

文章编号:1004-4213(2010)07-1334-6

棱镜分光光谱仪的光学系统设计与光谱特性计算*

王欣,丁学专,杨波,刘银年,王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

摘要:设计了离轴全球面成像光谱仪和离轴校正透镜棱镜分光成像光谱仪两种光学系统.在离轴全球面成像光谱仪的基础上,提出了改进型离轴校正透镜光谱仪,仅采用一个色散棱镜,避免了大口径同心透镜;有效校正了大视场像差,色散非线性修正效果显著.通过调节离轴角和光谱仪的焦距控制了畸变,补偿了与波长相关的狭缝弯曲,减小了残余像差,并降低了整个光谱仪工程实施的难度.从工程合理性、加工可实现性和光学性能等方面比较了两个系统的特点,推导和给出了光谱分辨率和狭缝弯曲的计算结果.从设计结果看,改进型离轴校正透镜光谱仪的传递函数最小值大于 75%,而离轴全球面成像光谱仪的最小值只大于 60%.从加工难易程度看,离轴全球面成像光谱仪采用一个接近 $\Phi 200$ mm 的石英透镜,其透射材料远不如改进型离轴校正透镜光谱仪透镜材料的均匀性和面形准确度高,而且大口径透镜大大增加了制备难度和成本.从工程布局看,改进型离轴校正透镜光谱仪充分考虑了与机械结构的匹配,狭缝与第一面反射镜的轴向距离较合理.从光谱特性看,两个光学系统的光谱分辨率结果基本接近,离轴全球面成像光谱仪光谱弯曲结果略好于离轴校正透镜结构.因此,综合比较得出离轴校正透镜光谱仪是最佳的选择方案,该系统可应用在短波红外波段的光谱成像的遥感探测.

关键词:棱镜分光光谱仪;离轴校正透镜;色散非线性;狭缝弯曲

中图分类号: TN21

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103907.1334

0 引言

超光谱成像技术是在 20 世纪 80 年代前后的成像光谱技术基础上发展起来的.经过十多年的发展,成像光谱技术在机载平台获得了成功的应用.先后有美国国家航空和宇宙航行局的机载可见/红外成像光谱仪 (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS), 欧洲的机载成像光谱仪 (Airborne PRISM EXPERIMENT, APEX), 中国的实用型模块化成像光谱仪 (Operational Modular Imaging Spectrometer, OMIS) 以及推帚式超光谱成像仪 (Pushbroom Hyperspectral Imaging, PHI) 等.在机载仪器成功研制并推广应用的基础上,世界各国航天大国纷纷开展超光谱成像技术的空间应用,主要有欧洲的小型高分辨率成像光谱仪 (Compact High Resolution Imaging Spectrometer, CHRIS)、澳大利亚的资源环境成像成像光谱仪 (Australia Resource Environment Imaging Spectrometer, AREIS) 和意大利的超光谱先驱应用卫星 (Hyperspectral Precursor and Application

Mission, PRISMA) 等^[1].

自从超光谱技术出现以来,各种不同的分光技术都在超光谱成像仪中得到了应用,其中棱镜分光系统是唯—光谱无叠级的系统,且结构简单,具有大的自由光谱范围;对整个光谱,通光量不变并且具有很高的透过率.因此用镜面数少的望远镜和分光效率高的棱镜光谱仪组成的光学结构可提高系统总透过率,以达到提高系统辐射信号收集能力的目的.

国外以棱镜作为分光形式的有效载荷有欧空局 CHRIS、意大利航天局 PRISMA、机载成像光谱仪 APEX 等. CHRIS 采用曲面棱镜校正像差,结合三反中继成像系统,获得了较好的效果. PRISMA 的光学系统设计采用透射棱镜放置于平行光路上来进行分光,可获得更高的效率和更小的偏振灵敏度. APEX 光谱仪中的棱镜置于平行光路中,色散后的光路里采用透镜组来校正像差,为了分割开短波通道和可见近红外通道第一个色散棱镜的第二面镀有分色膜系,对于可见近红外波段有更高的反射率.

在设计整个成像光谱仪中,光学系统设计决定仪器的最后性能^[2].目前比较典型的是离轴全球面成像光谱仪 (Off-axis Imaging Spectrometer, OASIS) 和离轴非球面准直会聚光谱仪^[3].本文设计

* 国家高技术研究发展计划项目资助

Tel: 021-65420850-22605 Email: wangxin@mail. sitp. ac. cn

收稿日期: 2009-09-16

修回日期: 2010-03-22

的离轴校正透镜光谱仪光学系统由准直光学系统、色散元件、成像光学系统三个部分组成. 相对其它结构^[4], 离轴校正透镜的采用, 避免了大口径同心透镜, 仅采用一个色散棱镜. 该结构有效校正了大视场像差, 色散非线性修正效果显著, 通过调节离轴角和光谱仪的焦距控制了畸变, 补偿了与波长相关的狭缝弯曲, 减小了残余像差, 并降低了整个光谱仪工程实施的难度.

1 两种棱镜分光光谱仪的光学设计

成像光谱仪由望远系统与光谱仪组成. 扫描反射镜使接收地面辐射转向入射到望远镜, 获得地面景物图像, 通过入射狭缝成为限定的条式视场入射到光谱仪, 用面阵探测器接收入射狭缝的被色散的光谱图像. 探测器阵列的行输出空间信息, 而列输出光谱信息.

光谱仪的性能指标要求是光谱范围 $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$; 物方数值孔径 0.2; 色散范围 2.1 mm; 平均光谱分辨率 18.92 nm; 光谱弯曲小于 $30 \mu\text{m}$; 变焦比 0.8; 入射狭缝尺寸 $(20 \times 0.0375) \text{mm}$; 畸变小于

5%; 光学效率大于 0.45.

1.1 OASIS 结构

离轴全球面成像光谱仪 OASIS 是采用折反射式光学系统的成像光谱仪^[5], 其中采用一个大的同心镜穿插在整个光路中, 光学系统采用利特罗结构、相对光阑表面是完全对称的. 由于光谱仪的狭缝长度较大, 全球面反射镜设计结果像质不能符合要求, 因此基于 OASIS 形式将两个球面反射镜改成非球面反射镜. 为了避免产生色差, 透镜的折射率需要很低, 可补偿反射镜的几何象差(球差、彗差和象散). 设计光路包括两个离轴反射镜、一个同心透镜和一个色散棱镜. 设计光路和结果见图 1 和图 2, 设计参量见表 1.

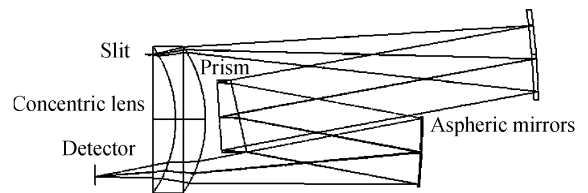


图 1 OASIS 光路
Fig. 1 Optical structure of OASIS

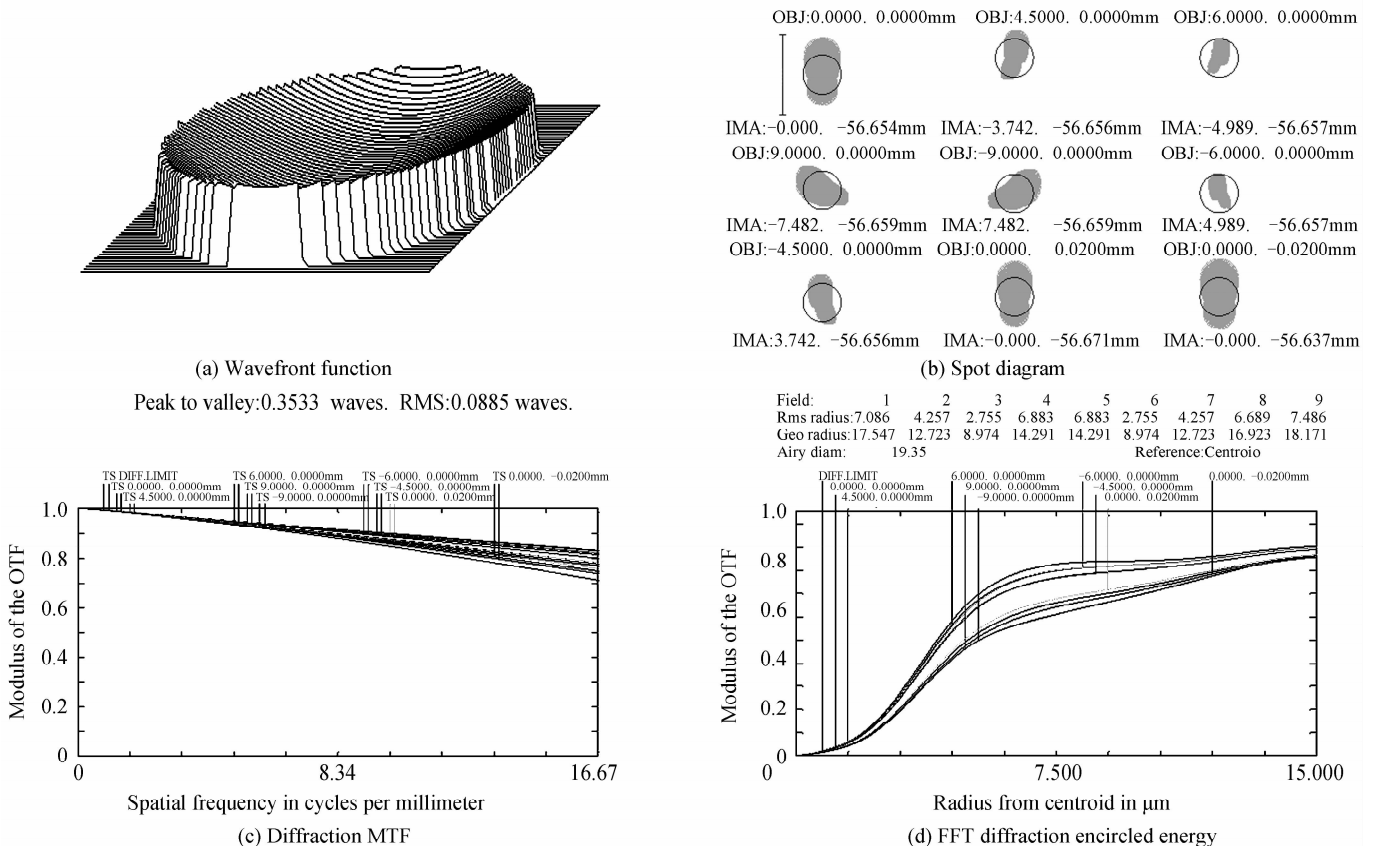


图 2 OASIS 光学成像结果
Fig. 2 Imaging results of OASIS

表 1 OASIS 光谱仪系统的结构参量
Table 1 Parameters of OASIS

Element	Curvature/ mm	Thickness/ mm	Diameter/ mm	Material
Slit	—	30	19×0.036	Metal
Concenter Lens	129.393	20	φ150	Silica
Collimation Mirror	777.286	332.85	170×90	Zerodur
Dispersion Prism	—	300.648	82×72	Silica
Focus Mirror	657.36	183.6	82×72	Zerodur
Focal Plane	—	80.94	—	—

1.2 离轴校正透镜准直会聚结构

此结构在焦面前采用了一个离轴校正透镜,保留了 OASIS 的校正透镜,通过调节离轴量,在一定的范围内调节光谱仪的畸变;避免了采用大口径透镜同时穿插在准直光束和色散光束中. 光路、像质见图 3 和图 4,设计参量见表 2.

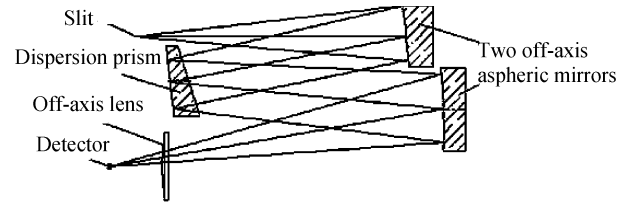
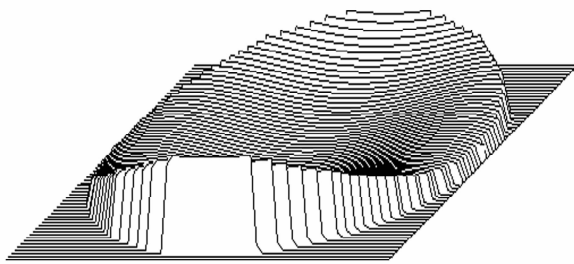
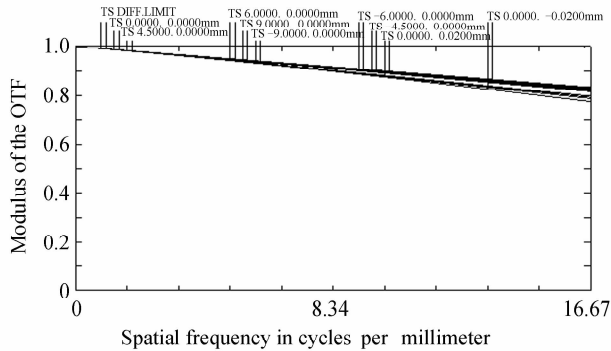


图 3 离轴校正透镜光谱仪光学系统结构
Fig. 3 Optical layout of spectrometer with off-axis correction lens

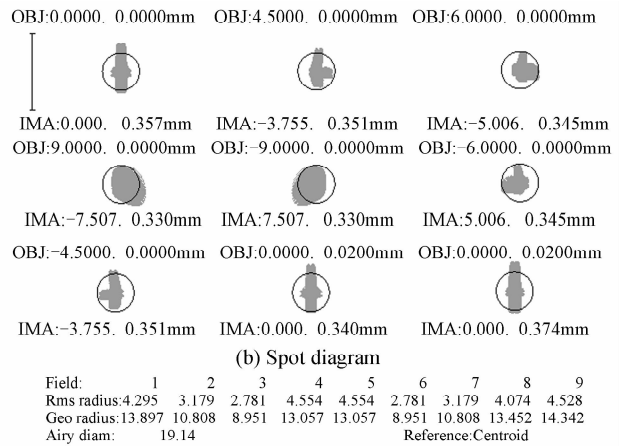


(a) Wavefront function

Peak to valley:0.2799 waves. RMS:0.0505 waves.

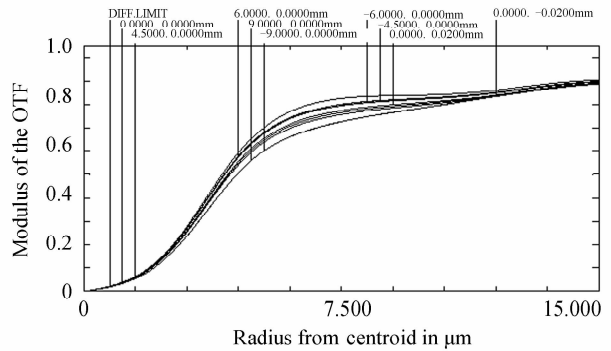


(c) Diffraction MTF



(b) Spot diagram

Field: 1 2 3 4 5 6 7 8 9
Rms radius:4.295 3.179 2.781 4.554 4.554 2.781 3.179 4.074 4.528
Geo radius:13.897 10.808 8.951 13.057 13.057 8.951 10.808 13.452 14.342
Airy diam: 19.14 Reference:Centroid



(d) FFT diffraction encircled energy

图 4 离轴校正透镜光谱仪的光学成像结果

Fig. 4 Imaging results of spectrometer with off-axis lens

两个非球面反射镜分别为二次双曲面、椭球面,它们的焦距分配需要充分考虑总系统的焦距要求,并分别将光束准直和会聚,其作用既校正了轴外像差,又减小了光谱弯曲和光谱非线性. 光谱仪根据调节畸变校正狭缝弯曲原理来进行设计. 虽然用两个反射镜消象散的设计方案会产生畸变,但通过适当

地调节畸变分布,在像面上可得到直线图像. 控制畸变的主要参量是离轴角和准直镜、成像镜的焦距. 通过调节光谱仪畸变可部分地补偿与波长相关的狭缝弯曲. 在给定入射狭缝尺寸的情况下,在色散后光学系统中通过增加准直仪或成像器的焦距,减少色散角和空间视场,使残余像差达到足够小.

表 2 离轴校正透镜光谱仪系统的结构参数

Table 2 Parameters of spectrometer with off-axis lens

Element	Curvature/ mm	Thickness/ mm	Diameter/ mm	Material
Slit	—	263	19×0.038	Metal
Collimation Mirror	600.543 6	191.38	80×60	Zerodur
Dispersion Prism	—	223.57	80×65	Silica
Focus Mirror	510.660 9	249.62	110×80	Zerodur
Off-axis lens	240.4	5.6	φ70	Silica
Focal Plane	—	46.32	—	—

2 棱镜分光光谱仪光学系统的色散非线性性和狭缝弯曲计算结果

2.1 色散非线性

棱镜材料的折射率 n 随入射光波长而变化,不同波长的光线以相同入射角通过同一棱镜时会得到不同的偏向角,即产生色散.棱镜分光光谱仪就是利用棱镜的色散原理获得材料的光谱^[6].棱镜的色散能力以角色散率 $d\delta/d\lambda$ 表示. λ 为入射光波长, δ 为偏向角.棱镜的光谱色散具有大的非线性,导致光谱采样间隔不一致,使仪器的辐射灵敏度受影响较大^[7].

设波长为 λ 的光波以 i_1 角射入棱镜的工作面 AB ,经过折射和工作面 CD 反射后,以 i'_2 角射出.令 i'_1, i'_2, i_3 分别为光线在 AB 边的折射角,在 CD 边反射角和在 AB 边的入射角;令 α 为棱镜的折射顶角, δ 为光线的偏向角.假设棱镜是用折射率为 n 的材料制成的.棱镜色散各参量见图 5.

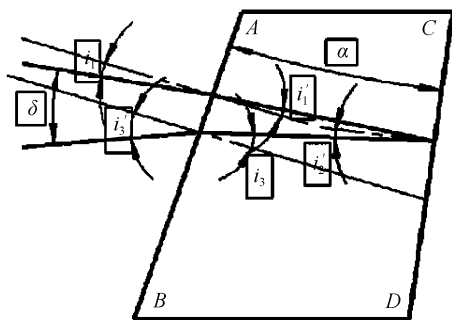


图 5 光谱非线性色散函数参量定义示意图

Fig. 5 Parameter denotation of nonlinear spectral dispersion

由光路的入射角 i_1 , 可以计算偏向角 δ

$$\begin{aligned} \sin i_1 &= n \times \sin i'_1 \\ i_3 &= 2 \times \alpha - i'_1 \\ \sin i'_3 &= n \times \sin i_3 \\ \delta &= i'_3 - i_1 \end{aligned} \quad (1)$$

所以

$$\delta = \arcsin \left[n \times \sin \left(2 \times \alpha - \arcsin \frac{\sin i_1}{n} \right) \right] - i_1 \quad (2)$$

式中 i_1 和 α 均为常量,偏向角 δ 为 n 的函数,也是波长的函数.线色散率 $d\lambda/d\lambda$ 表示两条光谱线在光谱成像面上的距离,与角色散率 $d\delta/d\lambda$ 和物镜的焦距 f 呈线性关系.

经过计算, OASIS 的平均光谱分辨率为 18.46 nm、离轴校正透镜光谱仪为 18.65 nm.两个结果见图 6 和图 7.

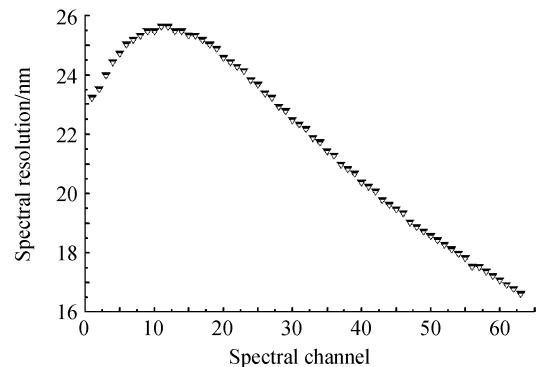


图 6 OASIS 光谱仪的色散非线性设计结果

Fig. 6 Nonlinear spectral dispersion resolution of OASIS

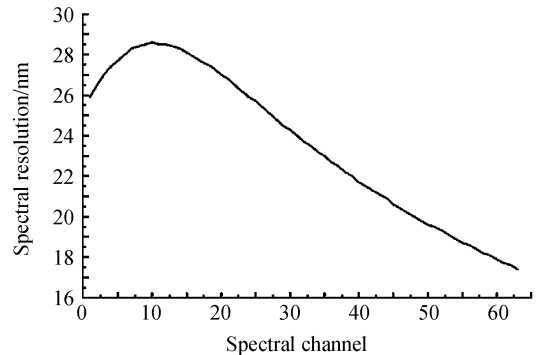


图 7 离轴校正透镜光谱仪的色散非线性设计结果

Fig. 7 Nonlinear spectral dispersion resolution of spectrometer with off-axis lens

2.2 狭缝弯曲

用棱镜作色散元件共有的特点是会产生狭缝图像弯曲,这是由于在狭缝的末端准直光束入射角倾斜而引起的.弯曲与波长有关.为了满足像元配准的要求,需要消除与波长相关性或至少使它的影响变得最小.对狭缝弯曲的校正可通过地面信号处理来标定^[8].

设棱镜的色散顶角为 α ,狭缝上端点射出光线的法线与光轴的夹角为 $i_{1\beta}$,通过棱镜第一面的折射角为 $i'_{1\beta}$; N 为假定折射率,与狭缝轴外光线与仪器光轴的夹角有关.推导可知弯曲的形状类似一个抛物线,它顶点的曲率半径为

$$R = \frac{[(n^2 - 1)/2n] \{ \sin(2\alpha) / \cos i'_{1\beta} \cos \{ \arcsin [N \sin(2\alpha - i'_{1\beta})] \} \}}{\quad} \quad (3)$$

可以看出,折射率愈大,则棱镜谱线的曲率半径愈小,因此波长愈短则弯曲得愈厉害.棱镜谱线的曲率与棱镜的入射角的余切成反比,入射角越大, R 也愈小,则狭缝越长弯曲愈厉害.所以选择棱镜材料时需选用折射率小的.两种光谱仪不同波长的光谱弯曲量见图8和图9.可以看出OASIS和离轴校正光谱仪最大狭缝高所对应的各波长的弯曲矢高接近为 $24.6\ \mu\text{m}$ 和 $28.35\ \mu\text{m}$ 的常量,其光谱弯曲矢高随波长的变化量控制在 $2\ \mu\text{m}$ 之内.

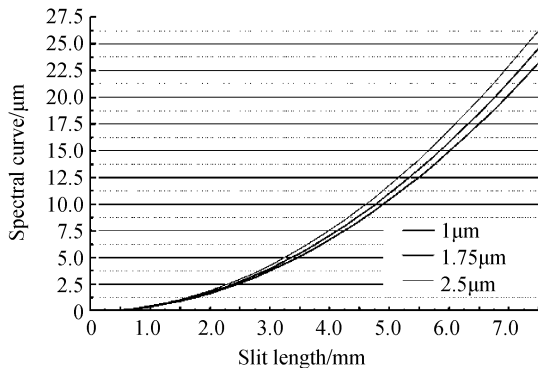


图8 OASIS光谱仪的狭缝弯曲设计结果
Fig.8 Slit curve of OASIS

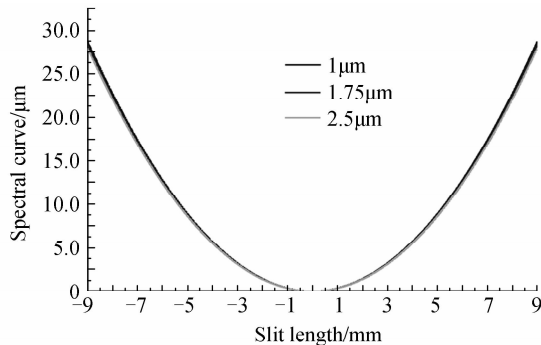


图9 离轴校正透镜光谱仪的光谱弯曲设计结果
Fig.9 Slit curve of spectrometer with off-axis lens

3 结论

棱镜分光光谱仪因其具有高的辐射效率,且无光谱叠级问题,而广泛应用到高信噪比的超光谱成像技术中.本文设计了两种棱镜分光成像光谱仪的光学系统并对OASIS结构和离轴校正透镜光谱仪进行比较:从设计结果看,后者优于前者,后者MTF

最小值大于75%,而前者的最小值只大于60%.从加工难易程度看,前者采用一个接近 $\Phi 200\ \text{mm}$ 的石英透镜,如此大的透射材料远不如后者小透镜材料的均匀性和面形准确度高,而且大口径透镜大大增加了制备难度和成本.从工程布局看,狭缝与第一面反射镜的轴向距离前者非常紧张,而后者则充分考虑了与机械结构的匹配.从光谱特性看,两者的光谱分辨率结果基本接近,前者光谱弯曲结果略好于离轴校正透镜结构.因此,综合比较得出离轴校正透镜光谱仪是最佳的选择方案,该系统可应用在 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 短波红外波段的光谱成像的遥感探测.

参考文献

- [1] JEFFERY J. Hyperspectral imagers for current and future missions[C]. *SPIE*, 2000, **4041**: 121-124.
- [2] NEELAM Gupta. Hyperspectral imager development at Army Research Laboratory[C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 1-20.
- [3] PORTER W M. System overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer[C]. *SPIE*, 2001, **834**: 114-126.
- [4] LI You-ping, YU Bing-xi, HAN Chang-yuan, *et al.* Tradeoff optimization design of optical configuration on imaging spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(6): 974-979.
李幼平,禹秉熙,韩昌元,等.成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(6): 974-979.
- [5] LOBB D. Imaging spectrometers using concentric optics[C]. *SPIE*, 1997, **3118**: 342-347.
- [6] ZHENG Yu-quan, YU Bing-xi. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, **6**(1): 75-80.
郑玉权,禹秉熙.成像光谱仪分光技术概览[J]. *遥感学报*, 2002, **6**(1): 75-80.
- [7] FENG Yu-tao, XIANG Yang, CHEN Xu. Radiance measurement characteristics of an imaging spectrometer with prism dispersion[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(1): 15-22.
冯玉涛,向阳,陈旭.棱镜色散成像光谱仪光谱辐射采集特性[J]. *红外技术*, 2009, **31**(1): 15-22.
- [8] CHEN Li-wu, YANG Jian-feng, HONG Xin-hua, *et al.* Wide bands long focal refracting lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1123-1126.
陈立武,杨建峰,洪新华,等.宽波段折射式长焦光学镜头[J]. *光子学报*, 2004, **33**(9): 1123-1126.

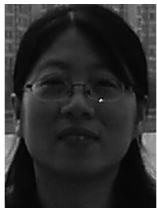
Optical Design and Spectral Calculation of Prism Spectrometer

WANG Xin, DING Xue-zhuan, YANG Bo, LIU Yin-nian, WANG Jian-yu

(*Shanghai Institute of Technical & Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

Abstract: The optical configurations of off-axis spherical lens and off-axis correcting lens imaging spectrometer are designed. Based on the optical system of off-axis spherical lens imaging spectrometer, the spectrometer with off-axis lens is designed. This system adopts an off-axis lens in order to adjust large field aberration and avoids large diameter concentric lens. One prism corrects nonlinear dispersion and meets the request of spectral resolution. Distortion is controlled through adjusting off-axis angle and mirrors' focus, which compensate spectral curve and decrease residual aberration. It is easy to reduce production difficulty. The characteristic of two systems is discussed from the aspects of engineering layout, production difficulty and image quality. And the result of spectral nonlinear and slit curve is shown. The minimum modulated transfer of off-axis spherical lens system is 75 percent better than the value 60 percent of off-axis correcting lens. The front system uses a silica lens which diameter is larger than 200 mm. The material uniformity and surface precision of the latter system is far better than the front system, and the production difficulty is decreased. The latter system considers the matching with mechanical structure, and it is more feasible for the distance between slit and the first mirror of latter system. The spectral resolution of front system is close to the latter, and the slit curve of the front system is slightly better than the latter system. The comparison shows that the latter is optimal optical layout, and it can be applied to remote sensing working at short wavelength.

Key words: Imaging spectrometer with dispersion prism; Off-axis correction lens; Spectral nonlinear; Slit curve



WANG Xin was born in 1977. She obtained her Ph. D. degree in 2010 and her research interests focus on the design of infrared optical system in space.