

## 小型宽光谱太阳光谱仪光学设计

高震宇<sup>1,2</sup>, 方伟<sup>1</sup>, 张浩<sup>1,2</sup>, 杨振岭<sup>1</sup>, 王玉鹏<sup>1</sup>

- (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. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对大气层外的太阳光谱辐照度监测, 设计了一种星载小型宽光谱太阳光谱仪。光学系统应用改进的切尔尼-特纳光学结构, 工作波长范围为 600~1 200 nm(二级光谱)和 1 200~2 400 nm(一级光谱); 一二级光谱使用二向色分光镜分离, 并采用两片线阵探测器同时接收, 实现全谱瞬态直读。整个光学结构的尺寸为 80 mm×55 mm×20 mm。经过系统优化, 全谱段子午方向像差低于 6 μm。基于惠更斯点扩散函数(PSF), 仿真探测器像元的光谱响应函数(SRF), 结果表明光谱分辨率在 600~1 200 nm 波段优于 2 nm, 在 1 200~2 400 nm 波段优于 4 nm。系统结构简单紧凑, 稳定性高, 适合用于空间太阳光谱辐照度的在轨监测。

**关键词:** 太阳光谱仪; 二向色分光镜; 点扩散函数; 光谱响应函数

**中图分类号:** O433; TH744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0590-06

## Design of a small-size solar spectrograph with wide spectral range

Gao Zhenyu<sup>1,2</sup>, Fang Wei<sup>1</sup>, Zhang Hao<sup>1,2</sup>, Yang Zhenling<sup>1</sup>, Wang Yupeng<sup>1</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A small-size satellite-borne solar spectrograph with wide spectral range was designed to monitor the Solar Spectral Irradiance (SSI) outside the atmosphere. The instrument used a modified Czerny-Turner spectral system. A beam splitter was used to split the spectral coverage into two parts: the first order spectrum ranges from 1 200 nm to 2 400 nm and the second order spectrum ranges from 600 nm to 1 200 nm. Two linear array detectors were used to get the whole spectrum at the same time for a direct-reading spectrum. The dimension of the optical system was about 80 mm×55 mm×20 mm. After the optimization, the tangential aberration of all the wavelengths was smaller than 6 μm. The Spectral Response Function(SRF) was simulated based on the Point Spread Function(PSF) which obtained by direct integration of Huygens wavelets method. The spectral resolution is superior to 2 nm from 600 nm to 1 200 nm and 4 nm from 1 200 nm to 2 400 nm by analyzing the spectral bandwidth. The structure of the system is simple and compact with a stable performance. The instrument is applied to the measurement of SSI on the satellite.

**Key words:** solar spectrograph; dichroic beam splitter; point spread function(PSF); spectral response function(SRF)

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(41227003)

作者简介: 高震宇(1988-), 男, 博士生, 主要从事空间光谱仪器光学设计方面的研究。Email: lnsygy92@zju.edu.cn

导师简介: 方伟(1965-), 女, 研究员, 博士, 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。Email: fangw@ciomp.ac.cn

## 0 引言

作为地球能量的最主要来源,太阳辐射与人类生活息息相关。监测太阳光谱辐照度变化可以用于研究太阳活动,并且由于地球大气、陆地表面、海洋等对太阳辐射的吸收或反射具有很强的波长依赖性<sup>[1]</sup>,精确监测太阳光谱辐照度有助于进行地球生态环境及气候变化等过程的研究<sup>[2-4]</sup>。如果跟随卫星进行太阳光谱辐照度的在轨监测,还可以通过与地面的太阳光谱仪设备进行数据比对反演获得大气成分。

国际上现有的在轨监测太阳光谱仪器主要针对紫外波段,对于可见及红外波段的观测较少<sup>[5]</sup>,但可见与红外波段在太阳辐射能量中占有较重的比例,需对其进行日常监测。现有的宽波段在轨检测太阳光谱仪器主要是 SOLSPEC 系列<sup>[6]</sup>、SCIAMACHY 仪器<sup>[7]</sup>和 SORCE 卫星上的 SIM 仪器<sup>[8]</sup>。其中前两者虽然具有较高的光谱分辨率,但实际是将宽光谱段分为多通道进行分光,由多台仪器构成,整体结构复杂且重量与体积庞大。SIM 尽管结构比较简单,但体积与重量依然比较大。另外,由于使用棱镜作为分光元件,色散不是线性的,长波部分光谱分辨率较低无法完全满足使用要求,再加上运用的是单通道探测器扫描的方式,一定程度上加大了机械难度,波长定位算法复杂且定位精度低,同时也增加了获取全光谱所需要的时间。

针对上述情况,文中以切尔尼-特纳系统为基础设计了一种适用于空间在轨监测的小型宽光谱(600~2 400 nm)的太阳光谱仪,采用线阵探测器接收以实现全谱瞬态直读。改变反射镜面型与位置,将离轴结构变为同轴结构,同时利用光栅的一、二级衍射,减少了高级次光谱影响。应用 ZEMAX 软件进行优化设计并对设计结果进行光学性能评价,最后基于设计结果的惠更斯点扩散函数,应用 Matlab 等软件模拟探测器的像元光谱响应函数<sup>[9]</sup>,进而分析系统的光谱分辨率。

## 1 光学设计指标和方案分析

该设计仪器主要针对 600~2 400 nm 的太阳光谱进行在轨监测。考虑到仪器的在轨定标需要,选用积分球对太阳光匀光后耦合输出到太阳光谱仪的入射

狭缝。由于太阳直接辐射的强度较高,无需过大的相对孔径,选定光谱仪的相对孔径为  $D/f' = 1/5$ ,即  $F$  数选为 5。根据市场可选的线阵探测器,选用线阵探测器像元数为 512,像元尺寸为  $25 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ ,并因此选定狭缝尺寸为  $25 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ ,设定仪器在 1 200~2 400 nm 波段光谱分辨率为 4 nm,在 600~1 200 nm 波段光谱分辨率为 2 nm。根据线阵探测器尺寸与要求的光谱分辨率,可获得系统的线色散率,并因此根据线色散率公式获得光栅刻线密度与系统焦距之间的关系如公式(1)所示。

$$d = \frac{m}{\cos\theta \cos\sigma} \frac{\Delta\lambda}{\Delta l} f_2' \quad (1)$$

式中: $d$ 为光栅常数; $m$ 为衍射级次; $\theta$ 为衍射角; $\sigma$ 为焦平面与主光线垂直平面的夹角; $\Delta\lambda$ 为光谱带宽; $\Delta l$ 为探测器像元宽度; $f_2'$ 为聚焦镜焦距。

高刻线密度的光栅具有更大的角色散率,有利于减小光学系统的体积,但高角色散率可能会使优化设计中元件对光路产生遮挡且像差较难优化,因此综合考虑上述问题选定光栅刻线密度为 150 线每毫米。具体设计指标如表 1 所示。

表 1 光学系统设计指标

Tab.1 Specifications for optical system design

Item	Value
Spectral coverage/ $\mu\text{m}$	0.6-1.2(2nd order)
$F$ number	5
Entrance silt size/ $\text{mm}^2$	0.025 $\times$ 0.5
System focal length/ $\text{mm}$	<80
Spectral resolution/ $\text{nm}$	2(2nd order)
Grating density/ $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$	150
CCD array size	512 $\times$ 1
CCD pixel size/ $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$	25 $\times$ 500

分析该太阳光谱仪的参数需求,它的特点是体积小、小重量、宽光谱、结构简单方便装调且保证较高的光谱分辨率;同时,为提高光谱辐照度监测准确率,需要减少以二级光谱为主的高光谱级次影响;另一方面,尽管无需成像,不必要求过高的空间分辨率,但从减少杂散光以及提高信号强度方面考虑,需控制狭缝长度方向像宽,以与探测器像元尺寸匹配。

针对上述要求,选定平面反射光栅作为分光元件,采用改进的切尔尼-特纳光路结构,如图 1 所示,

该结构具有无色差、体积小、结构简单等优点,可以较好地满足设计需求。光路中加入二向色分光镜分离一、二级光谱,并采用两块不同响应波段的线阵探测器分别接收。该结构在减小结构体积并确保光谱分辨率的同时,将一、二级衍射同时作为有效光谱,消除了传统结构中二级光谱作为杂散光对光谱辐照度测量的影响,并以此拓宽了光谱仪的有效光谱范围。另外,通过改变准直镜面型为抛物面,并改变两块反射镜位置,使三个光学元件同轴,以降低部分离轴像差,同时使整个系统加工、装调更加方便。

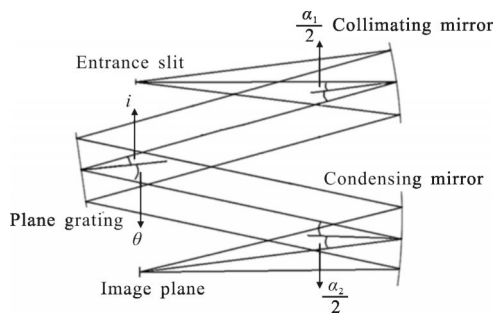


图 1 切尔尼-特纳光路结构图

Fig.1 Optical layout of Czerny-Turner spectral imaging system

## 2 光学系统设计

根据设计指标,设置多重结构,分别选择 1 800 nm 的一级光谱和 900 nm 的二级光谱作为结构 1 和结构 2 的主波长。根据线色散率公式确定系统焦距,设定准直镜、光栅和聚焦镜组成的光学结构为同轴结构,准直镜面型设为抛物面,并根据切尔尼-特纳系统消球差、彗差的条件<sup>[10]</sup>计算系统初始结构参数。使用 ZEMAX 软件对光学结构进行优化设计,以子午方向与弧矢方向上 RMS 点列图半径作为主要优化函数,并加入约束条件使系统 1:1 成像,设置子午方向与弧矢方向优化权重比为 20。考虑到优化过程中远离主波长的光成像效果会下降,提高两边缘波长的权重。最后加入二向色反光镜<sup>[11]</sup>分开一级衍射和二级衍射光,由于平行平板也会引入像差,因此二向色反光镜厚度应尽可能小,之后进一步优化获得最终结构。

经过优化设计获得的光学系统如图 2 所示,光学系统结构参数如表 2 所示。

表 2 中  $r_1$ 、 $r_2$  分别是准直镜和聚焦镜的曲率半

径, $i$  和  $\theta$  分别为光栅的入射角和主波长光线的反射角, $l_{sc}$ 、 $l_{cg}$ 、 $l_{gf}$ 、 $l_{fd}$  分别是狭缝到准直镜、准直镜到光栅、光栅到聚焦镜和聚焦镜到像面的距离, $\sigma$  是像面与主波长光线垂面的夹角。

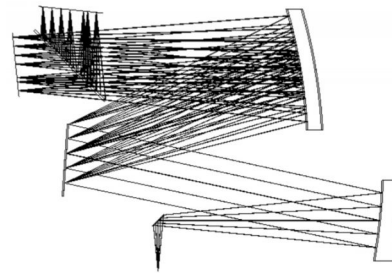


图 2 光学系统光路图

Fig.2 Layout of optical system

表 2 光学系统结构参数

Tab.2 Parameters of optical system

Specification	Parameter
$r_1/\text{mm}$	113.77
$r_2/\text{mm}$	109.10
$i/(\circ)$	-7.983
$\theta/(\circ)$	24.135
$(1/d)/\text{mm}$	150
$l_{sc}/\text{mm}$	55
$l_{cg}/\text{mm}$	63.330 5
$l_{gf}/\text{mm}$	48.373 5
$l_{fd}/\text{mm}$	56.459 3
$\sigma/(\circ)$	5.933

设计结果的光学结构尺寸为 80 mm×55 mm×20 mm,整体结构简单、体积小且无活动部件,适合作为空间载荷应用。

该太阳光谱仪是以针对太阳光谱辐照度测量为应用目的,要求具有较高的光谱分辨率,而对空间分辨率无特定要求,因此主要参考光谱维方向(子午方向)上的成像质量。图 3 为全视场子午方向(Y方向) RMS 点列图半径与波长之间的关系,从图 3 中可以看出子午方向上能量集中,像差控制较好,除了 600 nm 附近波段的小范围外,其他波长范围均小于衍射极限,且全波段范围内最大 RMS 半径值小于 6  $\mu\text{m}$ ,小于探测器像元宽度的 1/4。

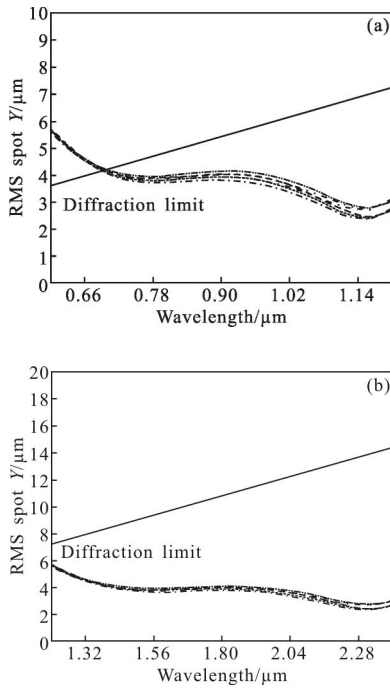


图3 子午方向点列图 RMS 半径与波长之间关系  
Fig.3 Plots of RMS radius of spot diagram at meridian direction versus wavelength

图4是600~2400nm波段部分波长全视场子午方向(Y方向)上能量集中度分布曲线,子午方向上能量集中度分布曲线一定程度上反映了系统的光谱分辨能力,由图可知所有波长90%能量均集中在1/2像元宽度以内,接近衍射极限,系统在全波段内在子午方向上具有良好的成像质量及较好的光谱分辨能力。

由于系统采用线阵探测器接收,谱线弯曲会影响光谱分辨率,直接影响光谱辐照度测量的准确度,因此需要对谱线弯曲情况进行评判。

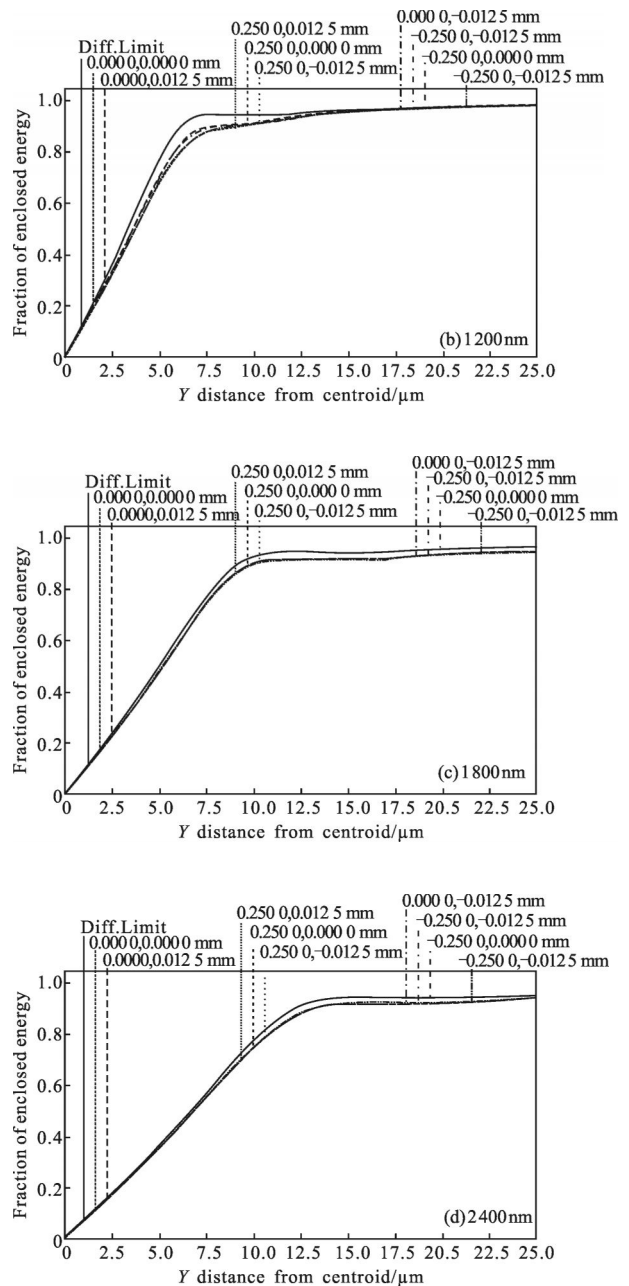


图4 子午方向能量集中度分布  
Fig.4 Encircle energy at meridian direction

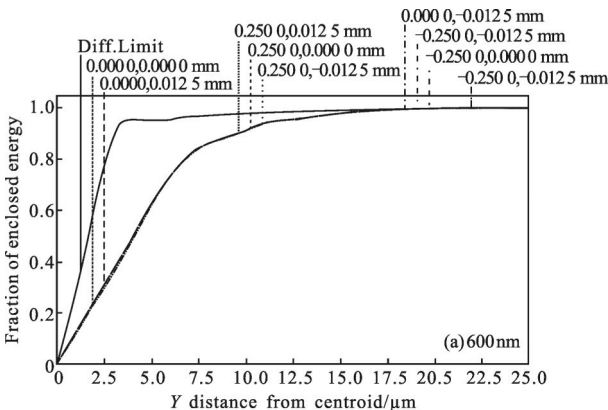


图5是系统的场曲和畸变图,图中显示全波段的子午场曲小于0.1mm,弧矢场曲小于2.7mm。由图可见子午方向场曲及像散控制较好,确保了光谱分辨率,但弧矢方向像散较严重,空间分辨率受限。系统畸变的最大值小于0.05%,经计算可得系统全波段全视场的最大谱线弯曲为0.5μm,约为探测器像元宽度的1/50,此时辐射能量相对偏差小于5%,辐射能量的偏差可以忽略<sup>[12]</sup>。

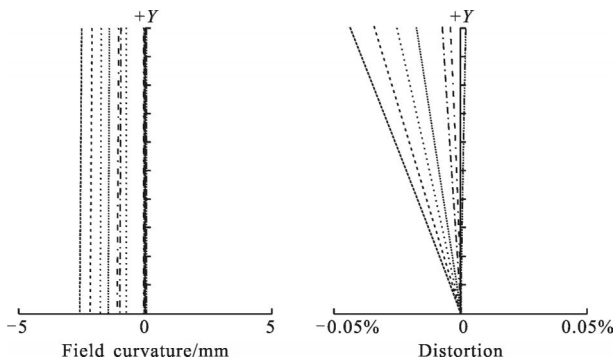


图 5 系统的场曲和畸变

Fig.5 Plots of field curvature and distortion

### 3 太阳光谱仪光谱分辨率分析

像元光谱响应函数(SRF)是光谱仪器探测器像元的光辐射响应随波长变化的函数<sup>[13]</sup>,其半高全宽(FWHM)值即是系统的光谱带宽。对于满足线性空不变的光学系统,其光谱响应函数可以表示为:

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

式中: $y$ 为色散方向(子午方向)上的坐标; $F_{SRF}(y)$ 为光谱响应函数,两个 $\text{rect}\left(\frac{y}{a}\right)$ 分别是入射狭缝函数和出射狭缝(探测器像元)函数,狭缝的宽度均为 $a$ ; $F_{LSF,T}(t)$ 是色散方向上的线扩散函数,可由子午方向上坐标相同的点扩散函数(PSF)积分获得。公式(2)的直接变量为光谱平面上的空间坐标,利用不同波长中心视场主光线与光谱平面有一一对应交点位置的映射关系,可建立波长空间与光谱平面坐标空间的映射关系,由此依据公式(2)可以获得在波长空间展开的像元光谱响应函数。在入射狭缝与出射狭缝尺寸相匹配且无像差的理想情况下,光谱响应函数是FWHM为狭缝宽度的三角函数,而实际情况下,光谱响应函数可能会近似高斯函数。

图 6 是基于惠更斯子波积分的 1 200 nm 波长的

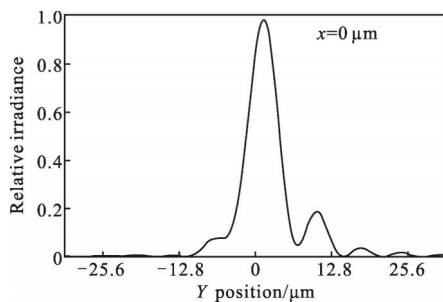


图 6 1 200 nm 波长处 Y 方向的 PSF

Fig.6 PSF cross section Y at 1 200 nm

色散方向(Y方向)点扩散函数,根据所获得的点扩散函数根据公式(2)运用 Matlab 等软件编程计算,并将空间坐标与该位置的相应波长对应获得该波长位置像元的光谱响应函数。运用上述方法获得部分波长的光谱响应函数如图 7 所示,图中每条曲线包含 512 个采样点。

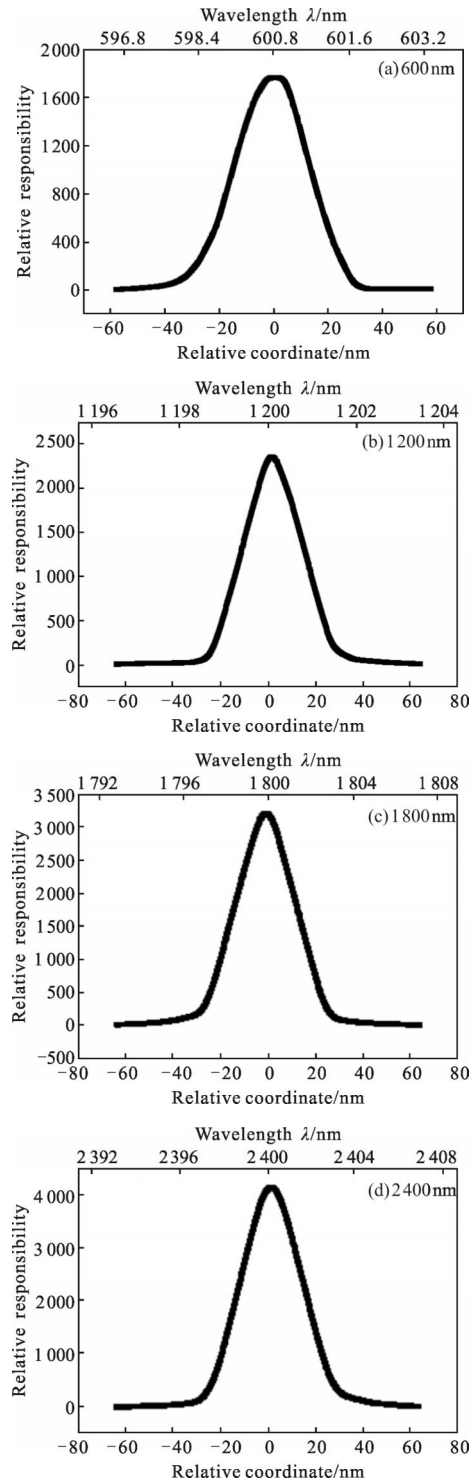


图 7 标称波长处的 SRF 曲线

Fig.7 SRF curves of nominal wavelengths

根据得到的光谱响应函数,计算其 FWHM 值,可以获得在 600 nm、1 200 nm、1 800 nm、2 400 nm 处的光谱带宽分别为 1.84 nm、1.94 nm、3.93 nm、3.98 nm,进一步计算该光学系统的全波段光谱带宽,获得全波段光谱分辨率与波长之间关系曲线如图 8 所示。从图中可以看出,在 600~1 200 nm 波段光谱分辨率小于 2 nm,1 200~2 400 nm 波段光谱分辨率小于 4 nm,符合设计要求。

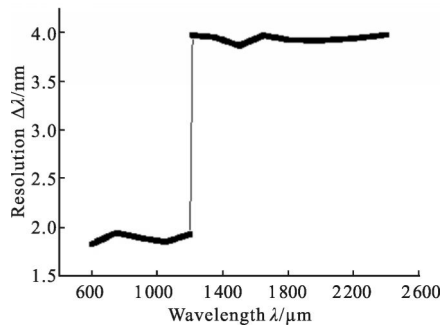


图 8 光谱分辨率随波长变化曲线

Fig.8 Plots of spectral resolution versus wavelength

## 4 结论

文中设计了一种用于空间在轨观测的小型宽光谱太阳光谱仪,其工作光谱范围为 600~2 400 nm,光学结构尺寸为 80 mm×55 mm×20 mm。采用改进的切尔尼-特纳光学结构,体积小且全系统无活动部件;改变准直镜为抛物面型,并调整光学结构使三元件同轴,便于加工和装调。优化后的系统全波段色散方向像差小于 6  $\mu\text{m}$ ,具有较好的光谱分辨能力。应用惠更斯子波积分点扩散函数仿真了光谱响应函数,并进一步仿真了光学系统的光谱分辨率;仿真结果表明该设计在 600~1 200 nm 波段光谱分辨率小于 2 nm,在 1 200~2 400 nm 波段光谱分辨率小于 4 nm,满足设计指标。该系统结构简单紧凑,稳定性高,适合用于空间太阳光谱辐照度的在轨监测。

## 参考文献:

- [1] 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. (in Chinese)  
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.
- [2] Haigh J D. CLIMATE: climate variability and the influence of the sun[J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2109–2111.
- [3] Rind D. The sun's role in climate variations [J]. *Science*, 2002, 296(5568): 673–677.
- [4] Haigh J D. The impact of solar variability on climate [J]. *Science*, 1996, 272(5264): 981–984.
- [5] Rottman G, Mount G, Lawrence G, et al. Solar spectral irradiance measurements: visible to near-infrared regions [J]. *Metrologia*, 1998, 35(4): 707–712.
- [6] Thuillier G, Herse M, Labs D, 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.
- [7] Boversmann H, Burrows J, Buchwitz M, et al. SCIAMACHY: mission objectives and measurement modes [J]. *J Atmospheric Sciences*, 1999, 56(2): 127–150.
- [8] Harder J, Lawrence G, Rottman G, et al. The spectral irradiance monitor (SIM) for the SORCE mission [C]//SPIE, 2000, 4135: 204.
- [9] Zhang Hao, Fang Wei, Ye Xin, et al. Design of prism spectrometer with wide spectral coverage for solar spectrum measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0222001. (in Chinese)  
张浩, 方伟, 叶新, 等. 宽光谱棱镜型太阳光谱仪设计 [J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0222001.
- [10] Xue Qingsheng, Chen Wei. Design of modified Czerny-Turner spectral imaging system with wide spectral region [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 233–240. (in Chinese)  
薛庆生, 陈伟. 改进的宽波段车尔尼-特纳光谱成像系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 233–240.
- [11] Cheng Xin, Zhang Bao, Hong Yongfeng, et al. Optical design of an airborne dual-wavelength imaging spectrometer with high throughput [J]. *Infrared and Laser Eng*, 2012, 41(3): 690–695. (in Chinese)  
程欣, 张葆, 洪永丰, 等. 机载高光通量双波段成像光谱仪的设计 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 690–695.
- [12] Green R O. Spectral calibration requirement for earth-looking imaging spectrometers in the solar-reflected spectrum [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(4): 683–690.
- [13] Mouroulis P, Green R O, Chrien T G. Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic and spatial information [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(13): 2210–2220.