

# 方形孔径棱镜式成像光谱仪光学设计

吴从均<sup>1,2</sup> 颜昌翔<sup>1</sup> 刘 伟<sup>1</sup> 张军强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 为满足星载高光谱成像的需要,通过分析实际星载成像光谱仪应用需求,确定了光学设计的指标。设计中,使用方形孔径代替圆形孔径,采用双胶合棱镜和单棱镜作为分光元件分别设计可见近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)光谱仪,并利用远心离轴三反结构设计望远物镜;分析了双胶合棱镜校正色散非线性原理,利用光学软件 Zemax 分别设计了望远物镜和光谱仪系统,并采用沿轨方向视场分离的方法实现了 SWIR 和 VNIR 的分别成像。对光学系统的整体分析结果表明,该系统能够满足光谱分辨率和地面分辨率指标的要求,方形尺寸不仅可减小成像光谱仪的纵向尺寸,更有助于对像差的校正,利于实际工程应用。对 VNIR 波段色散结果的分析表明胶合棱镜能够很好地校正棱镜色散非线性。

**关键词** 光学设计;成像光谱仪;胶合棱镜;像质分析;色散补偿

**中图分类号** O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1222001

## Prism Hyperspectral Imaging Optical System Design with Rectangular Aperture

Wu Congjun<sup>1,2</sup> Yan Changxiang<sup>1</sup> Liu Wei<sup>1</sup> Zhang Junqiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In order to meet the needs of space-borne hyper-spectral imaging, the parameters of optical system are determined based on analyzing application requirements. Rectangular aperture is used, instead of circle aperture, and doublet prism and single prism are used as dispersion elements to design visible near-infrared (VNIR) and short-wave infrared (SWIR) spectrometer respectively. Telecentric three-mirror anastigmat (TMA) is adopted to design the telescope objective. Principle of cemented prisms used to compensate the nonlinear dispersion of single prism is discussed. TMA and spectrometers are designed with Zemax optical software, and the field splitter along the track direction is used to achieve imaging of VNIR and SWIR respectively. According to the overall analysis, the optical system meets the indicators of spectral resolution and ground resolution. Using the rectangular aperture not only can reduce the size in longitudinal dimension, but also is helpful to the aberration correction, which is conducive to the practical application of engineering. The VNIR band dispersion result shows that doublet prism is a useful method to correct the nonlinear dispersion of prism.

**Key words** optical design; imaging spectrometer; cemented prisms; image analysis; dispersion compensation

**OCIS codes** 220.4830; 300.6190; 230.2035

收稿日期: 2013-05-14; 收到修改稿日期: 2013-07-01

基金项目: 国家 863 计划(2011AA12A103)

作者简介: 吴从均(1986—),男,博士研究生,主要从事空间光学仪器光学设计和光学检测等方面的研究。

E-mail: wucongjun789@163.com

导师简介: 颜昌翔(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。

E-mail: yancx@ciomp.ac.cn

## 1 引 言

星载成像光谱仪在自然灾害、植被监测、矿产识别、地形测绘等众多方面发挥着重要的作用<sup>[1-3]</sup>。分光元件是成像光谱仪的核心部件,影响着光谱分辨率、光通量,并最终影响系统的信噪比。光栅、棱镜是光谱仪器使用最多的分光器件,此外还有一些基于波长调制形式的分光元件<sup>[4-5]</sup>,大多数星载成像光谱仪都采用棱镜或者光栅作为分光元件。相同数值孔径下,棱镜分光仪器信噪比远高于光栅类仪器,适合于星教应用。这是由于光栅多级谱占据了很大一部分能量,而且光栅的衍射效率一般在 60%~70%,定向光栅衍射效率可以高达 95%,但是应用波段很窄,不适合在宽谱段成像光谱仪上应用。但是棱镜光谱仪体积重量都比较大,而且棱镜分光具有强烈的非线性,这些负面因素也限制了它的广泛使用<sup>[6]</sup>。

成像光谱仪有很多经典的结构形式,如 Offner 型、C-T 型,一些文献中都对其设计方法进行了详细描述<sup>[7-9]</sup>。一般光学系统都采用圆形入射光栏,该种光栏在和光传播方向垂直的面内(X/Y)孔径大小对称,这不利于离轴方向的优化。本文根据实际星载应用需求设计了波段在 0.4~2.5  $\mu\text{m}$  的方形孔径成像光谱仪。设计结果表明,在保证系统光通量的情况下,方形孔径可以有效减小离轴方向的像差,便于系统的优化设计。利用棱镜实现沿轨道方向的视场分离,分别实现对地面的可见红外(VNIR)和短波红外(SWIR)光谱成像。VNIR 和 SWIR 光谱仪分别采用胶合棱镜和单棱镜的方式实现分光,分析表明,设计结果可以很好地满足应用要求。

## 2 主要技术指标确定

星载成像光谱仪一般都要求工作在 0.4~2.5  $\mu\text{m}$  波段,因为这一波段内光谱信息能够很好地反映水、林、土等地物信息。指标要求设计的成像光谱仪系统轨道高度为 900 km, VNIR 波段地面分辨率(GSD)为 15 m, SWIR 波段为 30 m,地面覆盖为 15 km。探测器采用 SARNOF 公司的面阵 CCD 和 SOFRADIR 公司的面阵 HgCdTe 红外探测器,像元数分别为 1024 pixel $\times$ 256 pixel 和 500 pixel $\times$ 256 pixel,像元大小分别为  $a_1=18 \mu\text{m}$  和  $a_2=30 \mu\text{m}$ 。根据上述要求,通过地面分辨率计算系统焦距,根据刈幅宽度和轨道高度计算视场大小,通过系统信噪比要求计算出系统所要求的  $F$  数后,确定光学系统设计指标如

表 1 所示。

表 1 成像光谱仪光学设计指标  
Table 1 Specifications of imaging spectrometer optical system

Parameter	VNIR value	SWIR value
Spectral range / $\mu\text{m}$	0.4~1	1~2.5
Focal length /mm	900	1080
Entrance pupil /mm	250	250
Field of view (FOV) /( $^\circ$ )	0.95	0.95
Spectral resolution /nm	10	15
MTF (full FOV)	$\geq 0.5$	$\geq 0.5$
GSD /m	15	30

## 3 成像光谱仪光学设计

### 3.1 任务分析

成像光谱仪光学系统由望远物镜和光谱仪组成,望远物镜将远场景物成像在狭缝位置,光谱仪通过分光元件对狭缝向的各谱段进行分析,从而判断景物特性。文献[10]都提及采用分束分色的方式让光束分别进入 VNIR 和 SWIR 光谱仪系统,可以实现很大的视场。但采用 Offner 结构设计成像光谱仪时,凸面光栅衍射效率较低,因此极不利于空间中的应用。为提高系统的信噪比,空间成像光谱仪更多地采用棱镜作为分光元件。另外分色片位于会聚光路中同样会产生一定像差,导致像质下降,也不利于设计。

在光学设计时,为方便整个系统的对接,望远镜必须设计成像方远心的方式,这样有利于模块化检测和装调。由于设计谱段很宽,采用离轴三反(TMA)结构可以有效避开色差问题,而且像质较好<sup>[11]</sup>;为了实现成像光谱仪的不同焦距要求,设计 SWIR 和 VNIR 的成像、准直系统时,前者的准直焦距和成像焦距之为 1.2,而后者为 1。棱镜分光的最大缺陷就是其非线性,这一点在短波方向,尤为明显,非线性会增加光谱定标复杂程度,而且对后续图像处理也有一定影响<sup>[12]</sup>。胶合棱镜可以对棱镜非线性进行一定校正;另外采用类似文献[13]中提出的沿轨道方向视场分离方式可以有效避免分色片带来的不便。设计中可以采用上面的设计思路,完成光学系统优化。

### 3.2 胶合棱镜对色散非线性的校正

玻璃材料对于不同波段的折射率差异是造成色散的原因,这种色散有着强烈的非线性,而且在短波位置尤为明显,不同材料的色散大小也不尽相同。单种材料色散一致,而对于这种非线性是不可能实

现校正的。若两种不同的材料采用两个棱镜倒置的形式,对于非线性的校正是有一定帮助的,这时综合

的色散效果相当于两种材料的色散相减。假设材料 A、B,采用色散公式表示其折射率  $n_A, n_B$  分别为

$$n_A = \sqrt{1 + K_{1A}\lambda^2/(\lambda^2 - L_{1A}) + K_{2A}\lambda^2/(\lambda^2 - L_{2A}) + K_{3A}\lambda^2/(\lambda^2 - L_{3A})}, \quad (1)$$

$$n_B = \sqrt{1 + K_{1B}\lambda^2/(\lambda^2 - L_{1B}) + K_{2B}\lambda^2/(\lambda^2 - L_{2B}) + K_{3B}\lambda^2/(\lambda^2 - L_{3B})}, \quad (2)$$

其中  $K_{iA}$  和  $K_{iB}$  是采用 Sellmeier 表示介质折射率的相关参数。色散率定义为折射率对波长的导数,因此胶合后棱镜的整体色散率为

$$dn_{\text{cemented}}/d\lambda = kdn_A/d\lambda - dn_B/d\lambda, \quad (3)$$

式中  $k$  值和光束的入射角度以及两棱镜的楔角有关。图 1 为石英和 F4 玻璃在 500~850 nm 之间的单独色散率和胶合后色散率与波长的关系。由图可知,当  $k$  取 3 时,色散率和波长之间的非线性关系已经明显减弱,这就是胶合棱镜能够校正单个棱镜色散非线性的原因。

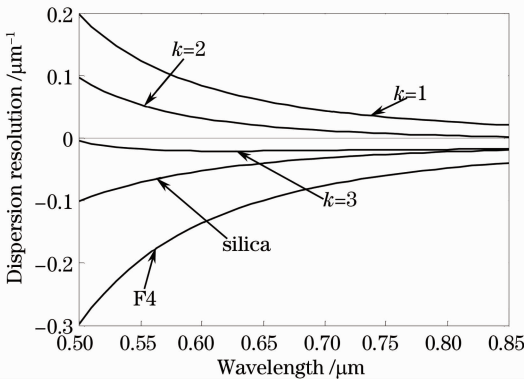


图 1 F4、石英以及不同棱镜角度胶合后的色散率  
Fig.1 Dispersion resolution about F4, silica and cemented prisms in different angles

### 3.3 前置望远镜设计

望远镜设计中圆形孔径等效成方形孔径时,应遵循面积相等的原则,以免影响进入系统的光通量,且便于离轴方向像质优化。选择入射光栏长宽比为 1.4:1 的方形光栏进行等效设计,计算得到的长宽分别为 187 mm 和 262 mm。为保证系统有一定余量,设计中选择的入瞳大小为 190 mm × 270 mm。远心 TMA 系统的设计在文献[11]中也有了详细的描述,通过初始结构计算,采用 Zemax 软件设计的远心 TMA 系统如图 2 所示。光栏位于主镜前面的指向镜位置,采用视场离轴的方法,视场离轴为  $5^\circ$ , TMA 光轴和入瞳中心相距 170 mm,其像质如图 3 所示。本设计和文献[10]中的视场分离方式不同,文献[10]中采用的视场分离是为了增大刈幅宽度,本设计中的视场分离是沿轨道方向进行分离。SWIR 和 VNIR 光

谱仪拍摄的图像中心位置沿轨道方向在地面投影上间隔为 1.2 km,对应像在像面相距 1.44 mm。由图 3 可知系统的调制传递函数(MTF)接近衍射极限,在 28 lp/mm 截止频率处,MTF 大于 0.81。

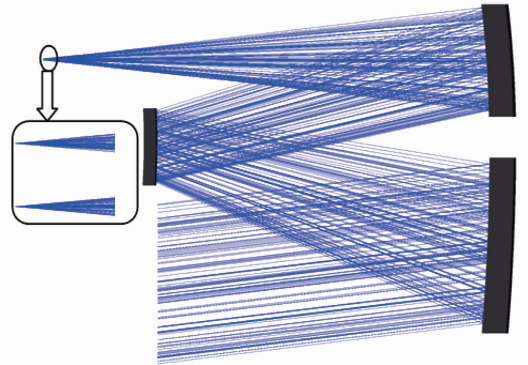


图 2 TMA 望远镜光学系统图

Fig.2 Layout of TMA optical system

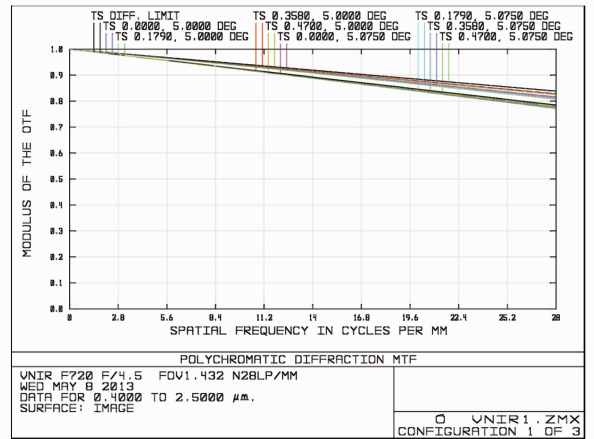


图 3 TMA 系统 MTF 曲线

Fig.3 MTF curves of TMA system

### 3.4 光谱仪系统设计

通过计算,光谱仪狭缝大小为 18 mm,狭缝宽度为  $18 \mu\text{m}$ ,数值孔径大小按照圆形孔径望远镜的像方数值孔径确定。在满足光谱分辨率的前提下,采用像元合并的方法提高系统信噪比。VNIR 波段范围为 600 nm,分辨率为 10 nm。为了预留一定余量,选择光谱通道数为 64。采用双像元合并的方式,光谱维长度为 2.3 mm。设计中采用 F4 和石英胶合作为棱镜色散元件,从而降低色散非线性。选

择的玻璃主要是要考虑二者的热膨胀系数相近,避免温度变化造成谱线漂移<sup>[14]</sup>。SWIR 波段波长范围跨度较大,采用单棱镜分光,通道数为 192,光谱维长度为 5.76 mm。设计中,成像镜和准直镜都采用单个非球面进行设计,以减小仪器机械设计难度和重量,光谱仪的光学设计结果如图 4、图 5 所示。由于采用的探测器像元大小的区别,VNIR 和 SWIR 的截止频率分别为 28 lp/mm 和 16.7 lp/mm,传递函数如图 6、图 7 所示。VNIR 光谱仪点斑的均方根(RMS)半径最大为 9.5  $\mu\text{m}$ ,最小为 5  $\mu\text{m}$ ;SWIR 光谱仪点斑的 RMS 半径最大为 18  $\mu\text{m}$ ,最小为 10  $\mu\text{m}$ ,都近似等于像元的一半。VNIR 和 SWIR 光谱仪分别采用 18  $\mu\text{m}$  和 36  $\mu\text{m}$  的狭缝,在像差作用情况下,光学系统的点扩展函数近似呈高斯分布,半峰全宽范围内能量约占 76%。由设计结果可知,85% 能量集中在直径分别为 18  $\mu\text{m}$  和 30  $\mu\text{m}$  的范围内,满足分辨率要求。从光学系统的像差形式来看,系统主要残留的是彗差,这是由于系统的准直和成像系统都只采用单独的一个镜面,而系统的狭缝也较长,像差

校正能力有限;并且对于分光系统,系统不可能实现全波段对称形式,因此残存的彗差比较大。

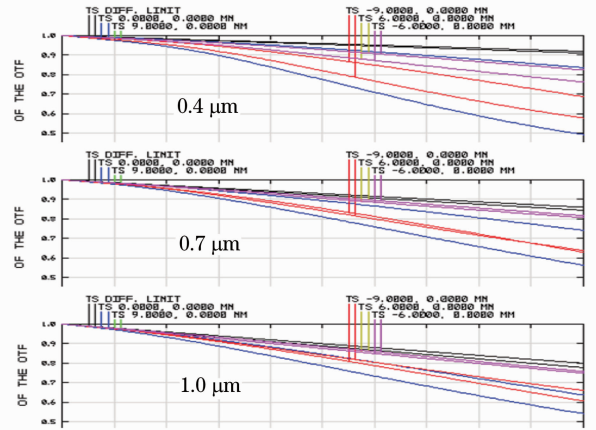


图 6 VNIR 光谱仪 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curves of VNIR spectrometer

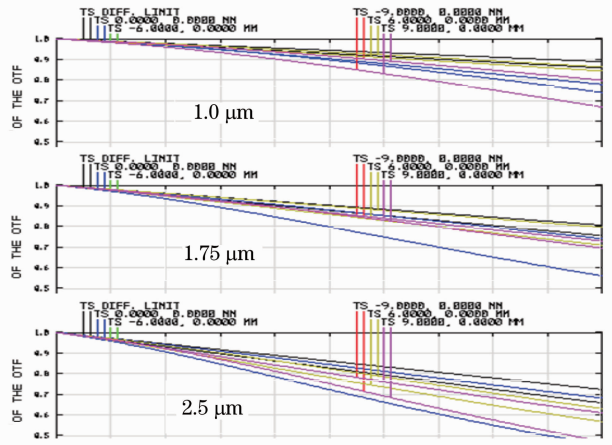


图 7 SWIR 光谱仪 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of SWIR spectrometer

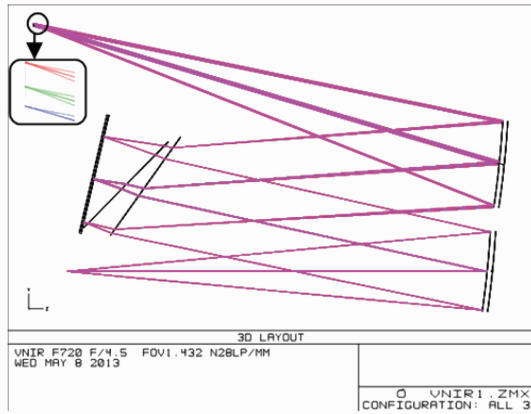


图 4 VNIR 光谱仪光路结构

Fig. 4 Layout of VNIR spectrometer

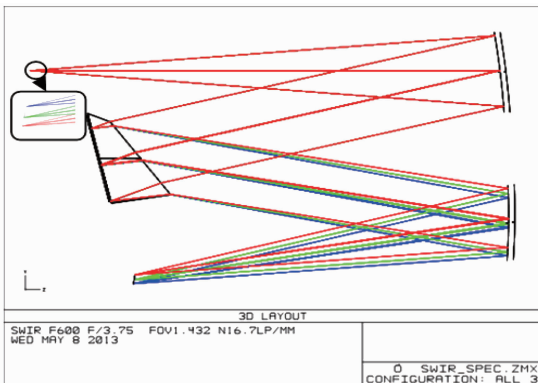


图 5 SWIR 光谱仪光路结构

Fig. 5 Layout of SWIR spectrometer

### 3.5 成像光谱仪整体像质分析

图 8、图 9 所示分别为方形孔径和圆形孔径成像光谱仪光学系统图。合并前置望远系统和光谱仪系统后,成像光谱仪的色散大小、MTF 随波长变化如表 2 所示,能量集中情况如表 3 所示。由表 2 可知,全视场内 VNIR 的 MTF 值为 0.676(28 lp/mm),双像元内色散平均值为 9.93 nm,SWIR 传递函数平均值为 0.69(16.7 lp/mm),单个像元内色散平均值为 8.9 nm,80% 的能量集中度直径分别为 18  $\mu\text{m}$  和 30  $\mu\text{m}$ 。在视场边缘位置 MTF 明显较低,这是因为光谱仪的设计是按照圆形孔径进行的,合并后其在 X 方向的数值孔径会相对增大,导致边缘视场像质略微下降。从表 3 可知,大多数视场中点列斑 RMS 半径都小于像元大小的一半。图 10 为 SWFR 和 VNIR 光学系统点列图,从中可见 VNIR 波段每隔

10 nm,以及 SWIR1 每隔 15nm 点列斑也能分开。因此从色散的程度和像差两个方面考虑,设计结果满足光谱分辨率要求,从传递函数考虑,设计结果也满足地面像元成像要求。

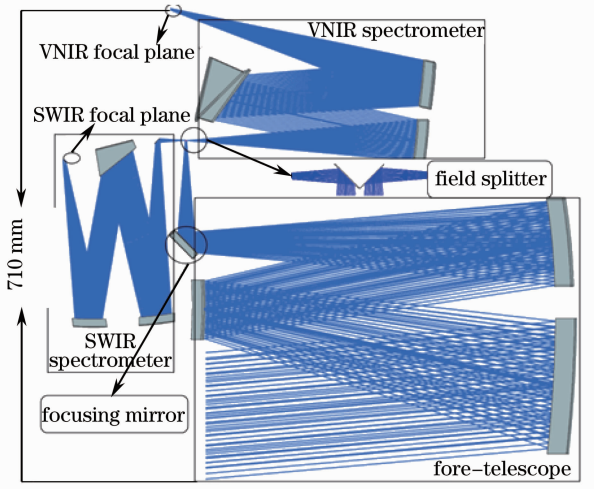


图 8 方形孔径成像光谱仪光学系统图  
Fig. 8 Layout of imaging spectrometer with rectangular aperture

如图 9 所示的圆形孔径成像光谱仪,其 Y 方向镜面孔径增大,为了机械设计有一定的余地,视场离轴明显加大(和方形尺寸相比离轴角度增大约 2°),这样造成整个系统纵向尺寸的增大约 130 mm。图 11 给出了圆形孔径下的传递函数,可知,整体下降约 0.1。

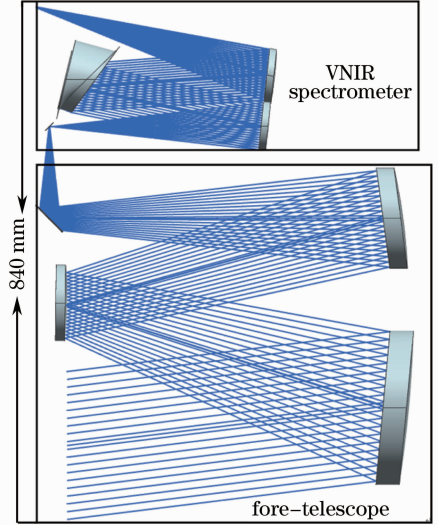


图 9 圆形孔径成像光谱仪光学系统图  
Fig. 9 Layout of imaging spectrometer with circle aperture

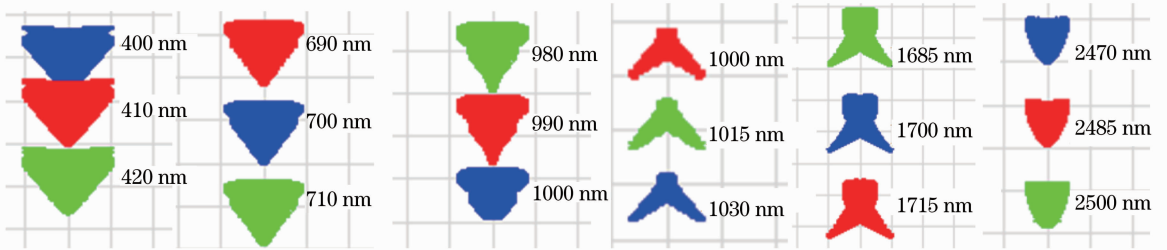


图 10 SWIR 和 VNIR 光学系统点列斑

Fig. 10 Spot diagram of VNIR and SWIR optical system

表 2 SWIR 和 VNIR 不同波长的全视场调制传递函数和色散值

Table 2 MTF of whole field and dispersion value of SWIR and VNIR imaging spectrometer

VNIR imaging spectrometer			SWIR imaging spectrometer		
$\lambda$ /nm	MTF at 28 lp/mm	$\Delta\lambda$ / (nm/36 $\mu$ m)	$\lambda$ /nm	MTF at 16.7 lp/mm	$\Delta\lambda$ / (nm/30 $\mu$ m)
400	0.643	14.2	1000	0.761	11
480	0.662	7.6	1200	0.752	10.4
560	0.675	7.826	1400	0.732	10.2
640	0.689	9.23	1600	0.72	9.4
700	0.690	9.54	1750	0.701	9.0
780	0.690	9.73	1900	0.684	8.4
860	0.687	10.1	2100	0.657	7.9
930	0.684	10.53	2300	0.624	7.1
1000	0.666	10.59	2500	0.578	6.8
Average	0.676	9.93	Average	0.690	8.9

为验证胶合棱镜对色散非线性的校正,采用同样的参数设计了仅采用石英作为分光棱镜的成像光谱仪,并对其色散关系进行了分析,如表 4 所示,其

中  $\Delta\lambda$  平均值为 9.98。由表 2 和表 4 的对比可知,胶合棱镜对于棱镜非线性校正有着很大的帮助。

表 3 成像光谱仪不同视场、波长的点列斑半径均方根值

Table 3 RMS radii for different fields and wavelengths of imaging spectrometer

Wavelength /nm	VNIR			Wavelength /nm	SWIR		
	Field /( $^{\circ}$ )				Field /( $^{\circ}$ )		
	0	0.35	0.47		0	0.35	0.47
400	9.7	10.78	12.276	1000	9.03	6.12	11.73
480	8.6	10.69	13.24	1200	9.43	5.43	10.83
560	7.45	9.68	12.66	1400	10.33	6.19	10.91
640	6.79	9.00	12.24	1600	11.65	8.00	11.89
700	6.46	8.57	12.03	1750	12.89	9.81	13.19
780	6.28	8.2	11.77	1900	14.37	11.93	14.93
860	6.28	8.10	11.89	2100	16.71	15.20	17.88
930	6.69	7.92	11.68	2300	19.53	18.98	21.34
1000	7.06	7.92	11.58	2500	22.93	23.363	25.91
Average	7.26	8.98	12.15	Average	14.01	11.67	15.4

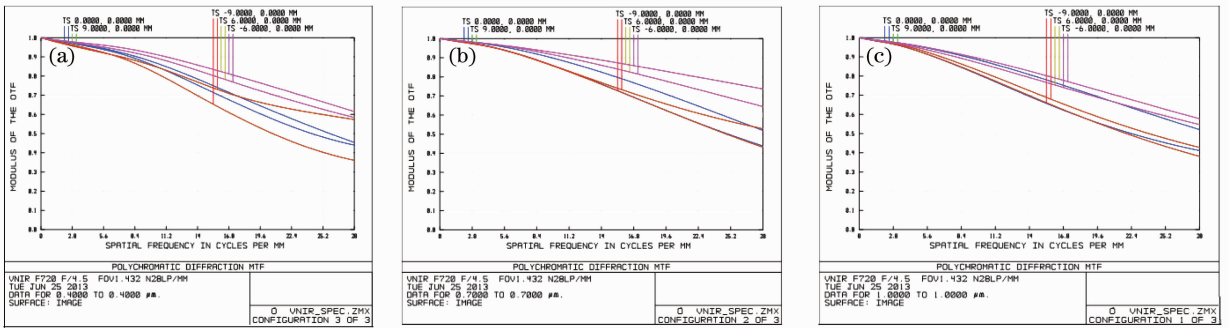


图 11 圆形孔径 VNIR 成像光谱仪 MTF 曲线

Fig. 11 MTF curves of VNIR imaging spectrometer with circle aperture

表 4 单个石英棱镜光谱仪的色散值

Table 4 Dispersion value of the single silica prism spectrometer

Wavelength /nm	400	480	560	640	700	780	860	930	1000
$\Delta\lambda /(\text{nm}/36 \mu\text{m})$	15.1	13.3	11.7	10.4	9.5	8.6	7.8	7.1	6.5

## 4 结 论

通过具体的星载应用要求分析,确定了实际应用的成像光谱仪的设计指标,并设计了一实际应用的成像光谱仪系统。该成像光谱仪全部采用反射式结构,提高了系统的光能透过率。为避免会聚光路中分色片的应用,利用棱镜作为沿轨道方向视场分离器,分别实现 SWIR 和 VNIR 光谱仪成像;成像镜和准直镜都采用单个镜面,显著减小了仪器的体积和重量,而且像质优良。为校正棱镜色散造成的非线性缺陷,采用双胶合棱镜作为色散元件,降低了棱镜非线性造成的影响。对比使用方形孔径设计结果和圆形孔径结果可知,选择方形孔径可以大大减

小纵向尺寸,而且更有利于像差的校正,胶合棱镜也能够对棱镜色散非线性进行有效校正。设计结果表明,光学系统可满足光谱分辨率和地面像元分辨率的成像要求,而且结构简单,易装配,便于工程应用。

## 参 考 文 献

- 1 Tang Panke, Li Yongli, Li Guobin, *et al.*. Imaging spectrometry remote sensing technology and its applications in geology [J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20(2): 160-165. 唐攀科, 李永丽, 李国斌, 等. 成像光谱遥感技术及其在地质中的应用[J]. 矿产与地质, 2006, 20(2): 160-165.
- 2 P Jerram, D Burt, D Morris, *et al.*. Design of image sensors for hyperspectral applications [C]. SPIE, 2009, 7474: 74741E.
- 3 Mark Folkman, Jay Peariman, Lushalan Liao, *et al.*. EO-1/Hyperion hyper-spectral imager design, development,

- characterization, and calibration [C]. SPIE, 2001, 4151: 40—51.
- 4 Zhao Huijie, Cheng Xuan, Zhang Ying. Design of acousto-optic imaging spectrometer for Mars exploration [J]. Opt Precision Eng, 2012, 20(9): 1945—1951.  
赵慧杰, 程宣, 张颖. 用于火星探测的声光可调谐滤波器成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1945—1951.
- 5 Su Lijuan. Study on the Beam Splitting Technology of the Imaging Spectroscopy [D]. Xi'an; Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. 1—14.  
苏丽娟. 成像光谱仪分光技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2006. 1—14.
- 6 Wang Yiqun, Miao Chun'an, Yan Changxiang. Choice of spectral-splitting modes in space-borne hyper-spectral imager [J]. Chinese J Optics and Applied Optics, 2009, 2(4): 304—308.  
汪逸群, 苗春安, 颜昌翔. 星载高分辨率超光谱成像仪分光方式的选择[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(4): 304—308.
- 7 Liu Jianpeng, Tang Yi, Huang Gang, *et al.*. Design method of optical system of improved Czerny-Turner imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322007.  
刘健鹏, 唐义, 黄刚, 等. 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322007.
- 8 Liu Yujuan, Cui Jicheng. Design and application of imaging spectrometer with convex grating [J]. Opt Precision Eng, 2012, 20(1): 52—56.  
刘玉娟, 崔继承. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 52—56.
- 9 Liu Zhuang, Gong Yan. Design of optical system for solar extreme-ultraviolet imaging spectrometer using holographic varied line spacing grating [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1116001.  
刘状, 巩岩. 应用全息变间距光栅的极紫外成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1116001.
- 10 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guangyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0822001.  
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0822001.
- 11 Liu Xiaomei, Xiang Yang. Design of telecentric off-axis three-mirror system of imaging spectrometer with wide field of view [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622004.  
刘小梅, 向阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0622004.
- 12 Wang Yun, Yan Changxiang. Sub-pixel image registration of spectrometer images [J]. Opt Precision Eng, 2012, 20(3): 661—666.  
王运, 颜昌翔. 光谱仪图像的亚像素配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 661—666.
- 13 Yan Changxiang, Zhang Junqiang, Zheng Yuquan, *et al.*. A Type of Field Splitter with Wide Range Imaging Spectrometer [P]. China: CN10943602A, 2011—01—12.  
颜昌翔, 张军强, 郑玉权, 等. 一种宽幅成像光谱仪视场分离器[P]. 中国: CN10943602A, 2011—01—12.
- 14 Zhang Junqiang, Yan Changxiang, Zheng Yuquan, *et al.*. Spectral line shift property of prism dispersive imaging spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(12): 3429—3433.  
张军强, 颜昌翔, 郑玉权, 等. 棱镜色散成像光谱仪的谱线漂移特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(12): 3429—3433.

栏目编辑: 张 腾