

宽光谱棱镜型太阳光谱仪设计

张浩^{1,2} 方伟¹ 叶新¹ 张广伟^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为实现大气层外太阳光谱辐照度(SSD)变化的长期例行监测,设计了一种星载宽光谱太阳光谱仪结构。全系统仅使用单片折反式曲面棱镜实现太阳光谱250~2500 nm的分光,并通过棱镜转动实现谱平面上多探测器的同步扫描探测;同时基于Huygens子波点扩展函数(PSF)仿真了光谱仪的光谱响应函数(SRF)和光谱分辨率。分光棱镜在 $\pm 2.5^\circ$ 扫描转角内的全谱段子午像差小于 $8\mu\text{m}$;光谱分辨率在紫外谱段(250~400 nm)为0.7~3.5 nm,可见/近红外谱段(400~1000 nm)为3.5~35.0 nm,短波红外谱段(1000~2500 nm)内为28.5~41.2 nm。整个系统结构简单紧凑,性能稳定可靠,分光和像差校正能力满足大气层外太阳光谱辐照度长期监测需求。

关键词 光谱学;棱镜光谱仪;光学设计与仿真;太阳光谱辐照度

中图分类号 O434 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0222001

Design of Prism Spectrometer with Wide Spectral Coverage for Solar Spectrum Measurement

Zhang Hao^{1,2} Fang Wei¹ Ye Xin¹ Zhang Guangwei^{1,2}

(¹ 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 satellite-borne solar spectrometer with wide spectral coverage is designed to routinely monitor the long-term variability of solar spectral irradiance (SSI) outside the atmosphere. The instrument employs only one prism with curved surfaces for the dispersion of solar spectrum from 250 nm to 2500 nm, which are scanned simultaneously by several detectors on the focal plane as the prism rotates. The spectral response function (SRF) and spectral resolution of the instrument are also simulated based on Huygens wavelet point spread function (PSF). The tangential aberration of all the wavelengths is smaller than $8\mu\text{m}$ at each prism rotation angle within $\pm 2.5^\circ$. The wavelength resolution is 0.7~3.5 nm in ultraviolet region (250~400 nm), 3.5~35.0 nm in visual/near-infrared (400~1000 nm) and 28.5~41.2 nm in short-wave infrared (1000~2500 nm). The structure of the system is simple and compact, and the performance is stable and reliable. The spectral dispersion and aberration correction capacity satisfy demand of the long-term measurement of SSI at the top of atmosphere.

Key words spectroscopy; prism spectrometer; optical design and simulation; solar spectral irradiance

OCIS codes 120.0280; 120.4570; 120.5630

1 引言

太阳并不是一个稳定的辐射源^[1,2],太阳辐射测量包含太阳总辐照度(TSI)和太阳光谱辐照度

(SSI)测量^[3~5]。在SSI测量方面,国际上主要借助探空火箭、航天飞机以及卫星等平台,已对紫外波段进行了大量观测^[6,7],但依然没有实现此波段的完

收稿日期: 2012-07-19; 收到修改稿日期: 2012-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(61077080)资助课题。

作者简介: 张浩(1988—),男,博士研究生,主要从事空间太阳光谱辐照度测量仪器设计与定标等方面的研究。

E-mail: zhanghao_jngz@126.com

导师简介: 方伟(1965—),女,博士,研究员,主要从事空间太阳辐射绝对测量和遥感定标等方面的研究。

E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

整覆盖和重叠测量;而对可见及红外波段的观测则较少^[8],没有形成有效的长期连续记录;但太阳辐射能量的97%集中在0.2~2.5 μm光谱区域,太阳全波长辐射变化的70%也发生在这一区域^[9]。大气、陆地表面和海水对太阳辐射的吸收具有极强的光谱依赖性^[10~12],精密监测SSI的变化,对深入研究大气的光化学和动力学过程、地球气候系统和生态环境的变化具有无可替代的作用^[13~15]。

分光原理及光路结构直接决定了太阳光谱辐照度测量仪器的性能、结构复杂程度和可靠性等指标,目前滤光片、光栅和棱镜分光型均有使用。1995年SOHO卫星上的太阳光度计(SPM)^[16]使用干涉滤光片分光、Si光电二极管接收,共有三个通道,中心波长分别为402、500、862 nm,带宽为5 nm。滤光片型结构简单可靠,但不能实现波长的连续分光测量。1983~1994年间参加美国国家航空和宇宙航行局(NASA)航天飞机5次短期飞行任务的太阳光谱(SOLSPEC)仪器系列^[7,17,18]覆盖了太阳200~3000 nm的光谱范围,由三台分别称作UV、VIS和IR的光谱仪构成;每个光谱仪实际上是光学结构相似,采用全息光栅分光的双单色仪。SOLSPEC光谱分辨率高且基本成线性色散,但分光光路复杂,杂散光高,仪器长期稳定性差。2002年ESA ENVISAT卫星上的SCIAMACHY^[19,20]为8通道预色散棱镜-光栅双单色仪结构,与SOLSPEC情形相似。2003年NASA成功发射的SORCE卫星^[21]上搭载了美国研制的新型光谱辐照度监测仪(SIM)^[22~24],用来进行太阳光谱辐照度的长期例行监测;波长覆盖310~2400 nm(主波段)和200~300 nm(次波段),由两个完全相同、镜像对称安装的单棱镜分光计组成,两者在轨相互冗余和自我校准。SOLSPEC仪器系列和SIM仪器是当前大气层外可见至短波红外波段SSI的主要实验数据来源。

综合考虑,棱镜分光型优势较明显,虽然分光光谱具有非线性,破坏波长带宽的一致性,但借助先进的计算机仿真技术及后续的实验,可以对此进行高精度修正和标定。本文设计了一种宽光谱(250~2500 nm)光谱仪光学系统,并对光谱仪各重要指标进行了详细的计算机仿真,验证了仪器性能。

2 光谱仪器设计

2.1 基本原理

1910年Féry^[25]首先提出了一种前后表面均为球面的棱镜结构,其中后表面镀反射膜。Féry棱镜

用作摄谱仪的分光元件,工作原理^[26]类似于罗兰(Rowland)凹面光栅,如图1所示。棱镜前后表面的曲率中心、入射狭缝以及接收谱面均位于棱镜前表面的罗兰圆上,由物点O发出的光线将以相同的入射角到达表面S₁,并被等角度折射,I₁为折射光的虚像点;后反射表面S₂与I₁同心,因此折射光被反射后将原路返回并最终会聚到与原物点O重合的像点I;中心波长附近的复色光则会在像点I两侧展开成光谱分布。Féry棱镜除实现分光外,还可承担准直和再成像功能,因此Féry棱镜光谱仪结构简单、性能稳定;但用于摄谱仪的缺点也很明显,通光口径小、像散和彗差严重、有效波长范围窄和谱面弯曲大等。

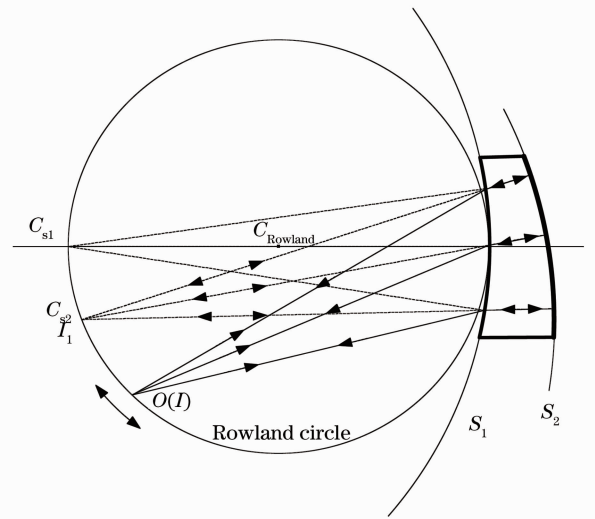


图1 Féry棱镜工作原理

Fig. 1 Schematic of Féry prism

针对SSI测量的特定应用,考虑到太阳发散角只有32',采用基于Féry棱镜分光的太阳光谱仪结构,如图2所示。仅使用单片折反式曲面Féry棱镜分光,棱镜材料使用透明光谱区宽、外太空环境下性能稳定的熔石英^[27],熔石英的光谱透过率准确测定;入射狭缝与谱平面位于棱镜同侧且共面,来自入射狭缝的复色光被棱镜色散后形成的各单色光近似垂直会聚到谱平面;谱平面上有4个与入射狭缝相同尺寸的出射狭缝,出射狭缝后侧使用匹配波段的光电二极管探测器(-10、+50、+60 mm处狭缝)及对全谱段响应良好的微型电替代辐射计(ESR)^[28](+35 mm处狭缝)同时接收各个离散波长;通过棱镜转动实现各探测器在各自工作波段内的波长扫描。光谱辐照度E(λ)的测量方程可表示为

$$E(\lambda) = \frac{W(\lambda)}{A\Delta\lambda(\lambda)T(\lambda)\cos\theta} = \frac{i_{\text{photo}}(\lambda)}{A\Delta\lambda(\lambda)T(\lambda)\cos\theta}, \quad (1)$$

式中 λ 为探测器某时刻接收的中心波长,通过棱镜转角信息获取, A 为入射狭缝面积, θ 为太阳入射方向与狭缝面法线夹角, $\Delta\lambda(\lambda)$ 为光谱带宽,即半峰全

宽(FWHM), $T(\lambda)$ 为棱镜的透过率, $R(\lambda)$ 、 $W(\lambda)$ 、 $i_{\text{photo}}(\lambda)$ 分别为探测器的光谱灵敏度、光功率输出和光电流读数。

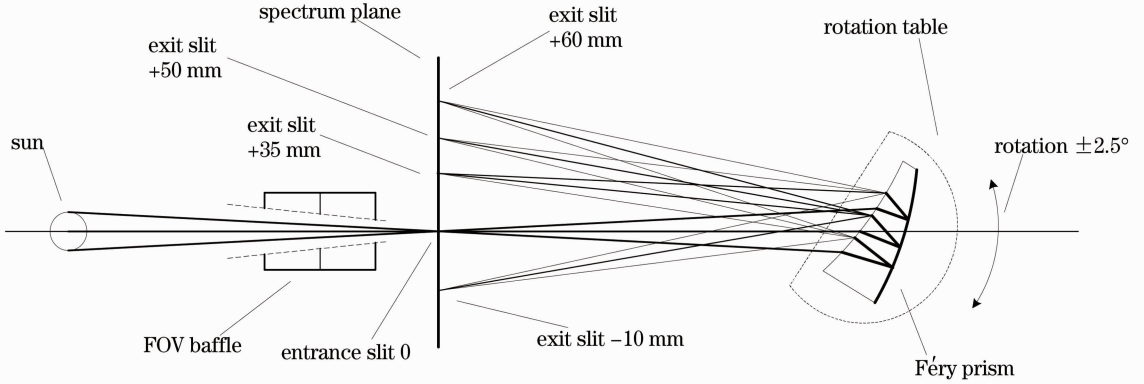


图2 太阳光谱仪结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of solar spectrometer

2.2 光学设计指标

本仪器主要用于可见近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)太阳光谱的观测,为方便与现有的较丰富的紫外(UV)观测数据相对比,短波端扩展到近紫外区,最终工作波段选择250~2500 nm。棱镜材料选择熔石英,后表面镀铝反射膜;熔石英和铝反射膜均可在此波段内正常工作。太阳发散角只有 $32'$,换算成物方数值孔径(NA)约为0.005。紫外谱段太阳辐射变化较剧烈,并伴有较多太阳光谱线,故光谱分辨率需达到1 nm左右;可见及近红外谱段太阳辐射变化相对平静,分辨率在10~40 nm即可满足需求。考虑到光谱信号的信噪比和动态范围,狭缝尺寸选择 $0.3\text{ mm}\times 7.0\text{ mm}$ 。指标汇总如表1所示。

表1 光学系统设计指标

Table 1 Specifications for optical system design

Parameters	Specifications
Wavelength range /nm	250~2500
NA in object space	0.005
Entrance/exit slit size /mm ²	7.0×0.3
Wavelength resolution /nm	1~40
Back focal length /mm	~400

2.3 光学系统设计

依据上述设计指标,使用Zemax软件进行系统优化设计。选择632.8 nm光线作为主波长,使用点列图Y方向(子午方向)的均方根(RMS)半径作为优化函数,并加入两个用户自定义约束^[29]:谱面线色散量控制和中心视场主波长光垂直像面出射;考虑到长波段衍射效应显著,加大长波长权重,以减

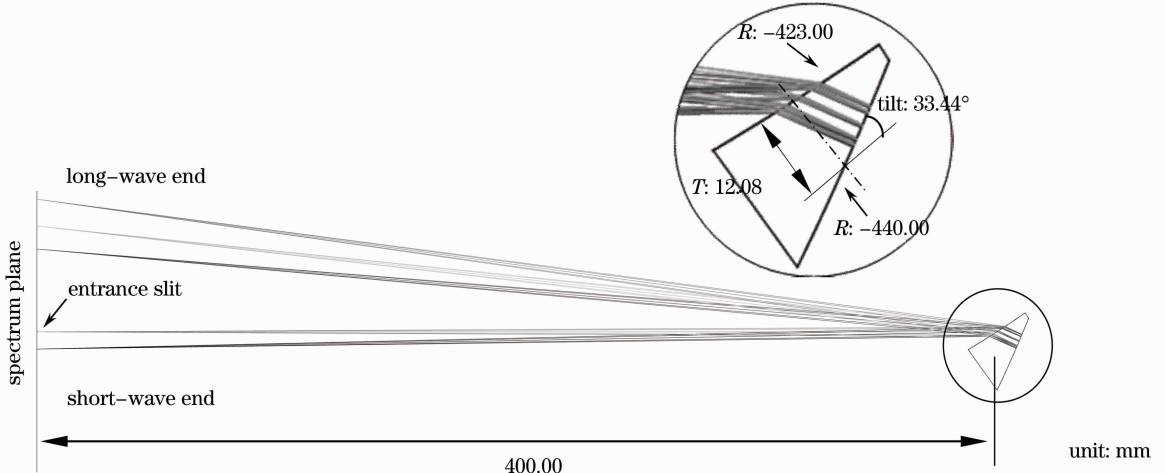


图3 光学系统光路图

Fig. 3 Layout of optical system

小点列图半径来补偿衍射加宽效应。选择棱镜前表面绕 X 轴倾斜即表面参数数据 3 作为多重结构操作数,模拟棱镜的 $\pm 2.5^\circ$ 范围内转动。优化后的基

本结构(配置 1)的系统光路图和镜头参数分别如图 3 和表 2 所示;多重结构(配置 1 至配置 5)设置如表 3 所示。

表 2 光学系统结构参数

Table 2 Structural parameters of optical system

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Material	Tilt about X axis /($^\circ$)
1(5)	∞	400.00(0.00)	—	0.00(0.00)
2(4)	-423.00	12.08(-400.00)	Fused silica	58.21(-58.21)
3	-440.00	-12.08	Inner-reflection surface	-33.44 (relative to surface 2)

表 3 多重结构参数设置($\pm 2.5^\circ$ 内旋转)

Table 3 Parameter settings of multi-configurations (rotation within $\pm 2.5^\circ$)

Operand	Config 1	Config 2	Config 3	Config 4	Config 5
Tilt about X axis /($^\circ$)	58.21	55.71	57.71	58.71	60.71

光谱仪器应实现不同色光在谱面上清晰分离,因此对光谱色散方向即 Y 方向的光学像差具有较

高要求。图 4 为配置 1 主波长在不同视场下的点列图,图 5 为棱镜在不同转角处的 Y 方向点列图

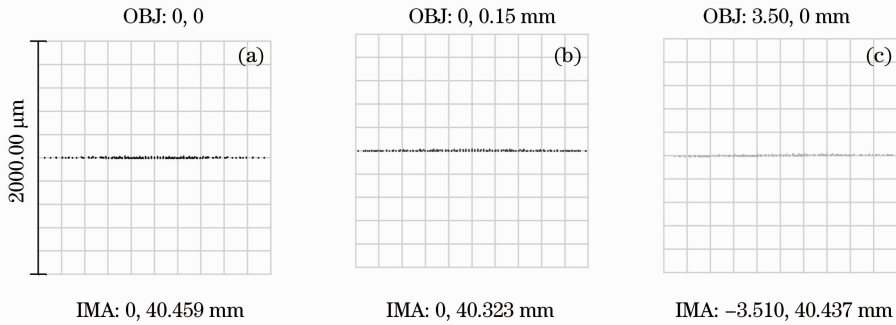


图 4 配置 1 主波长全视场点列图

Fig. 4 Spot diagrams of primary wavelength in full field of view for config 1

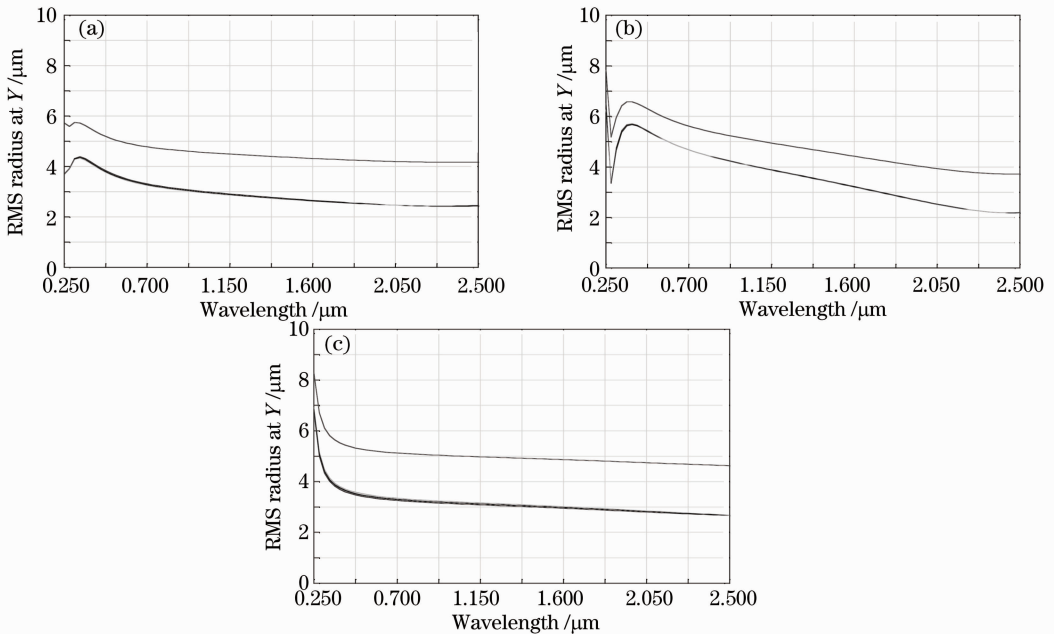


图 5 Y 方向点列图 RMS 半径与波长的关系。(a)配置 1; (b)配置 2; (c)配置 5

Fig. 5 Plots of RMS radius of spot diagram at Y direction versus wavelength. (a) Config 1; (b) config 2; (c) config 5

RMS 半径与波长的关系。由图 4 可以看出,配置 1 结构虽然 X 方向点列图半径较大,但 Y 方向不超过 $6\ \mu\text{m}$,因此在 Y 方向具有极高的能量聚集能力。由图 5 可知,在 $\pm 2.5^\circ$ 的棱镜转角内,全谱段、全视场点列图的 Y 方向 RMS 半径均小于 $8\ \mu\text{m}$, Y 方向的能量聚集能力在棱镜的不同工作角度下保持较好;另外,随着波长增加, Y 方向 RMS 半径有减小趋势,与尽量降低长波段像差的设计目标一致。图 6 为

系统的场曲和畸变图,全谱段子午场曲在 $0.18\sim 0.74\ \text{mm}$ 之间,远小于弧矢场曲的 $330\sim 490\ \text{mm}$,表明本系统近似工作在子午焦面上,虽然具有较大像散,但系统仅对子午像差有要求。系统的最大畸变不超过 0.05% ,良好的畸变特性有效保证了谱线弯曲不致过大。图 7 为配置 1 全视场 Footprint 图,也验证了该系统 Y 方向具有较好的光谱分辨和再成像特性。

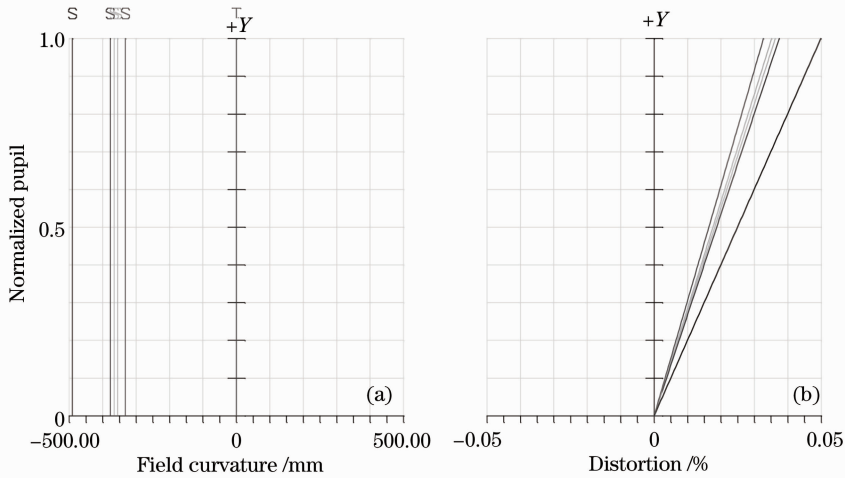


图 6 (a)系统场曲和(b)畸变图

Fig. 6 Plot of (a) field curvature and (b) distortion

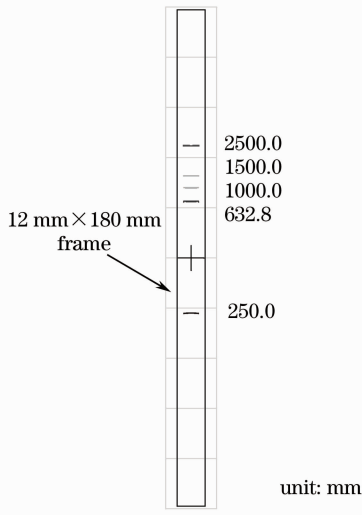


图 7 不同波长的全视场 Footprint 图

Fig. 7 Footprint diagram of full field of view at different wavelengths

3 光谱仪性能分析

3.1 几何光线追迹单色像斑

借助 Zemax 软件的宏语言编程工具进行光线追迹,模拟了单色光入射时谱面上的能量光斑分布

情况。对每一选定的波长追迹 5000 条光线,每一光线的视场位置和光瞳位置随机产生。对 58.21° 棱镜固定转角(配置 1)下部分波长的单色像模拟结果如图 8 所示。对任意单色光,理想情况下谱面上应对入射狭缝成一等大无缩放的单色像。由模拟结果可以看出,在全波段内,狭缝宽度方向即色散方向的光斑具有清晰的边缘,分辨效果较好;宽度值随波长的增加略微降低,但全波段内比较接近入射狭缝宽度,宽度的减小用以抵偿长波端因衍射效应造成的弥散加宽效应;长度方向像斑缩小为 $5\ \text{mm}$ 左右,并具有明显弥散,但弧矢方向像差不会直接影响光谱分辨率。像差的存在最终致使各单色光斑不能准确地填满 $7.0\ \text{mm} \times 0.3\ \text{mm}$ 出射狭缝。几何光线追迹仿真方法没有考虑衍射效应,在红外波段准确度不会太高,但具有运算速度快的优点。

3.2 基于傅里叶光学的光谱响应函数/光谱分辨率分析

光谱仪器对单色光辐射的响应随波长的变化特性用光谱响应函数(SRF)(或称为仪器响应函数、仪器函数)^[30,31]来描述。对满足线性空不变光学系统的光谱响应函数可表达为

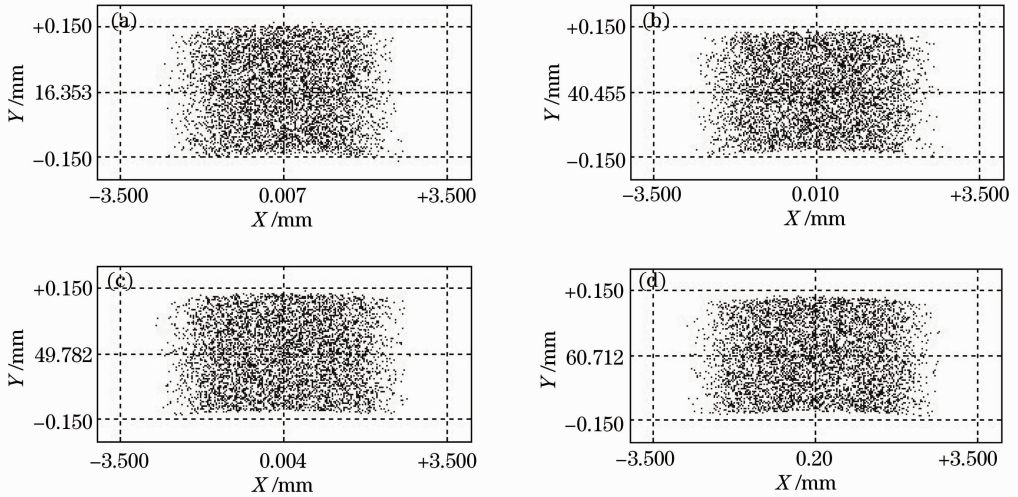


图 8 全孔径几何光线追迹单色光像斑。(a) 300.0 nm; (b) 632.8 nm; (c) 1500.0 nm; (d) 2500.0 nm

Fig. 8 Monochromatic images of full aperture geometric ray-tracing. (a) 300.0 nm; (b) 632.8 nm; (c) 1500.0 nm; (d) 2500.0 nm

$$F_{\text{SRF}}(y) = \left[\text{rect}\left(\frac{y}{a}\right) * F_{\text{LSF-T}}(y) \right] * \text{rect}\left(\frac{y}{a}\right), \quad (2)$$

式中 * 代表卷积;两个矩形函数分别代表物(入射狭缝)函数和探测器像素(出射狭缝)响应函数,取入射狭缝和探测器像素宽度均为 a ; y 为像面坐标,通过各单色光(波长为 λ)中心视场的主光线追迹可映射到波长坐标; $F_{\text{LSF-T}}$ 为色散方向(子午方向)的线扩展函数。如果 $F_{\text{LSF-T}}$ 与狭缝或像素相比很窄,即认为 $F_{\text{LSF-T}}$ 为理想狄拉克函数情形时,光谱响应函数近似于 FWHM 为 a (像面坐标)的三角函数;如果 $F_{\text{LSF-T}}$ 大小可与像素尺寸相比拟,则光谱响应函数接近于 FWHM 略大于 a 的高斯函数。

依据(2)式分别对 628.1 nm 和 1912.4 nm 波长 SRF 的仿真结果如图 9 所示。从图中可以清晰看出 628.1 nm 波长的 SRF 轮廓与三角函数比较接近;但畸变、放大倍率等因素致使峰值波长附近单色像不能恰好填满出射狭缝宽度方向,造成了 SRF 顶点处的平滑。故使用改进的三角函数法对 628.6 nm SRF 进行分段拟合:顶点处使用抛物线拟合,FWHM 附近使用直线拟合;计算得到 FWHM 为 14.6 nm。长波 1912.4 nm SRF 全轮廓出现显著平滑,直接使用高斯函数拟合的 RMS 误差为 0.11,约为 SRF 峰值的 1/200,表明长波端 SRF 与高斯函数的吻合度较高;得到的 FWHM 为 35.0 nm。SRF 的计算和拟合结果与对(2)式的分析一致。改进的三角函数

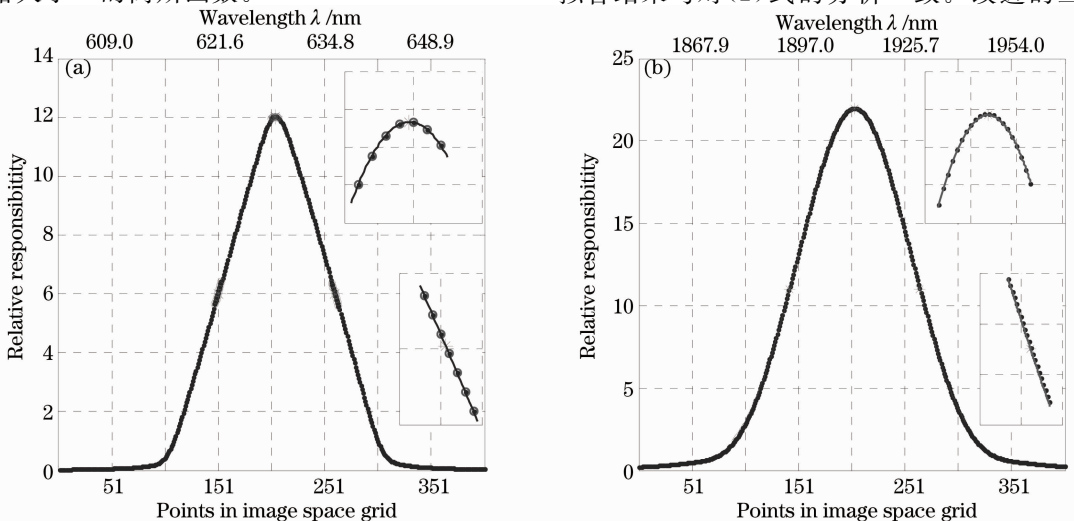


图 9 标称波长处的 SRF 曲线。(a) 628.1 nm; (b) 1912.2 nm

Fig. 9 SRF curves of nominal wavelengths. (a) 628.1 nm; (b) 1912.2 nm

法采取分段拟合,因此较高斯函数法更具灵活性和一般性。

本光谱仪通过固定出射狭缝位置和转动棱镜实现全光谱扫描探测,对入射狭缝上方 35 mm 位置处出射狭缝,基于 SRF 数据仿真了光谱分辨率和分辨能力随转角变化的关系曲线如图 10 所示;SRF 使用改进的三角函数法拟合获取对应波长 FWHM。 $+35\text{ mm}$ 处狭缝在 $\pm 2.5^\circ$ 转角内可接收 252~2480 nm 光谱,几乎覆盖光谱仪全部工作波长。此位置接收的光谱分辨率在紫外谱段(250~400 nm)为 0.7~3.5 nm,可见/近红外谱段(400~1000 nm)为 3.5~35.0 nm,短波红外谱段

(1000~2500 nm)内为 28.5~41.2 nm。虽然光谱分辨率特性在不同谱段的变化较大,但可较好地与 SSI 变化特征相匹配,实现 SSI 剧烈变化区重点监测、平静区常规监测。限于单个半导体类光电探测器没有如此宽光谱响应范围,在 -10 、 $+50$ 、 $+60\text{ mm}$ 处还设有出射狭缝及光电二极管探测器进行分波段探测,各位置处狭缝接收的中心波长与转角的关系如图 11 所示。由于棱镜转动主要引起光谱面整体平移,不同位置狭缝虽然具有不同响应波段,但重叠响应波段内的光谱分辨率近似一致,不同位置狭缝的光谱分辨率及其与 $+35\text{ mm}$ 狭缝分辨率的偏差如图 12 所示;

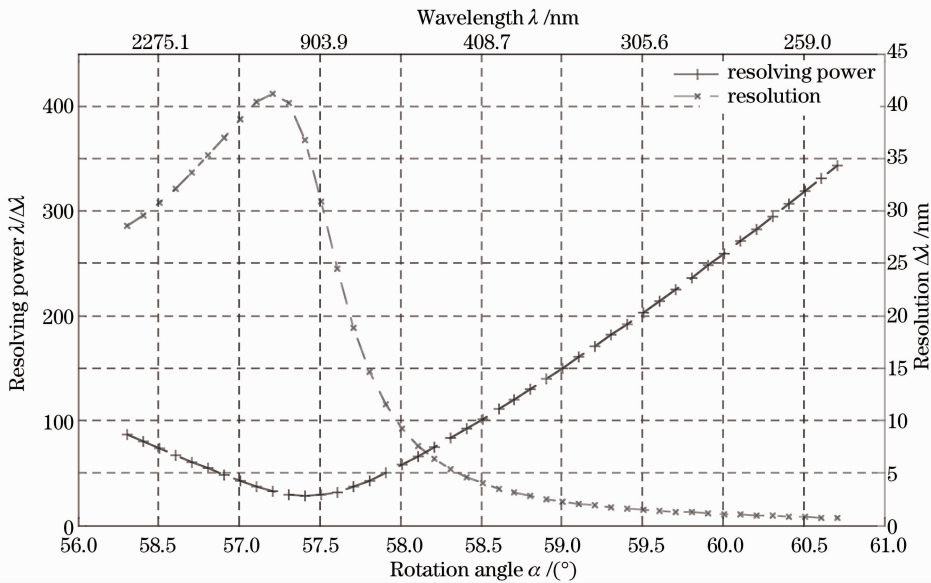


图 10 $+35\text{ mm}$ 处出射狭缝光谱分辨率/光谱分辨能力随转角变化的关系

Fig. 10 Relation of wavelength resolution / resolving power versus rotation angle of the exit slit at $+35\text{ mm}$

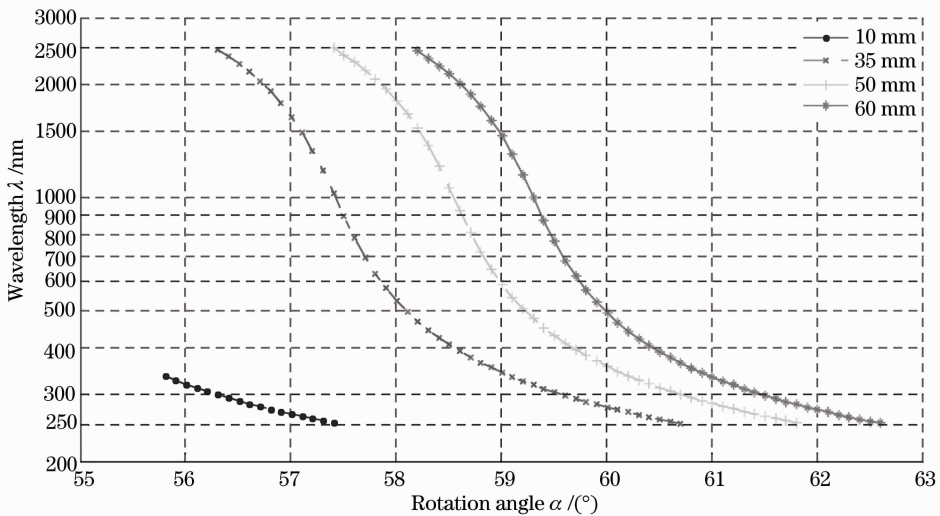


图 11 狭缝接收的中心波长与棱镜转角的关系

Fig. 11 Relation of peak response wavelengths of exit slits versus prism rotation angles

-10 mm狭缝的偏差在-5%左右,+50 mm和+60 mm狭缝在2.5%以内。对于+35 mm处狭缝,具有较宽的光谱响应区间,光谱分辨率特征可较

全面代表整个仪器特征;此位置使用对全谱段响应良好的热电型电替代辐射计 ESR 作为接收器,以用作辐射定标基准。

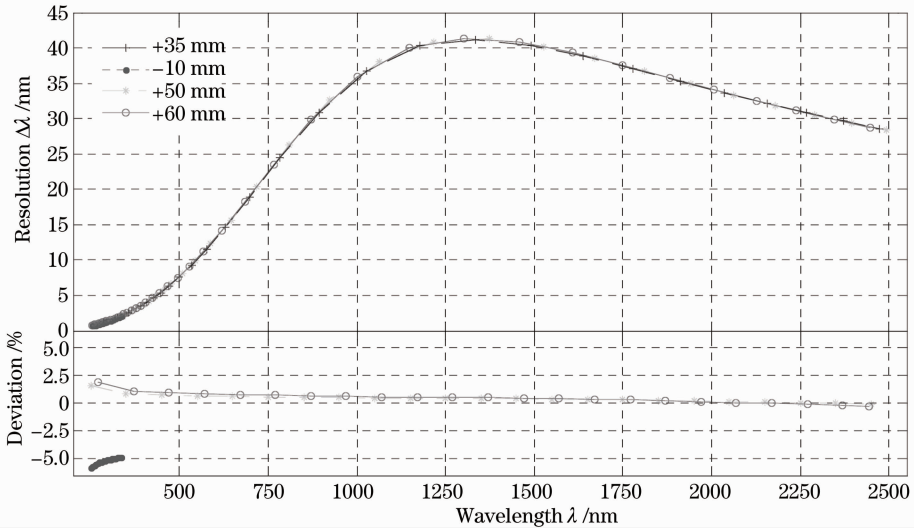


图 12 不同位置出射狭缝的光谱分辨率及其与+35 mm 狭缝的偏差

Fig. 12 Spectral resolutions of exit slits at different positions and their deviations from that of +35 mm slit

4 结 论

设计了一种航天用的宽光谱太阳光谱仪结构,工作波段 250~2500 nm;整个系统仅使用单片折反式曲面棱镜分光,在全谱段、全转角内的横向子午像差小于 $8 \mu\text{m}$,具有较好的分光 and 像差校正能力。仿真了 SRF 和光谱分辨率,SRF 在短波段近似三角函数,长波段趋近高斯函数,使用改进的三角函数法拟合全谱段 SRF,得到光学系统的光谱分辨率在 0.7~41.2 nm 之间。高精度的 SRF 和光谱分辨率仿真与后期的实验修正配合,将有效弥补非线性色散引入的光谱辐射测量误差。本光谱仪工作波长范围宽,结构简单紧凑,光学性能优良稳定,适合在外太空环境下长期高精度监测 SSI 变化。

参 考 文 献

- 1 R. C. Willson. Total solar irradiance trend during solar cycles 21 and 22[J]. *Science*, 1997, **277**(5334): 1963~1965
- 2 M. Fligge, S. Solanki. The solar spectral irradiance since 1700 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(14): 2157~2160
- 3 G. Rottman. Measurement of total and spectral solar irradiance [J]. *Space Sci. Rev.*, 2006, **125**(1-4): 39~51
- 4 J. Lean. Variations in the sun's radiative output [J]. *Rev. Geophys.*, 1991, **29**(4): 505~535
- 5 Zhang Jiaqi, Qi Jin, Fang Wei *et al.*. Correction of observation angle in solar radiation monitor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0212003
- 张佳琦, 齐 瑾, 方 伟 等. 太阳辐射监测仪观测角度变化的修正[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0212003
- 6 J. London, G. J. Rottman, T. N. Woods *et al.*. Time

- variations of solar UV irradiance as measured by the SOLSTICE (UARS) instrument[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**(12): 1315~1318
- 7 G. Thuillier, M. Hersé, P. Simon. Observation of the UV solar irradiance between 200 and 350 nm during the ATLAS-1 mission by the SOLSPEC spectrometer [J]. *Solar Physics*, 1997, **171**(2): 283~302
- 8 G. Rottman, G. Mount, G. Lawrence *et al.*. Solar spectral irradiance measurements: visible to near-infrared regions [J]. *Metrologia*, 1998, **35**(4): 707~712
- 9 J. Lean. Contribution of ultraviolet irradiance variations to changes in the sun's total irradiance [J]. *Science*, 1989, **244**(4901): 197~200
- 10 Zhou Haijin, Liu Wenqing, Si Fuqi *et al.*. Retrieval of atmospheric NO₂ vertical profile from multi-axis differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1101007
- 周海金, 刘文清, 司福祺 等. 被动多轴差分吸收光谱技术监测大气 NO₂ 垂直廓线研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1101007
- 11 Wu Lianghai, Gao Jun, Fan Zhiguo *et al.*. Scattering of particles in the atmosphere and their influence on celestial polarization patterns [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0701005
- 吴良海, 高 隼, 范之国 等. 大气粒子散射特性及其对空间偏振分布的影响 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0701005
- 12 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0101002
- 郝增周, 龚 芳, 潘德炉 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0101002
- 13 J. D. Haigh. CLIMATE: climate variability and the influence of the sun [J]. *Science*, 2001, **294**(5549): 2109~2111
- 14 D. Rind. The sun's role in climate variations [J]. *Science*, 2002, **296**(5568): 673~677
- 15 J. D. Haigh. The impact of solar variability on climate [J]. *Science*, 1996, **272**(5264): 981~984
- 16 C. Fröhlich, B. N. Andersen, T. Appourchaux *et al.*. First results from VIRGO, the experiment for helioseismology and

- solar irradiance monitoring on SOHO[J]. *Solar Physics*, 1997, **170**(1): 1~25
- 17 G. Thuillier, M. Hersé, P. C. Simon *et al.*. The visible solar spectral irradiance from 350 to 850 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer during the ATLAS I mission[J]. *Solar Phys.*, 1998, **177**(1): 41~61
- 18 G. Thuillier, M. Hersé, D. Labs *et al.*. The solar spectral irradiance from 200 ~ 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS and EURECA missions[J]. *Solar Phys.*, 2003, **214**(1): 1~22
- 19 H. Bovensmann, J. Burrows, M. Buchwitz *et al.*. SCIAMACHY; Mission objectives and measurement modes[J]. *J. Atmospheric Sciences*, 1999, **56**(2): 127~150
- 20 J. Skupin, S. Noel, M. W. Wuttke *et al.*. SCIAMACHY solar irradiance observation in the spectral range from 240~2380 nm [J]. *Adv. in Space Res.*, 2005, **35**(3): 370~375
- 21 T. Woods, G. Rottman, J. Harder *et al.*. Overview of the EOS SORCE mission[C]. *SPIE*, 2000, **4135**: 192~203
- 22 J. Harder, G. Lawrence, G. Rottman *et al.*. The spectral irradiance monitor (SIM) for the SORCE mission[C]. *SPIE*, 2000, **4135**: 204
- 23 J. Harder, G. Lawrence, J. Fontenla *et al.*. The spectral irradiance monitor; scientific requirements, instrument design, and operation modes [J]. *Solar Phys.*, 2005, **230** (1-2): 141~167
- 24 G. Rottman, J. Harder, J. Fontenla *et al.*. The spectral irradiance monitor (SIM); early observations[J]. *Solar Phys.*, 2005, **230**(1-2): 205~224
- 25 C. Féry. A prism with curved faces, for spectrograph or spectroscope [J]. *Astrophysical J.*, 1911, **34**: 79
- 26 D. Warren, J. Hackwell, D. Gutierrez. Compact prism spectrographs based on aplanatic principles[J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(4): 1174~1182
- 27 I. Malitson. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(10): 1205~1208
- 28 Fang Wei, Wang Yupeng, Liang Jingqiu *et al.*. New type detector that may be a standard of instrument[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S2): 517~520
- 方伟, 王玉鹏, 梁静秋等. 可作为光谱仪器定标基准源的新型光电探测器[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(S2): 517~520
- 29 Zhou Feng, Yan Hai, Wang Xiaoli *et al.*. Optimization of wavefront coding imaging systems based on Zemax user defined operands[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 528~535
- 周峰, 闫海, 王晓莉等. 基于Zemax用户自定义操作数的波前编码成像系统优化设计[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 528~535
- 30 P. Wilksch. Instrument function of the Fabry-Perot spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(10): 1502~1511
- 31 P. Mouroulis, R. O. Green, T. G. Chrien. Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic and spatial information [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(13): 2210~2220

栏目编辑: 韩峰