

星载臭氧垂直探测仪地外太阳紫外光谱测量

张振铎 王淑荣

(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 介绍了国内外星载太阳紫外光谱辐射计的研究进展,对我国自行研制的星载臭氧垂直探测仪的结构和功能进行了简介。它是一种小型化、高精度的紫外-真空紫外光谱辐射计,可在轨测量获得 160~400 nm 地外太阳绝对光谱。给出了星载臭氧垂直探测仪实测的地外太阳紫外光谱并对其精度进行了分析。误差分析表明,160~250 nm 地外太阳绝对光谱的测量不确定度为 $\pm 6.4\%$;250~400 nm 为 $\pm 5.2\%$ 。将臭氧垂直探测仪在轨观测结果与国际同类仪器进行了比对,一致性优于 $\pm 5\%$ 。

关键词 测量;光谱测量;误差分析;光谱比对;星载遥感仪器

中图分类号 TP70 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.061201

Measurement of Extraterrestrial Solar Ultraviolet Spectrum from the Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer

Zhang Zhenduo Wang Shurong

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

Abstract The study process of the satellite-borne solar ultraviolet spectrometer is briefly introduced. The optical and mechanical structures of the ultraviolet spectrometer (SBUS) are introduced. SBUS is a compact, high-precision satellite-borne spectral radiometer. It can measure 160~400 nm solar ultraviolet-spectral irradiance under solar work modes. The calculation method and uncertainty factors of the measured ultraviolet spectral irradiance are analyzed. The measurement uncertainty analysis shows that the total uncertainty of the measured ultraviolet spectral irradiance is $\pm 6.4\%$ at 160~250 nm and $\pm 5.2\%$ at 250~400 nm. The data of solar ultraviolet spectral irradiance obtained by SBUS agree with the internationally published data with the deviation within $\pm 5\%$.

Key words measurement; spectrum measurement; uncertainty analysis; spectrum comparison; satellite-borne remote sensing instrument

OCIS codes 120.4640; 010.0280

1 引言

地外太阳紫外光谱(ESUS)的强度、分布及其随时间的变化数据对研究地球大气层中的光电离及其动力学过程,地球气候和环境的变化,以及太阳物理、大气物理、气候学、环境科学等都具有重要意义。早在1922年,英国史密森研究所已根据地面测试结果,利用拉格朗日法推导出了ESUS,但其覆盖波段仅为346~400 nm。在随后的几十年间,美、法等国的研究机构一方面致力于研制新型的观测仪器,另一方面将观测地点不断升高,部分消除了大气层对观测的干扰,初步实现了ESUS的高精度测量。随着科学技术的高速发展,利用星载遥感仪器监测ESUS,具有精度高、仪器结构简单和长期稳定工作等优点而不可替代。

2 国内外星载太阳紫外光谱辐射计研究进展

20世纪70年代,美国Goddard空间飞行中心成功研制了太阳后向散射紫外光谱辐射计(SBUV),该仪

收稿日期:2012-02-10;收到修改稿日期:2012-03-06;网络出版日期:2012-05-08

基金项目:国家自然科学基金(D41074126)资助课题。

作者简介:张振铎(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事望远镜主动光学、空间遥感技术与辐射定标等方面的研究。

E-mail: zhenduo69@163.com

器可以实现对太阳紫外光谱的连续扫描,工作波段170~400 nm。1978年10月,SBUV搭载美国宇航局(NASA)雨云卫星 Nimbus-7 进入轨道进行观测,在轨运行达14年。20世纪80年代,Goddard 空间飞行中心对SBUV进行了改进,增加了仪器的在轨波长定标功能,并命名新仪器为 SBUV/2,其外观如图1所示。1985年2月,SBUV/2 搭载美国国家海洋大气局业务极轨气象卫星 NOAA-9 进入轨道进行观测^[1~3]。1988年9月,第二台 SBUV/2 搭载卫星 NOAA-11 进入太空^[4,5]。在随后的7年间,SBUV/2 又先后搭载卫星 NOAA-16、NOAA-17 及 NOAA-18 进入太空。

20世纪90年代初,两台专门用于地外太阳紫外光谱观测的仪器相继研制成功,分别是太阳紫外光谱辐照度监测仪(SUSIM)^[6,7]和太阳恒星辐照度比对实验(SOLSTICE)^[8,9]。两台仪器于1991年9月成功搭载上层大气研究卫星(UARS)进入地球圆形轨道,轨道高度585 km,与赤道倾角 57° 。SUSIM 由美国海军实验室(NRL)研制,它是一台太阳紫外双色散、双分光仪器,响应波段115~411 nm,光谱带宽1.1 nm。SOLSTICE 由美国科罗拉多大学的大气和物理空间实验室研制,是一台三通道紫外光谱仪,响应波段118~425 nm,光谱带宽1 nm。每台光谱仪包含两块用于折转光路的平面反射镜、一个光栅色散元件、一个椭球面反射镜和两个光电倍增管,其外观图如图2所示。在2000年,美国材料与试验协会制定了 AM0(大气质量等于0)标准地外太阳参考光谱标准 ASTM E-490,其中在119.5~410 nm 波段,标准数据来自 UARS 卫星上 SUSIM 和 SOLSTICE 仪器的观测平均值。

2003年1月,另一台 SOLSTICE 仪器搭载“太阳辐射与气候试验”卫星(SORCE)进入轨道,轨道高度654 km,与轨道夹角 40° ^[10,11]。与 UARS SOLSTICE 不同的是,该仪器的响应波段为115~320 nm。SORCE 卫星上同时还搭载着另一台太阳观测仪器——光谱辐照度监测仪(SIM),它同样由美国科罗拉多大学的大气和物理空间实验室研制,能实现太阳在紫外、可见及近红外波段的光谱测量,响应波段200~2000 nm,光谱带宽在200 nm 处为1 nm,在2000 nm 处增加到34 nm^[12]。SIM 是世界上首台能对可见到近红外全波段太阳辐射进行测量的在轨仪器,其外观如图3所示。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称长春光机所)于1989~1992年间承担了“太阳紫外光谱监视器”的预研工作,成功研制了地面试验样机和气球试验样机。1997年在33 km 高空利用高空气球平台完成了气球飞行试验,使我国继美国、欧洲后在高空气球上成功进行了太阳紫外光谱观测。1993年进入921工程阶段,开始研制921-2地球环境监测分系统中的空间太阳紫外光谱监视器。2002年3月搭载神舟三号飞船,成功地进行了飞行试验,在国内首次获得了地外太阳紫外光谱。长春光机所自2000年起开始承担风云三号气象卫星臭氧垂直探测仪(SBUS)^[12,14]的研制任务。在轨运行期间,它一方面能够在252~340 nm 间的12个特征波长处探测得到太阳紫外光谱辐照度和大气的太阳后向散射紫外光谱辐亮度,然后通过两者的比值反演大气中臭氧的含量和垂直分布(大气模式);另一方面,SBUS 还能够完成160~400 nm ESUS 连续扫描测量(太阳模式),为我国的各项科学研究提供重要的数据参数。表1列出了国内外最具代

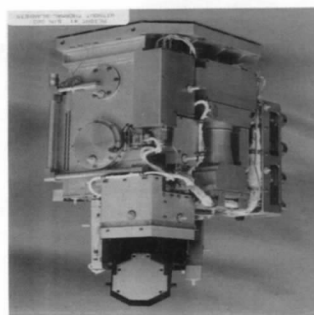


图1 SBUV/2 外观图

Fig. 1 Outside view of SBUV/2

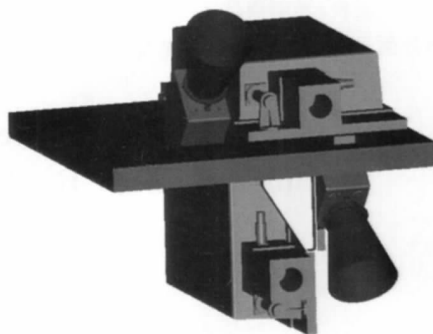


图2 SOLSTICE 外观图

Fig. 2 Outside view of SOLSTICE

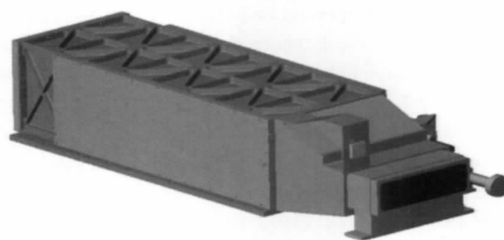


图3 SIM 外观图

Fig. 3 Outside view of SIM

表性的星载太阳紫外光谱辐射计的相关信息。

表 1 国内外星载太阳紫外光谱辐射计

Table 1 International satellite-borne instruments of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum measurement

Instrument	Wavelength range /nm	Spectral resolution /nm	Service time
SBUS ^[13,14]	160~400	1	2008.6~present
NOAA-9 SBUV/2 ^[1~3]	170~400	1.1	1985.3~1997.5
NOAA-11 SBUV/2 ^[4,5]	170~400	1.1	1988.12~1994.10
UARS SUSIM ^[6,7]	115~411	1.1	1991.10~2005.7
UARS SOLSTICE ^[8,9]	118~425	1	1991.10~2001.9
SORCE SOLSTICE ^[10,11]	115~320	1	2003.1~present
SORCE SIM ^[12]	200~2000	1~34	2003.1~present

3 臭氧垂直探测仪简介

臭氧垂直探测仪的结构原理如图 4 所示。它由汞灯波长定标光源、前置铝漫反射板、消偏器、Ebert-Fastie 型光栅双单色仪、后置光学系统、光电倍增管探测器及电控系统组成,工作波段 160~400 nm。光栅双单色仪由球面准直聚光镜、平面和屋脊转向镜、光栅以及入射、出射和中间狭缝组成。为使仪器结构紧凑、色散相加,且两个单色仪的光栅可同轴驱动,在两单色仪之间采用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的焦长为 250 mm,视场角 $11.3^{\circ}\times11.3^{\circ}$,镜表面镀 Al+MgF₂ 膜。单色仪光栅刻线面积 52 mm×52 mm,刻线密度 2400 line/mm,表面亦镀 Al+MgF₂ 膜。仪器波长重复性 0.01 nm,波长精度 0.03 nm。

臭氧垂直探测仪在轨执行太阳模式时,漫反射板移入光路,太阳辐射经过漫反射板、消偏器、调制器进入 Ebert-Fastie 光栅双单色仪,并在单色仪出射狭缝平面形成谱带。当光栅转动时,不同波长的单色辐射依次通过出射狭缝、后置光学系统,由探测器、放大器转变为紫外光电光谱,完成 160~400 nm 地外太阳紫外光谱测量。

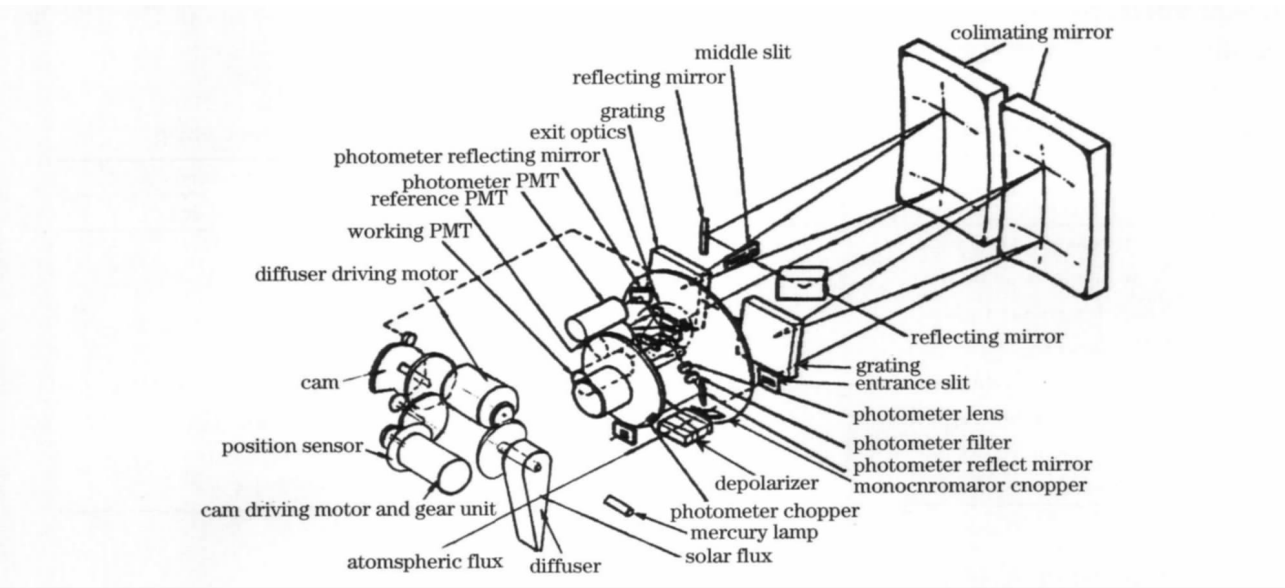


图 4 紫外臭氧垂直探测仪结构图

Fig. 4 Configuration of the solar backscatter ultraviolet spectrometer

4 臭氧垂直探测仪在轨观测结果及观测不确定度

2008 年 6 月 4 日 FY-3A 臭氧垂直探测仪开机,经历了 3 个多月的在轨测试,仪器各项性能指标如波长精度、动态范围、灵敏度等均满足任务要求。

根据 SBUS 的光谱辐照度响应度 $R(\lambda_0)$ 和极地上方星上太阳模式下的光谱读出值 $V(\lambda_0)$, 可计算得到地外太阳紫外光谱为

$$E(\lambda_0) = R(\lambda_0) \times V(\lambda_0) \times \sigma(\lambda_0, t) \times \eta(\lambda_0, \alpha, \beta) \times I(i, j) \times L(v), \quad (1)$$

式中 λ_0 为仪器在轨扫描测量时的波长位置; $\sigma(\lambda_0, t)$ 为漫反射板反射率衰减修正因子, 利用工作漫反射板与参考漫反射板输出信号之比, 修正工作漫反射板在轨测量期间由于长期辐照所引起的反射率衰减; $I(i, j)$ 为换挡比因子, 包括光电倍增管高压换挡 (i 为 900 V 和 1500 V) 和静电计放大器换挡 (j 为 10^7 、 10^8 和 10^9), 用换挡比将仪器辐射定标数据及在轨读出值数据归一化到 900 V 和 10^7 档位; $L(v)$ 为光电倍增管探测器系统非线性修正因子, 主要对发生在 1500 V、 10^9 档位的读数非线性进行修正; $\eta(\lambda_0, \alpha, \beta)$ 为仪器光谱辐照度响应度方向特性修正因子, 用来修正响应度随入射辐射方向的不同而产生的变化, α 为入射辐射和轨道平面的夹角, β 为轨道平面内入射辐射和仪器光轴的夹角。

臭氧垂直探测仪在轨测得的地外太阳紫外光谱如图 5 所示。

由(1)式求得地外太阳紫外光谱测量总不确定度:

$$\frac{\Delta E(\lambda_0)}{E_D(\lambda_0)} = \left[\left| \frac{\Delta R(\lambda_0)}{R(\lambda_0)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V(\lambda_0)}{V(\lambda_0)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta \sigma(\lambda_0, t)}{\sigma(\lambda_0, t)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta \eta(\lambda_0, \alpha, \beta)}{\eta(\lambda_0, \alpha, \beta)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta I(i, j)}{I(i, j)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta L(v)}{L(v)} \right|^2 \right]^{1/2}. \quad (2)$$

从(2)式可知: SBUS 地外太阳紫外光谱测量的总不确定度主要由仪器地面辐照度定标不确定度、在轨读出值测量不确定度及各项读出值修正因子不确定度构成。考虑到太空温度、辐射环境、卫星姿态控制及其他外部影响因素的复杂性, 预计为测量结果引入约 3% 的附加不确定度。表 2 给出了 160~250 nm 和 250~400 nm 波段 SBUS 地外太阳紫外光谱测量的总不确定度。

表 2 SBUS 地外太阳紫外光谱测量总不确定度

Table 2 Overall uncertainty of the measured extraterrestrial solar ultraviolet spectrum from SBUS

Source of uncertainty	Solar ultraviolet spectrum measurement uncertainty / %	
	160~250 nm	250~400 nm
Irradiance calibration	± 4.3	± 2.8
Readout value in orbit	± 2.0	± 1.0
Interrange ratio	± 1.4	± 1.4
Nonlinearity correction	± 1.5	± 1.5
Goniometric calibration	± 2.0	± 2.0
Diffuser reflectivity degradation	± 1.0	± 1.0
Other factors	± 3.0	± 3.0
Overall uncertainty	± 6.4	± 5.2

5 地外太阳紫外光谱比对

图 6 列出了 1978 年以来, 国际上对 ESUS 进行观测的所有星载光学仪器。其中一些仪器在长期服役期间, 并没有对自身的光谱响应度变化做出实时校正, 所以它们的观测数据将不被引用, 这些仪器包括 Global Ozone Monitoring Instrument (GOME)^[15,16]、NOAA-16 SBUV/2、NOAA-17 SBUV/2、NOAA-18 SBUV/2 及 Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY)^[17]。另外, 由于 SEE 的观测波长为极紫外(EUV), 而 Nimbus-7 SBUV 及 SME 的观测时间较早, 所以它们的观测数据也不被引用。基于以上分析, 最终选定的光谱比对仪器有 NOAA-9 SBUV/2、NOAA-11 SBUV/2、UARS SUSIM、UARS

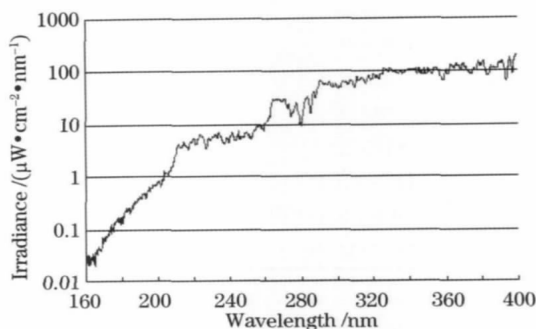


图 5 臭氧垂直探测仪地外太阳紫外光谱图

Fig. 5 Extraterrestrial solar ultraviolet spectrum from the solar backscatter ultraviolet spectrometer

SOLSTICE、SORCE SOLSTICE 以及 SORCE SIM。

选取以上 6 台国际观测仪器的太阳紫外光谱平均值作为比对标准,所选择的比对光谱与臭氧垂直探测仪的观测光谱具有同样的太阳黑子活动水平($F_{10.7} = 681$)。为了消除仪器间不同狭缝函数所引入的比对误差,所有光谱均与 5 nm 带宽的标准三角函数做卷积,步长为 1 nm,卷积后的光谱如图 7 所示。由图可见,在整个 160~400 nm 波段,两光谱吻合较好,一致性优于 $\pm 5\%$,说明 SBUS 达到了国际同类仪器的水平。

6 结束语

臭氧垂直探测仪是我国第二代极轨气象卫星风云三号上的有效载荷。本文对 SBUS 在轨测得的太阳紫外光谱总不确定度进行了分析,在 160~250 nm 和 250~400 nm 两个波段,预计测量总不确定度分别为 $\pm 6.4\%$ 和 $\pm 5.2\%$ 。选取国际上 6 台同类的地外太阳光谱观测仪器,将它们观测结果的平均值作为参考标准,与 SBUS 的观测数据进行了比对,在 160~400 nm 波段,一致性优于 $\pm 5\%$,表明 SBUS 达到了国际同类仪器水平。

星载太阳紫外光谱辐射计的下一步工作将围绕以下方面展开:1) 进一步提高太阳紫外绝对光谱辐照度的监测精度;2) 进一步提高太阳紫外光谱辐射随时间相对变化规律的监测精度;3) 进一步提高仪器在轨绝对辐射定标精度。

参 考 文 献

- 1 R. P. Cebula, M. T. DeLand, E. Hilsenrath *et al.*. Intercomparisons of the solar irradiance measurements from the Nimbus-7 SBUV, the NOAA-9 and NOAA-11 SBUV/2, and the STS-34 SSBUV instruments; a preliminary assessment [J]. *J. At. Terr. Phys.*, 1991, **53**(11-1): 993~997
- 2 M. T. DeLand, R. P. Cebula, E. Hilsenrath. Observations of solar spectral irradiance change during cycle 22 from NOAA-9 Solar Backscattered Ultraviolet Model 2 (SBUV/2)[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D06304
- 3 A. A. Fegley, W. K. Fowler. Radiometric calibration of SBUV/2 instruments; retrospective improvements [J]. *Metrologia*, 1991, **28**(3): 297~300
- 4 R. P. Cebula, M. T. DeLand, E. Hilsenrath. NOAA 11 Solar Backscattered Ultraviolet, model 2 (SBUV/2) instrument solar spectral irradiance measurements in 1989~1994. 1. Observations and long-term calibration[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(D13): 16235~16249
- 5 M. T. DeLand, R. P. Cebula. NOAA 11 Solar Backscattered Ultraviolet, model 2 (SBUV/2) instrument solar spectral irradiance measurements in 1989~1994. 2. Results, validation, and comparisons[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(D13): 16251~16273
- 6 R. P. Cebula, G. O. Thullier, M. E. VanHoosier *et al.*. Observations of the solar irradiance in the 200~350 nm interval during the ATLAS-1 mission; a comparison among three sets of measurements-SSBUV, SOLSPEC, and SUSIM[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**(20): 2289~2292
- 7 Linton E. Floyd, Lynn C. Herring, Dianne K. Prinz *et al.*. Instrument responsivity evolution of SUSIM UARS[C]. *SPIE*, 1998, **3427**: 445~456
- 8 Thomas N. Woods, Gary J. Rittman. In-flight degradation results for the UARS SOLSTICE instrument[C]. *SPIE*, 1998, **3427**: 457~468

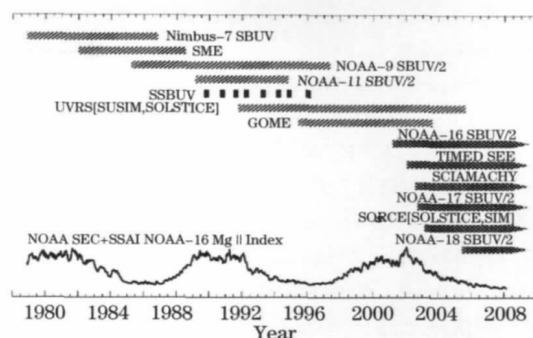


图 6 国际星载地外太阳紫外光谱观测仪器图

Fig. 6 International satellite-borne measurement instruments of the extraterrestrial solar ultraviolet spectrum

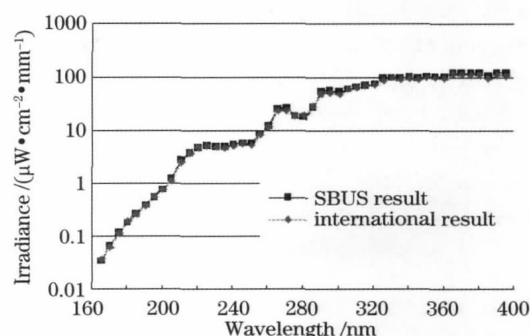


图 7 SBUS 太阳紫外光谱和国际太阳紫外光谱平均值比对

Fig. 7 Comparison between extraterrestrial solar ultraviolet spectra measured by SBUS and international instruments

- 9 Gary Rottman, Thomas Woods. SOLSTICE technique for measuring long-term solar variability [C]. *SPIE*, 1995, **2583**: 347~355
- 10 Martin Snow, Greg Holsclaw, William E. McClintock *et al.*. Absolute ultraviolet irradiance of the moon from SORCE SOLSTICE[C]. *SPIE*, 2007, **6677**: 66770D
- 11 V. A. Drake, W. E. McClintock, T. N. Woods *et al.*. Flight photomultiplier tube performance for the Earth Observing System 's SOLSTICE II instruments[C]. *SPIE*, 2003, **4796**: 107~114
- 12 J. Harder, G. Lawrence, G. Rottman *et al.*. The Spectral Irradiance monitor (SIM) for the SORCE Mission[C]. *SPIE*, 2002, **4135**: 204~214
- 13 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
- 14 Wang Shurong, Li Futian, Qu Yi. Space UV optical remote sensing technology and development[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(1): 17~22
王淑荣, 李福田, 曲 艺. 空间紫外光学遥感技术与发展趋势[J]. 中国光学与应用光学, 2009, **2**(1): 17~22
- 15 J. Skupin, M. Weber, S. Noël *et al.*. GOME and SCIAMACHY solar measurements: solar spectral irradiance and MgII solar activity proxy indicator[J]. *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 2005, **76**(4): 1038~1041
- 16 M. Weber, J. P. Burrows, R. P. Cebula. GOME solar UV/VIS irradiance measurements in 1995 and 1996: first results on proxy solar activity studies[J]. *Solar Phys.*, 1998, **177**(1-2): 63~77
- 17 J. Skupin, S. Noël, M. W. Wuttke *et al.*. SCIAMACHY solar irradiance observation in the spectral range from 240 to 2380 nm[J]. *Adv. Space Res.*, 2005, **35**(3): 370~375