

机载轻小型高分辨率成像光谱仪光学系统设计

王保华 阮宁娟 郭崇岭 王媛媛 王 铮 钟晓明

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 为了满足轻小型机载遥感平台对成像光谱仪高分辨率和小型化的要求,采用平场 Schwarzschild 望远系统和基于凸面光栅的 Offner 光谱成像系统匹配的结构形式,设计了一个工作波段为 0.4~2.5 μm 、相对孔径 $D/f'=1/3$ 、全视场 $2\omega=7.2^\circ$ 的机载高分辨率成像光谱仪光学系统。分析了 Schwarzschild 望远系统和 Offner 光谱成像系统的特点和像差校正方法,利用 ZEMAX 光学设计软件进行了光线追迹和优化设计,给出了系统的调制传递函数曲线(MTF)和点列图,并进行了分析和评价。设计和分析结果表明,机载高分辨率成像光谱仪可以实现 0.6 m 的空间分辨率和全谱段 5 nm 的光谱分辨率,满足机载宽刈幅遥感成像的应用要求,光学系统结构简单紧凑,具有接近衍射极限的优良像质,易于加工和装调实现,具有较高的实际应用价值。

关键词 成像系统; 成像光谱仪; 光学设计; 凸面光栅; Offner 光谱成像系统

中图分类号 TN215 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1022001

Optical System Design of Airborne Light and Compact High Resolution Imaging Spectrometer

Wang Baohua Ruan Ningjuan Guo Chongling Wang Yuanyuan

Wang Zheng Zhong Xiaoming

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract In order to meet the requirements of small airborne remote sensing platform for imaging spectrometer with high resolution and miniaturization, an airborne light and compact high resolution imaging spectrometer system is designed using the imaging spectrometer structure form combined flat-field Schwarzschild telescope system with Offner spectral imaging system. The working wavelength is from 0.4 to 2.5 μm , the relative aperture is 1/3, and the field of view is 7.2° . The characteristics and aberration correction principles of Schwarzschild telescope system and Offner spectral imaging system are analyzed. Then the ZEMAX software is used for ray tracing and optimization. The modulation transfer function (MTF) curve and spot diagram are given and evaluated. The design and analysis results show that the airborne light and compact high resolution imaging spectrometer optical system can meet spectral resolution of 5 nm and spatial resolution of 0.6 m. Optical system has simple and compact structure and excellent image quality that approaching to the diffraction limit. It can realize the high resolution and miniaturization of system and meet the application requirement of airborne remote sensing.

Key words imaging systems; optical design; imaging spectrometer; convex grating; Offner spectral imaging system

OCIS codes 220.4830; 220.2740; 220.3620; 050.1950; 120.6200

1 引 言

成像光谱仪是一种将成像技术与光谱技术相结合的新型光学遥感仪器,可以同时采集地面物体的空间信息和光谱信息,形成探测目标谱像合一的立方体数据,在大气、陆地和海洋观测以及农林、水土、矿产资源调查等领域具有巨大的应用价值和广阔的发展前景^[1-2],在遥感领域得到了广泛应用。

收稿日期: 2014-10-8; 收到修改稿日期: 2014-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(11204014)、总装备部预研基金(9140A21010112HT05248)

作者简介: 王保华(1988—),男,硕士,工程师,主要从事光学遥感、光学系统设计等方面的研究。

E-mail: wangbaohua-125@163.com

成像光谱仪根据扫描成像方式可分为光机扫描式和推帚式两种^[3]。推帚式成像光谱仪探测器采用面阵电荷耦合器件(CCD),由飞行平台沿轨方向的推扫实现空间维和光谱维成像,大大增加了像元凝视时间,可以同时获得高空间分辨率和高光谱分辨率图像,具有体积小、结构简单、信噪比高等优点,尤其适用于空间较小的飞机或无人机等遥感平台。国外典型的推帚式成像光谱仪有美国研制的Hyperion^[4]和COIS^[5],空间分辨率为30 m,光谱分辨率为10 nm;欧空局研制的APEX,空间分辨率为7.5 m,光谱分辨率为10 nm;国内中科院上海技物所研制的PHI机载成像光谱仪光谱覆盖范围0.4~0.85 μm,光谱分辨率为5 nm,空间分辨率为1.8 m^[6]。目前,国内外成像光谱仪均可实现高光谱成像,但缺点是空间分辨率较低,不能很好地满足高空间分辨率和高光谱分辨率同时成像的要求。近年来,随着遥感技术的不断发展,对成像光谱仪的空间分辨率和光谱分辨率提出了更高要求,因此迫切需要解决现有的成像光谱仪分辨率较低的问题。

本文根据遥感载荷的应用需求和技术指标,提出了采用平场Schwarzschild望远系统和基于凸面光栅的Offner光谱成像系统匹配的成像光谱仪结构形式,设计了该形式的机载轻小型高分辨率成像光谱仪光学系统,谱段范围覆盖0.4~2.5 μm,光谱分辨率为5 nm,空间分辨率为0.6 m,可实现高光谱分辨率和高空间分辨率同时宽幅成像,具有体积小、无遮拦、结构简单紧凑等优点,可用于土地资源调查与监测、农业林业资源调查与监测、地质矿产、油气资源调查、防灾减灾等领域。

2 光学系统技术指标

机载高分辨率成像光谱仪采用推帚工作方式,根据高分辨率成像光谱仪对陆地、海洋以及地质勘探等的探测要求,工作波段为0.4~2.5 μm的整个太阳反射光谱区,光谱分辨率为5 nm,机载平台平均飞行高度 $H=8$ km,地面覆盖宽度(GW)为1 km,地面像元分辨率(GSD)为0.6 m。

为了在宽谱段范围内实现5 nm的高光谱分辨率,同时减轻凸面光栅的制造难度,利用两个Offner光谱成像系统在可见近红外谱段和短波红外谱段分别成像,两个光谱成像系统共用一个平场Schwarzschild望远系统。可见光和近红外(VNIR)谱段探测器选用CCD器件,像元尺寸为18 μm×18 μm,短波红外(SWIR)谱段探测器选用HgCdTe红外焦平面器件,像元尺寸18 μm×18 μm。根据探测器像元尺寸、地面像元分辨率和轨道高度 H 确定成像光谱仪光学系统的焦距为:

$$f' = \frac{a \cdot H}{D_{cs}} = \frac{18\mu\text{m} \times 8\text{km}}{0.6\text{m}} = 240\text{mm}, \quad (1)$$

根据轨道高度和地面覆盖宽度确定成像光谱仪光学系统的视场为

$$2\omega = 2 \arctan\left(\frac{G_w/2}{H}\right) = 2 \arctan\left(\frac{1/2\text{km}}{8\text{km}}\right) = 7.2^\circ. \quad (2)$$

根据成像光谱仪光学系统的视场和焦距以及探测器尺寸确定狭缝像尺寸为25.2 mm×18 μm。为了使狭缝像与探测器尺寸匹配,光谱成像系统的放大率设计成1:1,由光学系统工作波段、光谱分辨率以及探测器像元尺寸确定VNIR谱段探测器像元规模为1400×120,SWIR谱段探测器像元规模为1400×300。

综合考虑系统信噪比和体积的要求,最后确定光学系统相对口径 $D/f'=1/3$ 。成像光谱仪光学系统主要的技术指标如表1所示。

表1 高分辨率成像光谱仪光学系统设计指标

Table 1 Specifications of high resolution spectrometer optical system

Performance parameter	Values
Spectral band /μm	0.4~1.0(VNIR) 1.0~2.5(SWIR)
Field of view /($^\circ$)	7.2
Focal length of telescope /mm	240
F number	3
Detector array size /pixel	1400×120(VNIR) 1400×300(SWIR)
Detector pixel size /μm	18×18

3 望远系统设计

机载推帚式成像光谱仪获取的地面目标复原光谱如果存在畸变会造成目标成分识别误差,因此为了获得高质量的光谱数据需要严格控制系统的畸变。成像光谱仪的畸变通常用谱线弯曲(smile)和谱带弯曲(keystone)来表示,望远系统像面如果存在较大的场曲和畸变,必然会导致全系统存在严重的谱线弯曲和谱带弯曲,因此设计平像场和无畸变的望远系统具有重要意义。

下面讨论的高分辨率成像光谱仪工作谱段覆盖可见近红外和短波红外谱段,对于折射式望远系统,可选择的光学材料种类较少,需要采用特殊材料或复杂结构消除色差和二级光谱;反射式系统由于不存在色差,零件数目相对较少,有利于实现大口径和轻量化设计,而且对材料要求较低,对温度、湿度等环境因素变化的适应性强,因此,前置望远系统选择全反射式光学结构形成。目前,成像光谱仪使用最多的全反射式望远系统是离轴三反消像散(TMA)结构^[7-8],该结构形式可以在较大的视场内获得较好的像质,但系统结构复杂、体积庞大,不适合用于体积较小的遥感平台。Schwarzschild望远系统是一种两反射镜结构,主镜和次镜顶点曲率半径相同,经离轴设计后可以获得较大的视场和相对口径,具有无遮拦、结构简单、像差校正能力强的特点,适合用作成像质量要求高、体积小的机载成像光谱仪望远系统。

3.1 同轴 Schwarzschild 结构理论分析

传统的同轴 Schwarzschild 结构如图 1 所示,其结构参数主要包括:主镜、次镜的曲率半径 R_1 和 R_2 , 主次镜间距 d , 主镜和次镜的偏心率 e_1 和 e_2 , 次镜对主镜的遮拦比 α , 次镜放大倍率 β 。它们之间的关系满足:

$$\alpha = \frac{l_2}{f'_1} = \frac{2l_2}{R_1} \approx \frac{h_2}{h_1}, \quad (3)$$

$$\beta = l'_2/l_2, \quad (4)$$

利用高斯公式可以导出

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{1+\beta} R_1. \quad (5)$$

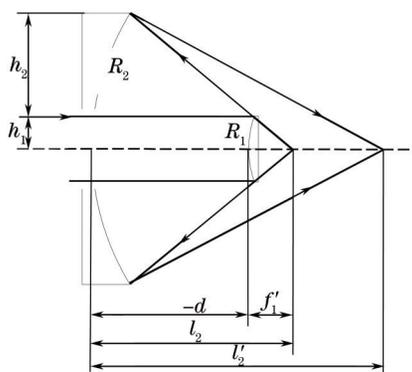


图 1 同轴 Schwarzschild 望远结构

Fig.1 Layout of coaxial Schwarzschild telescope

对于两反射式系统,五种单色像差系数可以表示成 α 、 β 和镜面偏心率平方的形式:

$$S_I = \left[\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4} - \frac{\beta(\beta+1)^3}{4} \right] - \frac{\beta^3}{4}(1-e_1^2), \quad (6)$$

$$S_{II} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \left[\frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta} e_2^2 - \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta} \right] - \frac{1}{2}, \quad (7)$$

$$S_{III} = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^2 \left[\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta^2} - \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta^2} e_2^2 - \frac{(1-\alpha)(\beta+1)(\beta-1)}{\alpha\beta} - \frac{\alpha\beta-\beta-1}{\alpha} \right], \quad (8)$$

$$S_{IV} = \beta - \frac{1+\beta}{\alpha}, \quad (9)$$

$$S_v = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^3 \left[\frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta^3} e_2^2 - \frac{\alpha(1-\beta)^2(\beta+1)}{4\beta^3} \right] - \frac{3}{2} \frac{(1-\alpha)^2(1-\beta)(1+\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{2(1-\alpha)(1+\beta)}{\alpha^2\beta^2}. \quad (10)$$

由以上公式可以看到,在五种像差系数表达式中 e_1^2 、 e_2^2 、 α 、 β 为变量,可用于校正系统像差。由于 Schwarzschild 系统的主镜和次镜顶点曲率半径相等,根据(5)式可得 $\beta = (1+\beta)/\alpha$,代入(9)式得 $S_{IV} = 0$,因此 Schwarzschild 系统可以实现平像场成像。为了校正系统的畸变,令(9)式 $S_v = 0$ 得:

$$e_2^2 = \frac{8\beta^3 - 2\beta^2 - 3\beta + 1}{\beta + 1}. \quad (11)$$

因此,通过合理选择 α 和 β 值可以得到同时消场曲和畸变的同轴 Schwarzschild 系统。但由于系统优化变量少,同轴 Schwarzschild 系统最多只能同时消除四种单色像差,且最大视场不能超过 0.3° ,为了实现机载高分辨率成像光谱仪技术指标要求, Schwarzschild 望远系统需进行离轴设计。

3.2 离轴 Schwarzschild 望远系统设计

在同轴 Schwarzschild 结构的基础上,通过适当的视场离轴和光阑离轴可以实现系统无遮拦,选择反射镜半径、镜间距以及二次非球面系数作为优化变量,实现系统完善成像。通过在望远系统像面前加入分色片,实现不同谱段像面分离,优化设计后的光学系统结构如图 2 所示。图 3 给出了望远系统 MTF 曲线,全谱段各视场在奈奎斯特频率处的 MTF 均大于 0.78,通过接近衍射极限,满足高质量成像要求。

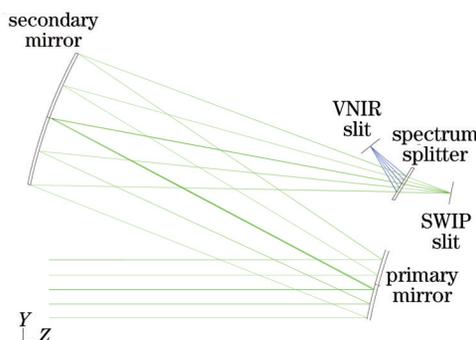
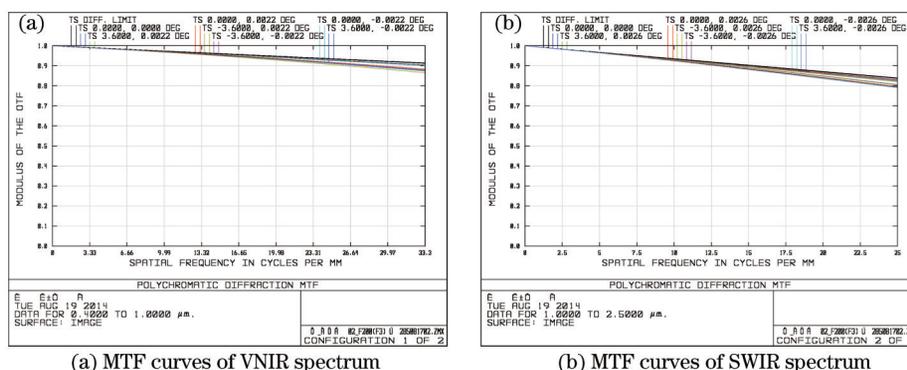


图 2 Schwarzschild 望远系统光学结构图

Fig.2 Layout of Schwarzschild telescope system



(a) MTF curves of VNIR spectrum

(b) MTF curves of SWIR spectrum

图 3 Schwarzschild 望远系统不同谱段 MTF 曲线

Fig.3 MTF curves of Schwarzschild telescope system

4 光谱成像系统设计

传统光栅色散成像光谱仪的色散元件工作在准直光路中,光学系统结构复杂,难于降低体积和质量,如果在中继成像系统的发散或会聚光路中使用曲面光栅则可以实现光谱成像系统小型化、轻量化的目的。20 世纪 90 年代后期美国的 Chrisp 等提出了基于凸面光栅的 Offner 光谱成像系统^[9-10],该系统具有结构简单紧凑、体积小、质量轻、成像质量好的优点,非常适合用于高光谱分辨率和小型化的成像光谱仪。考虑到机载遥感平台对载荷体积和质量的要求,本文成像系统采用 Offner 结构形式。

4.1 Offner 光谱成像系统理论分析

Offner 光谱成像系统是单位放大率的同心光学系统,其基本结构如图 4 所示,整个系统由反射镜 M 和凸面反射光栅 G 组成,反射镜 M 和光栅 G 的曲率半径重合于轴上点 C 。狭缝像发出的光线经反射镜 M 的上部反射到凸面光栅 G ,经凸面光栅分光后反射到反射镜 M 的下部,最后不同波长的光线依次成像在面阵探测器的不同位置。系统孔径光阑位于凸面光栅 G 上时,系统视场是一个半径为 H 的细环形视场,入射和出射主光线互相平行且垂直于物像平面,在满足 $R_1=2R_2$ 时,所有三级像差自动校正,系统谱线弯曲很小,色畸变可以忽略不计,因此,Offner 光谱成像系统具有良好的成像能力。其环形视场 H 的大小为:

$$H = \frac{R_1 \sqrt{4R_2^2 - R_1^2}}{2R_2} \quad (12)$$

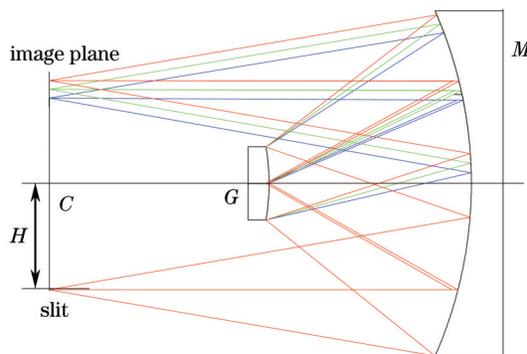


图 4 Offner 光谱成像系统结构

Fig.4 Layout of Offner spectral imaging system

4.2 Offner 光谱成像系统设计

凸面光栅是 Offner 光谱成像系统的核心元件,直接决定成像光谱仪的光谱特性,针对目前国内外凸面光栅的加工制造水平,选择的凸面光栅参数如表 2 所示,该凸面光栅容易利用全息方法加工制造。Offner 光谱成像系统的设计指标如表 3 所示,入射狭缝尺寸为 $25.2 \text{ mm} \times 18 \text{ } \mu\text{m}$,物方数值孔径为 0.167。为了使狭缝像与探测器匹配,光谱成像系统的放大率为 1:1。

表 2 凸面光栅参数

Table 2 Parameters of convex grating

Performance parameter	VNIR	SWIR
Spectral band / μm	0.4~1.0	1.0~2.5
Blaze wavelength / μm	0.7	1.75
Diffraction order	+1	+1
Groove density /(lp/mm)	50	50
Radius /mm	72	72

表 3 Offner 光谱成像系统设计指标

Table 3 Specifications of Offner spectral imaging system

Performance parameter	Values
Spectral band / μm	0.4~1.0(VNIR) 1.0~2.5(SWIR)
Slit size	$25.2 \text{ mm} \times 18 \text{ } \mu\text{m}$ (SWIR)
Imaging magnification	1:1
Object space NA	0.167

根据光谱成像系统设计指标,利用光学设计软件分别对 VNIR 和 SWIR 谱段进行优化设计,为了满足光谱成像系统入瞳与望远系统出瞳的匹配,将 Offner 系统的一个反射镜分裂成两个,并通过适当的离轴保证系统在各波长完善成像,系统结构如图 5 所示。图 6 和图 7 分别给出了不同谱段的 MTF 曲线,各谱段在奈奎斯

特空间频率处均大于 0.75, 成像质量良好。

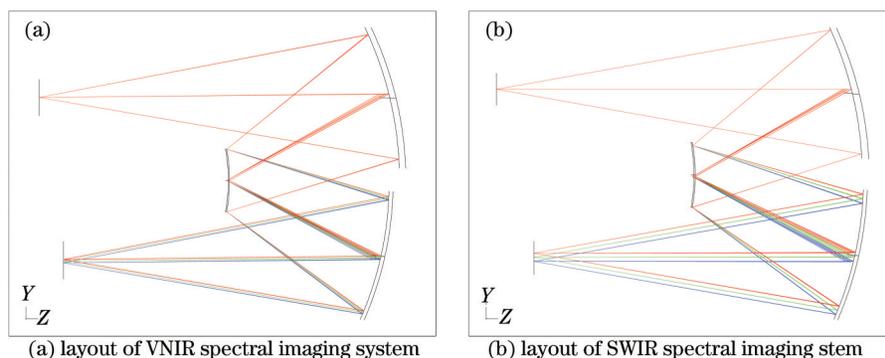


图 5 Offner 结构光谱成像系统结构

Fig.5 Layout of Offner spectral imaging system

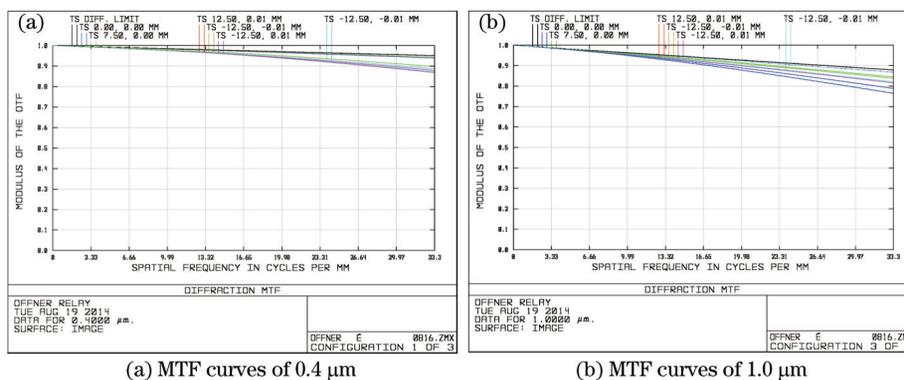


图 6 VNIR 谱段不同波长调制传递函数曲线

Fig.6 MTF curves of VNIR spectral imaging system

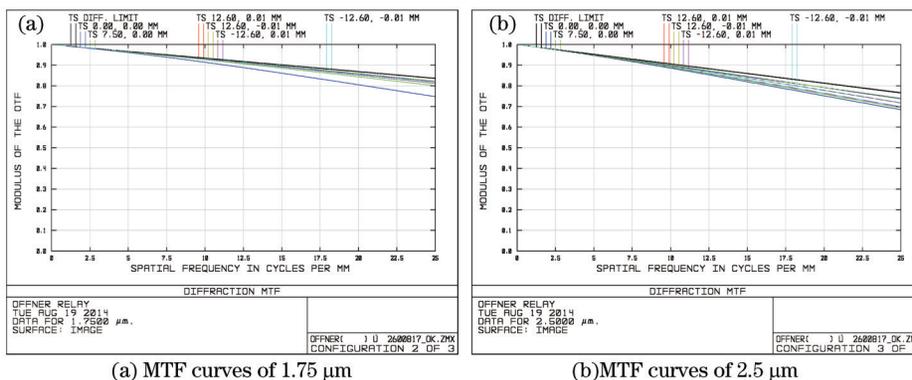


图 7 SWIR 谱段不同波长调制传递函数曲线

Fig.7 MTF curves of SWIR spectral imaging system

5 成像光谱仪全系统设计

将 Schwarzschild 望远系统与 Offner 光谱成像系统组合, 通过适当调整光谱成像系统反射镜曲率半径和间隔, 得到机载高分辨率成像光谱仪全系统的光学结构如图 8 所示, 全系统体积仅 140 mm×350 mm×550 mm, 结构简单紧凑, 特别适合机载尤其是无人机遥感应用。

图 9 给出了不同波长下系统的 MTF 曲线, 由图 9 可以看出光学系统在全谱段全视场奈奎斯特频率处的 MTF 值均大于 0.8, 接近系统衍射极限, 高于设计指标要求。图 10 给出了系统中心波长前后 5 nm 的点列图, 由图 10 可以看出, 系统在 0.4~2.5 μm 谱段内光谱分辨率均可以达到 5 nm, 在各个中心波长处各视场的点斑均小于探测器像元尺寸, 满足高分辨率机载遥感的应用要求。

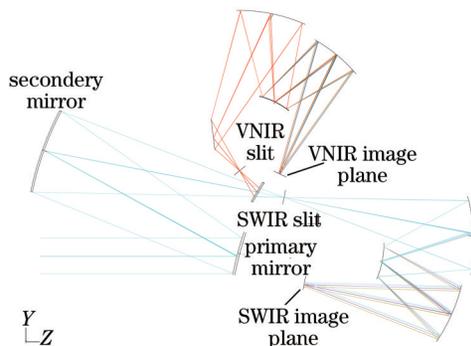
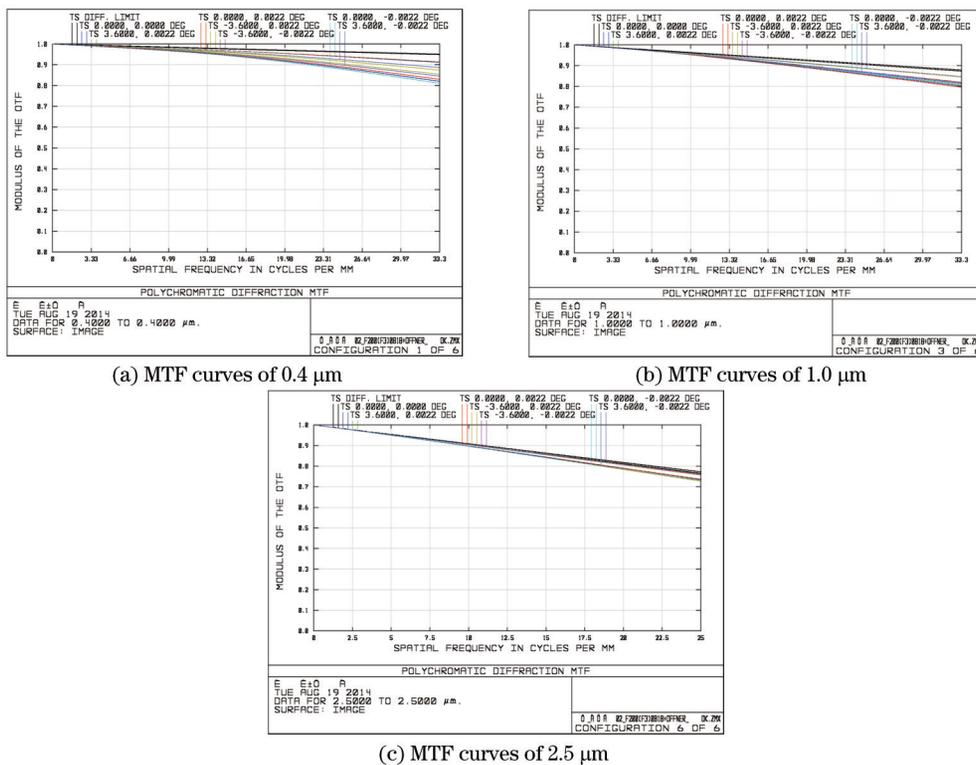


图8 高分辨率成像光谱仪全系统光学结构

Fig.8 Layout of high resolution spectrometer optical system



(a) MTF curves of 0.4 μm

(b) MTF curves of 1.0 μm

(c) MTF curves of 2.5 μm

图9 全系统不同波长 MTF 曲线

Fig.9 MTF curves of high resolution spectrometer optical system

6 结 论

为实现机载成像光谱仪高空间分辨率和高光谱分辨率成像,满足小型飞机尤其是无人机等机载遥感平台对成像光谱仪体积和重量的要求,针对现有成像光谱仪存在的问题提出了采用平场 Schwarzschild 望远系统和基于凸面光栅的 Offner 光谱成像系统匹配的成像光谱仪结构形式,并设计了该形式的机载高分辨率成像光谱仪光学系统,谱段范围覆盖 0.4~2.5 μm ,光谱分辨率为 5 nm,空间分辨率为 0.6 m。系统结构简单紧凑,体积小、质量轻,具有接近衍射极限的优良像质,实现了遥感仪器的高空间分辨率、高光谱分辨率和小型化目的,满足机载遥感的应用要求,对轻小型成像光谱仪的研究具有一定的参考价值。

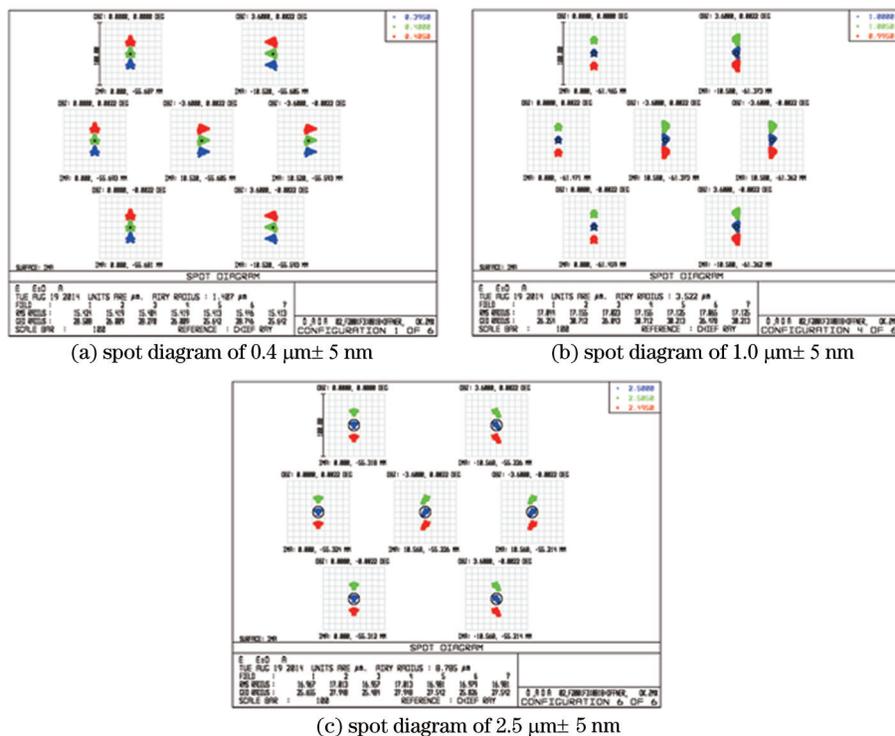


图 10 全系统不同中心波长处谱宽 $\pm 5 \text{nm}$ 点列图

Fig.10 Spot diagram of $\pm 5 \text{nm}$ high resolution spectrometer optical system

参 考 文 献

- 1 Xue Qingsheng. Optical system design of wide field of view and large-aperture hyperspectral imager[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0222003.
薛庆生. 宽视场大相对孔径高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0222003.
- 2 Chen Yang, Wang Yueming. Design and distortion characteristics analysis of the large-image-field off-axis three-mirror telescope [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0222003.
陈 杨, 王跃明. 大像场离轴三反望远镜畸变特性分析与设计[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0222003.
- 3 Yang Zengpeng, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.*. Optimization design method for optical system of prism-grating ultraspectral imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911003.
杨增鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 棱镜-光栅组合色散型超光谱成像系统的优化设计[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0911003.
- 4 Folk M, Pearlman J, Liao L B, *et al.*. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, haracterization and calibration[C]. SPIE, 2001, 4151: 40-51.
- 5 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316003.
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316003.
- 6 Wang Jianyu, Shu Rong, Liu Yinnian. Imaging Spectral Technology Introduction[M]. Beijing: Science Press, 2011: 25-27.
王建宇, 舒 嵘, 刘银年. 成像光谱技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 25-27.
- 7 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.
刘晓梅, 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.
- 8 Wang Yueming, Lang Junwei, Wang Jianyu. Status and prospect of spac; e-borne hyperspectral imaging spectrometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50: 01008.
王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状与展望[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50: 01008.
- 9 Kwo D, Lawrence G, Chrisp M. Design of a grating spectrometer from a 1:1 Offner mirror system[C]. SPIE, 1987, 818: 275-279.
- 10 Mouroulis P, Daniel W W, Plaud D M, *et al.*. Convex grating types for concentric imaging spectrometer[J]. Appl Opt, 1988, 37(31): 7200-7208.

栏目编辑: 韩 峰