

## 空间高光谱成像仪的光学设计

巩盾,王红

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室,  
吉林 长春 130033)

**摘要:**空间高光谱成像仪是现代空间遥感器的新型载荷,设计的空间高光谱成像仪光学系统由前置望远系统和光谱成像系统两部分组成,对前置望远系统和光谱成像系统分别设计,再进行组合优化。前置望远系统采用离轴三反结构,在增大幅宽、提高成像质量的同时减小高光谱成像仪光学系统的畸变。为了保证光学系统结构的紧凑,前置望远系统采用视场分离的方式设计,进一步提高了光学系统的分辨率。凸面光栅是现代光栅刻划技术的最新成果,光谱成像系统采用次镜为凸面光栅的 Offner 光栅光谱仪,实现了光谱成像系统的高分辨率与小型化。组合优化后的高光谱成像仪光学系统幅宽大、体积小、成像质量好、光谱分辨率高、光谱通道数多,全视场全谱段 MTF 在 Nyquist 频率下高于 0.7,成像弥散圆 80% 的能量集中在  $\Phi 15 \mu\text{m}$  范围内,小于探测器  $18 \mu\text{m}$  的像元尺寸,均高于系统技术指标要求。

**关键词:** 光学设计; 离轴三反; 视场分离; Offner 光谱仪

中图分类号: V248.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)02-0541-05

## Optical design of hyperspectral imaging spectrometer on space

Gong Dun, Wang Hong

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The hyperspectral imaging spectrometer is a new type of load in the modern space remote sensor. The hyperspectral imaging spectrometer optical system designed in this paper has been made up by two parts, front telescope system and imaging spectrometer system. The front telescope system and imaging spectrometer was designed respectively, then assembled and optimized. Off-axis TMA structure was used by front telescope system to increase width, improve image quality, and reduce distortion. Separated fields method was applied on front telescope system for larger swath width and better image quality. Imaging spectrometer was designed by Offner structure with grating convex second mirror. Assembled system has larger swath width, smaller volume, better image quality, higher spectral resolution, and more spectral passage. The MTF of every fields and every spectrum is higher than 0.7 at Nyquist frequency, the diffusion circle of image with 80% energy is  $15 \mu\text{m}$ , smaller than CCD pixel size, so the image quality reaches the technology target of system.

**Key words:** optical design; TMA; separated fields method; offner spectrometer

收稿日期: 2013-06-13; 修订日期: 2013-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(60507003)

作者简介: 巩盾(1982-),男,博士,副研究员,主要从事光学设计、光谱成像系统设计等方面的研究。Email: gongdun@sina.com

## 0 引言

成像光谱仪在 20 世纪 80 年代由美国喷气推进实验室首先提出,它把成像技术与光谱技术相结合,可以同时采集地面物体的空间特征和光谱特性。光谱成像仪可以对陆地、沿海、海洋等多种环境进行精确探测,在工业、农业、制造业、医药学和遥感测绘等领域都有广泛应用。

高光谱相机是在成像光谱仪技术基础上发展而来的新型光谱仪器,是现代空间遥感平台的主要载荷,逐渐成为空间遥感技术发展的焦点之一。随着光学设计、光电探测器、光栅等光学元件的检测与加工技术的不断完善,空间遥感高光谱成像已经迈入实际应用阶段。

高光谱成像仪的光谱范围宽、谱段多、光谱分辨率高,成像质量好。高质量的高光谱成像仪波段宽度可以达到纳米量级,从可见光到近红外,谱段数可以达到几十至几百个,更宽的谱段范围和更高的光谱分辨率可以为遥感探测提供更加丰富的空间与光谱信息,增加资源探测的研究依据。高光谱成像仪在多种行业中发挥着关键作用,发展潜力巨大。因此,发展高光谱相机具有十分重要的意义。随着遥感技术的提高,对高光谱成像仪的空间分辨率、光谱分辨率和幅宽有了更高要求,如何在高光谱成像仪原有优点的基础上提高空间分辨率和光谱分辨率,增大幅宽成为近期研究的热点课题<sup>[1-5]</sup>。

## 1 光学系统参数的确定

文中讨论的高光谱成像仪的技术指标主要有:轨道高度 500 km;地面像元分辨率 20 m;幅宽 100 km; CCD 像元尺寸 18  $\mu\text{m}$ ; CCD 像元数 3 072 $\times$ 128; 谱段范围 0.4~1  $\mu\text{m}$ ;光谱分辨率 6 nm;光谱通道数 100 个;实验室静态传递函数  $MTF \geq 0.2$ (Nyquist 频率);

根据高光谱成像仪的技术指标可以计算出光学系统参数。

### (1) 光学系统的视场

光学系统的视场可以由下式计算:

$$2\omega = 2\arctan\left(\frac{GW/2}{H}\right) = 2\arctan\left(\frac{100/2}{500}\right) = 11.42^\circ$$

式中: $\omega$  为系统视场角; $H$  为轨道高度; $GW$  为幅宽。

### (2) 光学系统的焦距

光学系统的焦距可由下式计算:

$$f' = \left(\frac{a \cdot H}{GSD}\right) = \left(\frac{18 \mu\text{m} \times 500 \text{ km}}{20 \text{ m}}\right) = 450 \text{ mm}$$

式中: $f'$  为系统焦距; $a$  为像元尺寸; $H$  为轨道高度; $GSD$  为地面像元分辨率。

### (3) 光学系统的相对孔径

确定相对孔径应考虑以下两个因素:衍射分辨率和信噪比。

为了清晰获取所需的地面像元分辨率  $GSD$ ,要求地面像元分辨角大于由光学系统口径  $D$  所决定的衍射分辨角,即  $GSD/H \geq \lambda/D$ ,所以相机光学口径应大于 20 mm。

为保证足够高的信噪比,并且平衡光学系统的外形尺寸,相对孔径确定为  $D/f' = 1/4$ ,光学系统孔径为 112.5 mm。

### (4) 传递函数

高光谱成像仪的实验室静态传递函数  $MTF_{\text{实验室静态}}$  主要由光学传递函数  $MTF_{\text{光学}}$  和探测器的传递函数  $MTF_{\text{探测器}}$  的乘积确定,即

$$MTF_{\text{实验室静态}} = MTF_{\text{光学}} \times MTF_{\text{探测器}}$$

$MTF_{\text{光学}}$  由光学设计传递函数  $MTF_{\text{设计}}$  和加工装调引起的传递函数  $MTF_{\text{加工}}$  有关,即:

$$MTF_{\text{光学}} = MTF_{\text{设计}} \times MTF_{\text{加工}}$$

而探测器的传递函数  $MTF_{\text{探测器}}$  由几何传递函数  $MTF_{\text{几何}}$  和电子学传递函数共  $MTF_{\text{电子学}}$  同决定:

$$MTF_{\text{探测器}} = MTF_{\text{电子学}} \times MTF_{\text{几何}}$$

探测器的几何传递函数  $MTF_{\text{几何}}$  可有下式来表示:

$$MTF_{\text{几何}} = \text{sinc}\left(\frac{1}{2} \times \frac{u}{u_n} \times \frac{d}{p}\right) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{u}{u_n} \times \frac{d}{p}\right)}{\frac{\pi}{2} \times \frac{u}{u_n} \times \frac{d}{p}}$$

式中: $u$  为空间频率; $u_n$  为 Nyquist 频率。当  $d=p$  时,有

$$MTF_{\text{几何}} = \text{sinc}\left(\frac{1}{2} \times \frac{u}{u_n}\right) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{u}{u_n}\right)}{\frac{\pi}{2} \times \frac{u}{u_n}}$$

当  $u=u_n$  时,  $MTF_{\text{几何}} = 0.637$ 。考虑到加工装配等因素,一般取  $MTF_{\text{加工}} = 0.85$ ;  $MTF_{\text{电子学}}$  为 0.90。则实验室静态传递函数为:

$$MTF_{\text{实验室静态}} = MTF_{\text{光学}} \times MTF_{\text{探测器}} = MTF_{\text{设计}} \times MTF_{\text{加工}} \times MTF_{\text{电子学}} \times MTF_{\text{几何}}$$

根据 Nyquist 频率下静态传递函数大于 0.2 的

技术指标计算,要求光学系统设计传递函数 Nyquist 频率下大于 $0.5^{[6-8]}$ 。

### 2 前置望远系统的光学设计

从光学系统设计指标可以看出:该高光谱相机光学系统是一个大视场、宽波段、高分辨率星载高光谱相机光学系统,由指向镜、前置望远系统和光谱成像系统组成。考虑到空间温度环境的复杂性与光学系统的结构紧凑性,高光谱成像仪采用反射式结构,根据目前光学设计和加工技术的进展情况,在综合考虑各种光学结构方案后,选择前置离轴三反望远系统和凸面光栅光谱仪组合的结构型式。

为了在大视场前提下满足更高的分辨率要求,对前置望远系统采用视场分离设计。在前置望远系统的焦平面前加入刀口反射镜,将全视场分为视场1与视场2,控制刀口反射镜的切入位置,不挡住视场2入射光束的同时又能反射视场1的光束。一次曝光中,分割的视场不能对地面同一目标成像,通过沿轨方向的推扫获得100 km的幅宽。

在光学设计时,分别定义离轴三反系统的X、Y方向视场,其中X方向视场为 $0\sim 5.71^\circ$ 和 $-5.71\sim 0^\circ$ ,Y方向视场为 $8^\circ$ 和 $10^\circ$ 。将系统设置为ZOOM多重结构,ZOOM1对应 $8^\circ$ 、 $0\sim 5.71^\circ$ ,ZOOM2对应 $10^\circ$ 、 $-5.71\sim 0^\circ$ ,在ZOOM2的像面前加入一片反射镜,达到视场分离的目的。

应用光学设计软件对前置望远系统进行了优化设计,光学系统结构如图1所示,视场分离结构如图2所示,光学系统参数如表1所示。

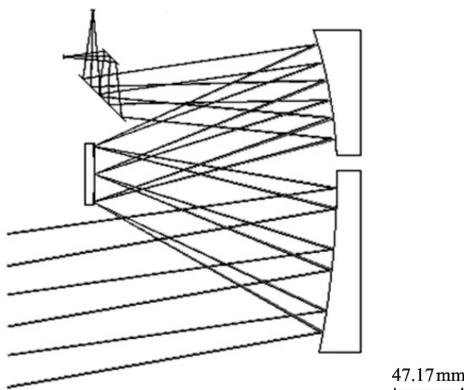


图1 前置望远光学系统结构图  
Fig.1 Structure of lead telescopic optical system

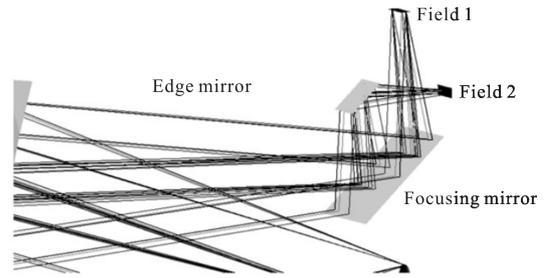


图2 视场分离结构图  
Fig.2 Structure of field separation

表1 光学系统结构参数

Tab.1 Parameters of optical system

	Surface type	R/mm	Distance/mm
Primary	Hyperboloid	-796.62	-216.34
Second	Dllipsoid	-277.62	216.34
Third	Ellipsoid	-416.76	-281.70

图3为前置望远系统的光学传递函数,光学系统的场曲和畸变曲线如图4所示。各视场传递函数

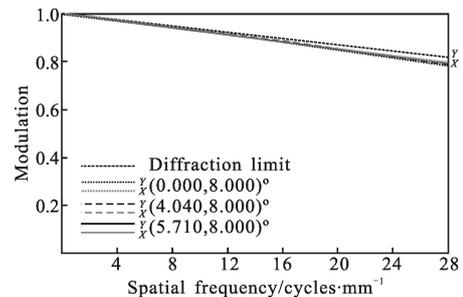


图3 前置望远系统传递函数曲线

Fig.3 MTF of lead telescopic optical system

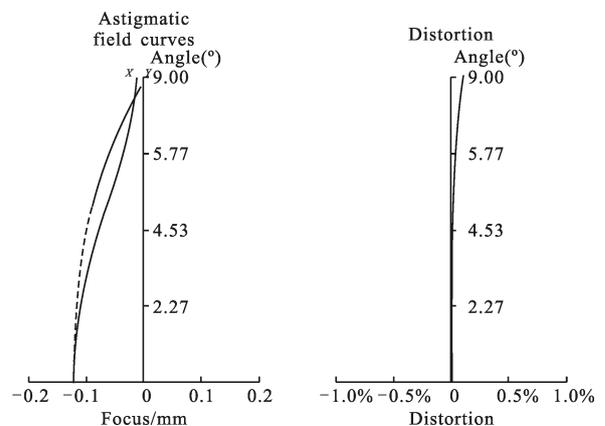


图4 光学系统的场曲和畸变曲线

Fig.4 Field curvature and distortion of optical system

大于 0.75 (Nyquist 频率), 远高于  $MTF \geq 0.5$  的设计指标要求; 点列图均方根值(RMS)小于  $7 \mu\text{m}$ ; 成像点 80% 的能量集中在  $\Phi 14.5 \mu\text{m}$  范围内, 最大畸变小于 0.09%。说明了光学系统成像质量良好, 满足设计指标要求<sup>[9]</sup>。

### 3 光谱成像系统光学设计

目前, 比较成熟的光谱成像系统方案有棱镜分光 and 光栅分光。光栅分光与棱镜分光相比, 色散更均匀、光谱分辨率更高。光栅可分为平面光栅、凹面光栅和凸面光栅。Offner 光谱仪由两块球面反射镜作为主镜和三镜, 凸面光栅作为次镜。Offner 光谱仪的孔径光阑在次镜上, 系统接近光阑对称结构, 彗差和畸变得到较好校正, 适当调整主镜和三镜的面型与曲率半径可以获得良好的成像质量。相对于传统的平面光栅光谱仪, Offner 光谱仪有体积小、质量轻、色畸变小等优点。

为了匹配狭缝尺寸与探测器尺寸, 光谱成像系统的放大倍率设计为 1, 物方数值孔径为 0.124, 光学结构如图 5 所示。

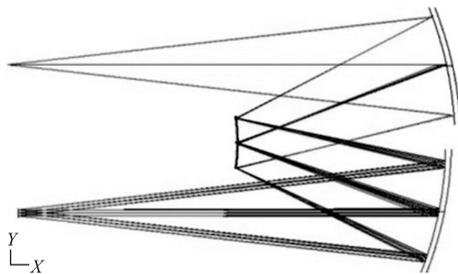


图 5 光谱成像系统结构

Fig.5 Structure of spectral imaging system

应用光学设计软件对 Offner 光谱成像系统进行了优化设计, 图 6 为光谱成像系统的 MTF 曲线, 图 7

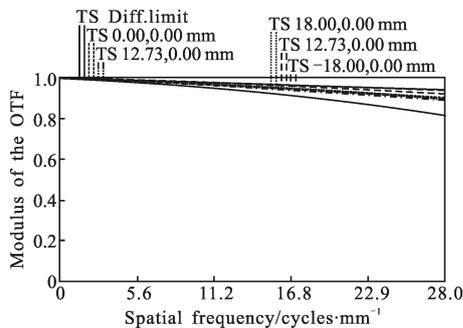


图 6 光谱成像系统不同谱段的 MTF

Fig.6 Every spectrum MTF of spectral imaging system

为光谱成像系统的场曲与畸变曲线。MTF 在 Nyquist 频率处均大于 0.7; 点列图 RMS 值半径小于  $4 \mu\text{m}$ ; 成像点 80% 的能量集中在  $\Phi 13 \mu\text{m}$  范围内, 均小于相应探测器的像元尺寸; 最大畸变小于 0.021%, 成像质量均满足设计指标要求<sup>[10]</sup>。

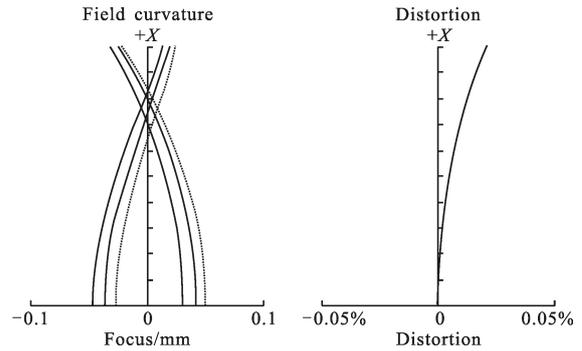


图 7 光谱成像系统场曲和畸变曲线

Fig.7 Field curvature and distortion of spectral imaging system

### 4 望远系统与光谱成像系统的组合

利用光学设计软件将分视场前置望远系统与光谱成像系统组合, 并将光谱成像系统反射镜的曲率半径和间隔作为优化参数共同参与优化, 光学系统结构如图 8 所示。

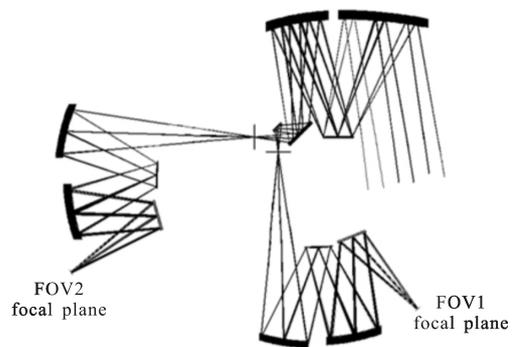


图 8 组合光学系统结构

Fig.8 Structure of combination optical system

组合优化后的光谱成像系统参数如表 2 所示, 组合光学系统不同谱段的 MTF 曲线如图 9 所示。各波段的传函均达到 0.7 以上(Nyquist 频率), 设计结果满足  $MTF \geq 0.5$ (Nyquist 频率)的设计指标要求; 光学系统成像弥散圆 80% 的能量集中在  $\Phi 15 \mu\text{m}$  范围内, 均小于探测器的像元尺寸。可以看出, 高光谱相机全系统成像质量优良, 满足设计指标要求。

表 2 优化后光谱成像系统结构参数  
Tab.2 Parameters of spectral imaging system  
after optimizing

FOV1			
	Surface type	R/mm	Distance/mm
Primary	Sphere	-339.03	-171.19
Second	Sphere	-172.28	179.60
Third	Sphere	Sphere	-274.79
FOV2			
	Surface type	R/mm	Distance/mm
Primary	Sphere	-344.11	-174.92
Second	Sphere	-174.99	175.03
Third	Sphere	-341.69	-275.46

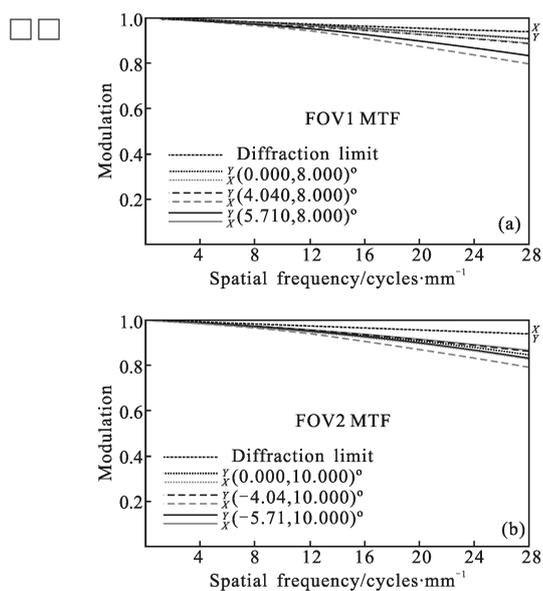


图 9 高光谱成像仪全系统不同谱段的 MTF

Fig.9 Every spectrum MTF of hyperspectral imaging spectrometer

## 5 结论

讨论了空间遥感高光谱成像光学系统的光学设计,前置望远系统为了增大幅宽、提高成像质量采用视场分离方式设计;光谱成像系统采用次镜为凸面光栅的 Offner 光栅光谱仪,结构紧凑、光谱分

辨率高、色畸变小。组合光学系统全视场全谱段 MTF 在 Nyquist 频率下高于 0.7,成像弥散圆 80% 的能量集中在  $\Phi 15 \mu\text{m}$  范围内,小于探测器  $18 \mu\text{m}$  的像元尺寸,均高于系统技术指标要求,具有幅宽大、体积小、成像质量好、光谱分辨率高、光谱通道数多等优点,可以广泛应用于空间环境的多光谱成像遥感领域。

## 参考文献:

- [1] Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang. Design of hybrid refractive/diffractive off-axial optical system for multispectral infrared imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 379-383. (in Chinese)
- [2] Xu Hong, Wang Xiangjun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 13-17. (in Chinese)
- [3] Yuan Liyin, Lin Ying, He Zhiping, et al. Design and realization of a long-wave infrared hyperspectral imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 181-185. (in Chinese)
- [4] Han Pengpeng. Research of concentric optical systems of imaging spectrometers [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2): 157-161. (in Chinese)
- [5] Ji Yiqun, Gong Guangbiao, Zhu Shanbing, et al. Minimal integrated hyperspectral imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 727-731. (in Chinese)
- [6] Wang Jiaqi. Total design of Optical Instrument [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 1998: 3-5. (in Chinese)
- [7] Zhang Y M. Applied Optics [M]. Beijing: Machine and Industry Publishing Company, 1987: 375-378. (in Chinese)
- [8] Malacara D. Optical Shop Testing [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1978.
- [9] Ji Yiqun, Shen Weimin. Design and manufacture of Offner convex grating hyperspectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 285-287. (in Chinese)
- [10] Tong Yajun, Wu Gang, Zhou Quan, et al. Design method of Offner-type imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1148-1152. (in Chinese)