亮度测量值反演臭氧总量垂直分布的结果将另文报道。

参考文献:

- [1] HEATH D F, KRUEGER A J, ROEDER H A, *et al.*. The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for nimbus G[J]. *Optical Engineering*, 1975, 14: 323-331.
- [2] BRUECKNER G, EDLOW K, FLOYD L, *et al.*. The solar ultraviolet spectral irradiance monitor (SUSIM) experiment on board the upper atmospheric research satellite (UARS) [J]. *Geophys. Res.*, 1993, 98: 10695-10711.
- [3] ROTTMAN G, WOODS W, SPAM T. Solar-stellar irradiance experiment 1, instrument design and operation[J]. *Geophys. Res.*, 1993, 98: 10667-10677.
- [4] HARDER J, LAWRENCE G, ROTTMAN G, *et al.*. The spectral irradiance monitor (SIM) for the SORCE mission[J]. *SPIE*, 2002, 4135: 204-214.
- [5] 张振铎, 王淑荣, 李福田, 等. 空间紫外遥感仪器漫反射板的真空紫外辐照特性[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2055-2059.
- ZHANG ZH D, WANG SH R, LI F T *et al.*. Vacuum ultraviolet radiation characteristics of diffuser for space ultraviolet remote sensing instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2055-2059. (in Chinese)
- [6] 宋克非, 汪龙祺, 王淑荣. 星载紫外遥感仪器测量方法及噪声分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S): 544-548.
- SONG K F, WANG L Q, WANG SH R. Measurement methods and noise analysis for satellite borne UV remote sensing instrument [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 544-548. (in Chinese)
- [7] 张振铎, 王淑荣, 李福田. 氟化镁窗口氙灯的真空辐射衰减特性[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 482-487.
- ZHANG ZH D, WANG SH R, LI F T. Radiation degradation characteristics of MgF₂ windowed deuterium lamp in vacuum environment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 482-487. (in Chinese)
- [8] 黄煜, 王淑荣, 张振铎, 等. 用 150 W 氙灯标定 200~300 nm 光谱辐照度[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1215-1219.
- HUANG Y, WANG SH R, ZHANG ZH D, *et al.*. Calibration of 200~300 nm spectral irradiance using 150 W deuterium lamp [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1215-1219. (in Chinese)
- [9] 邢进, 王淑荣, 李福田. 紫外-真空紫外辐射标准光源的比对[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(4): 373-379.
- XING J, WANG SH R, LI F T. Comparisons between radiometric scales on UV-VUV radiant standard light sources [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 373-379. (in Chinese)
- [10] 黄煜. 臭氧垂直探测仪辐射定标的研究[D]. 长春: 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2007: 52-59.
- HUANG Y. *Study on Radiometric Calibration of Ozone Vertical Detector* [D]. Changchun: Changchun Institute of Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2007: 52-59. (in Chinese)
- [11] WEISS H, CEBULA R P, LAAMANN K, *et al.*. Evaluation of the NOAA-11 Backscatter Ultraviolet Radiometer, Mod(SBUV/2): inflight calibration

tion[J]. SPIE, 1991, 1493: 80-90.

作者简介:



王淑荣(1961—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,FY-3 卫星紫外臭氧垂直探测仪主任设计师,主要从事空间紫外光学遥感技术及光学检测、紫外辐射计量测试方法的研究。E-main: srwang@ciomp. ac. cn



林冠宇(1976—),男,吉林长春人,博士,副研究员,现任 FY-3 卫星紫外臭氧垂直探测仪副主任设计师,主要从事空间紫外遥感技术研究及机械设计。E-mail: linguanYu760726@sohu. com



李福田(1941—),男,天津人,研究员,博士生导师,1964 年南开大学物理系,从事短波光学与空间遥感的研究,曾任神舟三号飞船对地观测分系统主任设计师。E-mail: Li_futian@yahoo. com. cn



黄 焜(1979—),男,山西朔州人,博士,现为中科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博士后,主要从事空间紫外遥感技术与辐射定标方面的研究。E-mail: ssshycn@yahoo. com. cn



宋克非(1967—),女,吉林长春人,研究员,现任 FY-3 卫星紫外臭氧垂直探测仪副主任设计师,主要从事微弱信号检测及紫外遥感技术的研究。E-mail: songkefei@sina. com



刘海波(1981—),男,吉林舒兰人,研究实习员,硕士,主要从事微弱信号检测及空间紫外遥感技术的研究。E-mail: lhb142857@yahoo. com. cn



王立朋(1954—),男,吉林长春人,高级实验师,主要从事紫外光学遥感仪器的研制。



曲 艺(1979—),男,博士,2006 年于吉林大学获理学博士学位,主要研究方向为空间紫外遥感。



汪龙祺(1978—),男,辽宁抚顺人,博士,助理研究员,主要从事微弱信号检测及紫外遥感技术的研究。E-mail: suntoweed@yahoo. com. cn



王维和(1964—),男,1986 年于北京大学获理学学士学位,主要研究方向是卫星大气成分遥感,卫星地表特性遥感以及卫星传感器定标。E-mail: whwang@nsmc. cma. gov. cn



黄富祥(1967—),男,湖北蕲春人,博士,副研究员,2000 年于中国科学院植物研究所获得博士学位,2002 年从中国科学院大气物理所博士后出站,主要从事卫星大气臭氧遥感方面的卫星工程和科学研究工作。E-mail: hfx@nsmc. cma. gov. cn