

折/反混合式长波红外成像光谱仪光学系统设计

张晓龙^{1,2} 刘 英^{1*} 孙 强¹ 刘建卓¹ 王保华^{1,2}

(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 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了实现遥感目标的长波红外高光谱成像,满足目标探测对多信息量的需求,设计了高光谱分辨率长波红外(8~12 μm)成像光谱仪。前置望远系统采用离轴三反系统,以实现无遮拦、大口径及宽视场成像设计;光谱分光系统分别采用折射式和反射式结构进行优化设计。设计结果显示,采用折射式结构,可得到通光孔径为 100 mm, F 数为 2,光谱分辨率 16 nm,空间分辨率 150 μrad ,冷光阑效率 100%,成像质量接近衍射极限的光学系统;采用反射式结构,为了保证光学系统无挡光,需采用多片离轴反射镜,增加了系统的非对称性,使得系统的像散、彗差和场曲难以校正到最佳状态。设计结果表明:折/反混合式成像光谱系统具有光谱分辨率高、成像质量好和结构合理等优点,点斑均方根直径与国内现有探测器像素尺寸匹配。

关键词 光谱学;成像光谱仪;长波红外;离轴三反系统;冷光阑;折/反混合式

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1122005

Design of Hybrid Refractive and Reflective Optical System of Long-Wave Infrared Region Imaging Spectrometer

Zhang Xiaolong^{1,2} Liu Ying¹ Sun Qiang¹ Liu Jianzhuo¹ Wang Baohua^{1,2}

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

Abstract In order to achieve the long-wave infrared hyperspectral imaging for remote sensing target and to meet the needs of target detection for large amount of information, a long-wave infrared (8~12 μm) imaging spectrometer with high spectral resolution is designed. Off-axis three-mirror system is used in fore telescope system to implement a design of no obscuration, large diameter and wide-viewing-field imaging. The refraction and reflection structure is respectively used in optimizing the spectrophotometric system. The result shows that the optical system with an aperture of 100 mm, F number of 2, spectral resolution of 16 nm, spatial resolution of 150 μrad , cold aperture efficiency of 100% and image quality closing to the diffraction limit can be designed using refractive structure. However, when reflective structure is adopted, multi-chip off-axis mirrors are used to ensure that the optical system has no obscuration, which results in an increase of the asymmetry of the system and makes it difficult to correct the astigmatism, coma and field curvature to the best condition. The design result shows that hybrid refractive and reflective imaging spectrometer has the advantages of high spectral resolution, good image quality, reasonable structure and the match between the root-mean-square (RMS) diameter of point spot and the pixel size of the existing domestic detectors.

Key words spectroscopy; imaging spectrometer; long-wave infrared; off-axis three-mirror system; cold aperture; hybrid refractive and reflective

OCIS codes 040.6808; 300.6270; 300.6320

收稿日期: 2012-05-21; 收到修改稿日期: 2012-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(60977001)、吉林省与中国科学院合作长吉图开发开放先导区科技创新合作专项(2011CJT0004)和吉林省科技厅项目(20106015,20100310)资助课题。

作者简介: 张晓龙(1986—),男,博士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: long1986lucky@163.com

导师简介: 孙 强(1971—),男,博士,研究员,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn

* 通信联系人。E-mail: liuy613@163.com

1 引 言

成像光谱仪从 20 世纪 80 年代开始在多光谱遥感成像技术的基础上发展起来,以高光谱分辨率获取景物或目标的高光谱图像^[1],能同时获得目标的图像和光谱信息^[2]。长波红外波段(8~14 μm)是多种化学物质的特征吸收光谱所在区域,因此具有探测化学物质的能力。当前,长波红外成像光谱仪,在陆地海洋地理遥感,大气、土壤和水体的污染物遥感监测,军事目标侦查探测、监视等民用和军事领域,正在发挥越来越重要的作用。

由于高性能的长波红外焦平面阵列传感器的研制难度大,以及长波红外成像系统设计的特殊性,该波段成像光谱仪的研制门槛远高于可见光/近红外波段的成像光谱仪。目前,长波红外成像光谱仪的研制技术只有少数几个先进国家掌握,典型代表有:美国“联合多光谱计划”研制的机载 SEBASS 系统;美国 OKSI 公司研制的用于化学物质泄漏检测的 TIRIS 机载成像光谱仪;美国夏威夷大学为超光谱地雷探测项目(HMD)研制的 AHI 机载成像光谱仪。其中 SEBASS、TIRIS 探测器像素数目较少,光谱和空间分辨率低;而我国长波红外成像光谱仪的研制主要是几种星载多光谱成像光谱仪^[2],与可见/近红外及中波红外波段一起工作,长波红外波段光谱分辨率很低。

本文设计的长波红外成像光谱仪系统采用平面光栅分光,推扫工作方式,视场为 2.75°,通光孔径 100 mm, F 数为 2,光谱分辨率可达到 16 nm,空间分辨率达 150 μrad,其指标达到了国际先进水平,为我国长波红外成像光谱仪的发展起到了一定的推动作用。

2 系统主要技术指标

成像光谱系统分为前置望远系统和光谱分光系统。前置望远系统将远处地物目标成像在狭缝上,再经过光谱分光系统准直、分光及成像,在探测器面阵列上得到目标的光谱图像。该长波红外成像光谱仪采用的长波红外制冷 HgCdTe 探测器主要性能指标为:像素素数:320 pixel×256 pixel,像素尺寸 d :30 μm×30 μm, 响应波段:8~12 μm,系统 F 数:2。

为了保证系统的光瞳衔接,前置望远系统 F 数与探测器 F 数相等,综合考虑系统孔径和探测器性能,选择望远系统焦距 $f'=200$ mm,根据瞬时视场角(IFOV)公式

$$2 \tan \frac{\theta_{\text{IFOV}}}{2} = \frac{d}{f'}, \quad (1)$$

得到仪器瞬时视场角为 0.15 mrad。

系统总视场为

$$\theta_{\text{FOV}} = \theta_{\text{IFOV}} \times 320 = 2.75^\circ. \quad (2)$$

为了使狭缝像与探测器匹配,光谱成像系统的放大率取为 1:1,对应的狭缝大小即望远系统的像面尺寸为 9.6 mm×30 μm。表 1 给出了成像光谱仪的主要设计指标。

表 1 光学设计指标

Table 1 Optical design parameters

Performance parameter	Values
Spectral band /μm	8~12
Focal length /mm	200
F -number	2
Field of view /(^{\circ})	2.75
Instantaneous field of view /mrad	0.15
Slit size	9.6 mm×30 μm
Spectral channel number	256

3 离轴三反射系统的设计

3.1 同轴三反初始结构的计算

离轴三反系统是在同轴三反系统的基础上进行离轴、优化得到的。同轴三反光学系统结构如图 1 所示,其结构参数包括:主镜、次镜、三镜的曲率半径 R_1 、 R_2 、 R_3 ;镜间间距 d_1 、 d_2 、 d_3 ;各反射面的二次非球面系数 $k_1 = -e_1^2$, $k_2 = -e_2^2$, $k_3 = -e_3^2$ (这里 e_1 , e_2 , e_3 分别为各反射面的偏心率);次镜对主镜的遮拦比 α_1 ,三镜对次镜的遮拦比 α_2 ;次镜的放大率 β_1 ,三镜的放大率 β_2 。它们之间满足关系式(根据第一近轴光线计算)

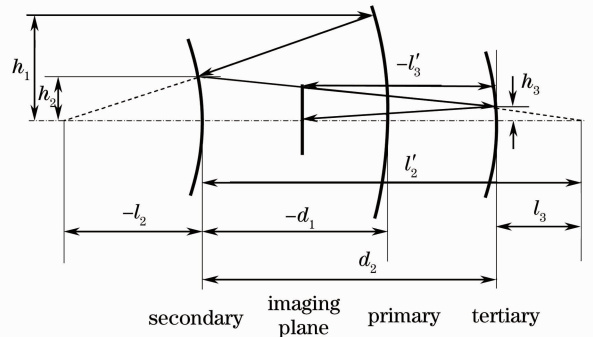


图 1 共轴三反系统第一近轴光线追迹图

Fig. 1 First paraxial ray tracing diagram of coaxial three-mirror system

$$\begin{cases} \alpha_1 = l_2/f'_1 \approx h_2/h_1 \\ \alpha_2 = l_3/l'_2 \approx h_3/h_2 \\ \beta_1 = l'_2/l_2 = u_2/u'_2 \\ \beta_2 = l'_3/l_3 = u_3/u'_3 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 u_2, u'_2, u_3, u'_3 分别为第一近轴光线在次镜和三镜的入射角和反射角。

对第一近轴光线追迹,根据反射镜高斯成像公式

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{R}, \quad (4)$$

可以得到各反射镜的曲率半径及镜间距的表达式为

$$\begin{aligned} R_1 = 2f'_1 = \frac{2}{\beta_1\beta_2}f', \quad R_2 = \frac{2\alpha_1}{(1+\beta_1)\beta_2}f', \\ R_3 = \frac{2\alpha_1\alpha_2}{1+\beta_2}f', \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} d_1 = \frac{1-\alpha_1}{\beta_1\beta_2}f', \quad d_2 = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2}f', \\ d_3 = l'_3 = \alpha_1\alpha_2f', \end{aligned} \quad (6)$$

式中 f' 为系统焦距^[4,5]。

为了保证离轴后系统依然具有良好的成像质量,同轴系统基本结构确定后,需要利用各反射面的二次非球面系数来校正望远系统的初级球差、彗差、像散以及场曲。初级像差系数关系式为

$$\begin{aligned} S_I &= \sum hP + \sum h^4K, \\ S_{II} &= \sum yP - J \sum W + \sum h^3yK, \\ S_{III} &= \sum \frac{y^2}{h}P - 2J \sum \frac{y}{h}W + J^2 \sum \phi + \sum h^2y^2K, \\ S_{IV} &= \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $W = \frac{\Delta u}{\Delta(1/n)}\Delta\left(\frac{u}{n}\right), \phi = \frac{1}{h}\Delta\left(\frac{u}{n}\right), P = \left[\frac{\Delta u}{\Delta(1/n)}\right]^2\Delta\left(\frac{u}{n}\right) = W \frac{\Delta u}{\Delta(1/n)}, K = -\frac{e^2}{R^3}\Delta n = \frac{k}{R^3}\Delta n, y$ 表示第二近轴光线与各反射镜面的交点高度。

令 $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$,可以得到各个反射镜的二次非球面系数^[6],令 $S_{IV} = 0$,得到轮廓参数 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 的一个限制条件^[7,8]。至此,同轴三反系统的初始结构便确定了。

3.2 离轴三反系统的优化及分类

在同轴系统优化设计初步完成后,可以对该系统进行光阑离轴或视场离轴,直至完全消除中心遮拦。选择反射镜半径、镜间距、反射镜二次及高次非球面系数为优化变量,并对镜间距加以控制以免系

统结构成倍增大,做进一步优化设计,直到系统像质满足设计要求为止。

根据中间成像情况,离轴三反系统可以分为有中间像和无中间像两种情况。中间成像的三反射系统具有相对中心遮拦小的优点,但该种结构只适合于小视场使用,加大视场后像质降低很快。对于无中间像的三反射系统,该系统很好地运用了光学设计中的对称法则,具有很强的像差校正能力,可以取得相对较大的设计视场^[9]。

4 前置望远系统结构

现代红外光学系统要求是:1)为了提高探测能力,要求系统具有较强的集光能力,这就需要光学系统具有大的相对口径且无中心遮拦;2)视场较大,同时现代的面阵探测器件要求平像场;3)具有接近衍射极限的成像质量;4)对弱信号的探测,要求光学系统具有中间像面,降低系统背景噪声,保证系统光瞳衔接,实现冷光阑效率为 100%;5)光学系统结构简单、质量轻及透射率高,以满足特定的应用环境条件^[10]。

因此,前置望远系统需要大相对口径、大视场和高成像质量。若前置望远系统采用折射式光学系统结构,由于系统口径比较大,高性能红外透镜材料价格昂贵、红外吸收严重,且存在较严重的色差,会使得光学系统成本高、光能量损失严重及成像质量难以提高;而反射式系统具有无色差,材料选择简单,不受口径大小限制,易于实现轻量化设计,对温度等环境因素变化的适应性强等优点^[11],因此前置望远系统设计选用离轴全反射式光学结构。

根据有无中间像离轴三反系统的不同特点,望远系统选择无中间像的离轴三反结构。为使系统结构小型化,在设计中将光阑位置定在主镜上,采取光阑离轴的方式进行设计。根据 3.1 节确定系统的初始结构,再参考 3.2 节,选择 4 次非球面系数为优化变量,利用 Zemax 软件优化得到望远系统最终的结构图、调制传递函数(MTF)图及点列图如图 2 所示,其中系统的像方数值孔径(NA)为 0.2425,出瞳距离为 -77.75 mm(参照像面位置,左为负,右为正)。

从图 2 中可以看出,前置望远系统完全避免了中心遮拦,各视场在特征频率 16.7 lp/mm 处的调制传递函数大于 0.46,接近衍射极限,点斑直径远小于艾里斑,满足高质量成像要求。

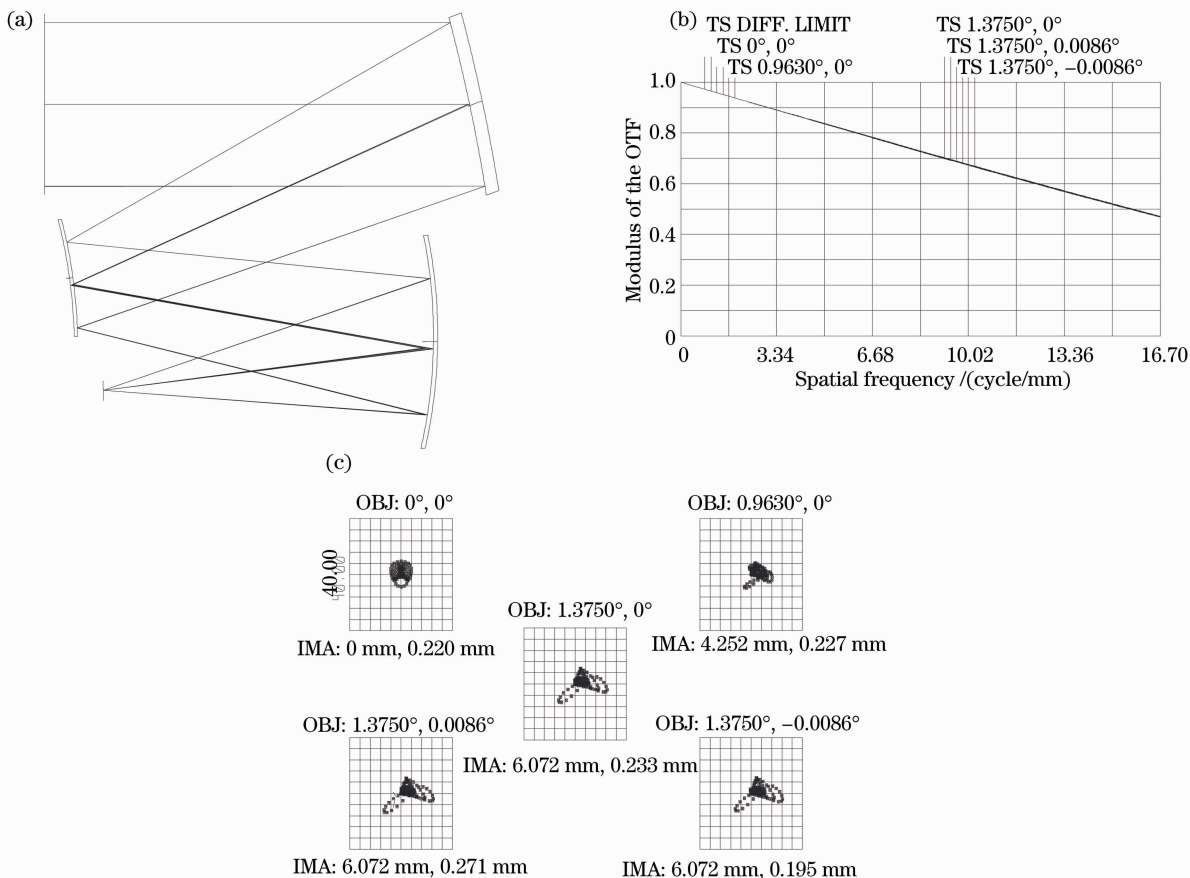


图 2 (a)前置望远系统光路图;(b) MTF 图;(c)点列图

Fig. 2 (a) Optical layout; (b) MTF; (c) spot diagram of the fore telescope system

5 光谱分光系统设计

5.1 分光系统设计原理和指标

光谱分光系统主要包括准直物镜、平面衍射光栅、成像物镜以及面阵探测器。光谱分光系统设计重点主要在于:1)实现光瞳衔接,即光谱分光入瞳与望远系统出瞳相衔接,以保证整个系统的能量利用率,避免光束切割导致能量损失和视场缺失;2)通过二次成像法保证系统 100%冷光阑效率,以减小背景噪声,提高系统信噪比。

平面光栅线色散率公式为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{mf'}{d \cos \theta}, \quad (8)$$

式中 dl 、 $d\lambda$ 分别为探测器像素尺寸与单个像素对应的光谱分辨率, d 为光栅常数, m 为衍射级次, f' 为成像物镜焦距, θ 为衍射角。

对于该系统, $m = 1$, $d = 20 \mu\text{m}$, 中心波长 $\lambda_0 = 10 \mu\text{m}$ 处的衍射角 θ 较小, 约为 0° , 计算得到成像物镜焦距 $f' = 38.4 \text{ mm}$ 。为了实现分光系统 1:1 成像, 准直物镜焦距也为 38.4 mm 。

根据光栅方程

$$d(\sin \theta \pm \sin \theta_0) = m\lambda, \quad (9)$$

可以计算得到衍射波长为 $8 \mu\text{m}$ 和 $12 \mu\text{m}$ 时的衍射角分别为 $\pm 5.74^\circ$ 。式中, 入射角 $\theta_0 = 30^\circ$, λ 为衍射波长。

根据成像结构的不同, 准直物镜和成像物镜可以分为折射式和反射式两种。表 2 给出了分光系统的设计指标, 为了保证与前置望远系统的光瞳和视场匹配, 光谱分光系统的入瞳位于前置望远系统的出瞳处, 光谱分光系统的狭缝位于望远系统的像面位置, 光谱分光系统的物方数值孔径等于望远系统的像方数值孔径。

表 2 光谱分光系统设计指标

Table 2 Design parameters of spectrophotometric system

Performance parameter	Value
Entrance pupil distance /mm	-77.75
Focal length of collimating lens /mm	38.4
Focal length of imaging lens /mm	38.4
Object space NA	0.2425
Entrance pupil distance /mm	± 20

5.2 反射式光谱分光系统的设计

若光谱分光系统采用全反射式,综合考虑系统结构及设计要求,准直物镜选用单片反射镜,成像物镜为满足二次成像及冷光阑效率的要求,采用有中间像的离轴三反式结构。

准直物镜为抛物面反射镜,可将位于焦平面的狭缝出射光准直为无像差的平行光;光栅既为孔径光阑,又为分光元件;为提高像质,将成像物镜3片的四次、六次非球面系数均设为优化变量;选择合适的离轴量,保证系统无中心遮拦。

图3、图4分别给出了优化后的反射式分光系统的光路图和点列图。从图4中可以看到,反射式分光系统的点斑最大均方根半径高达302 μm,远大于艾里斑,成像质量很差。

于艾里斑,成像质量很差。

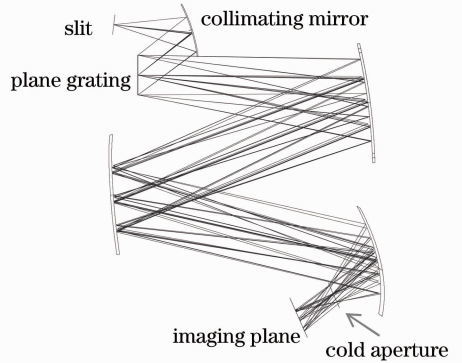


图3 反射式分光系统光路图

Fig. 3 Optical layout of reflective spectrophotometric system

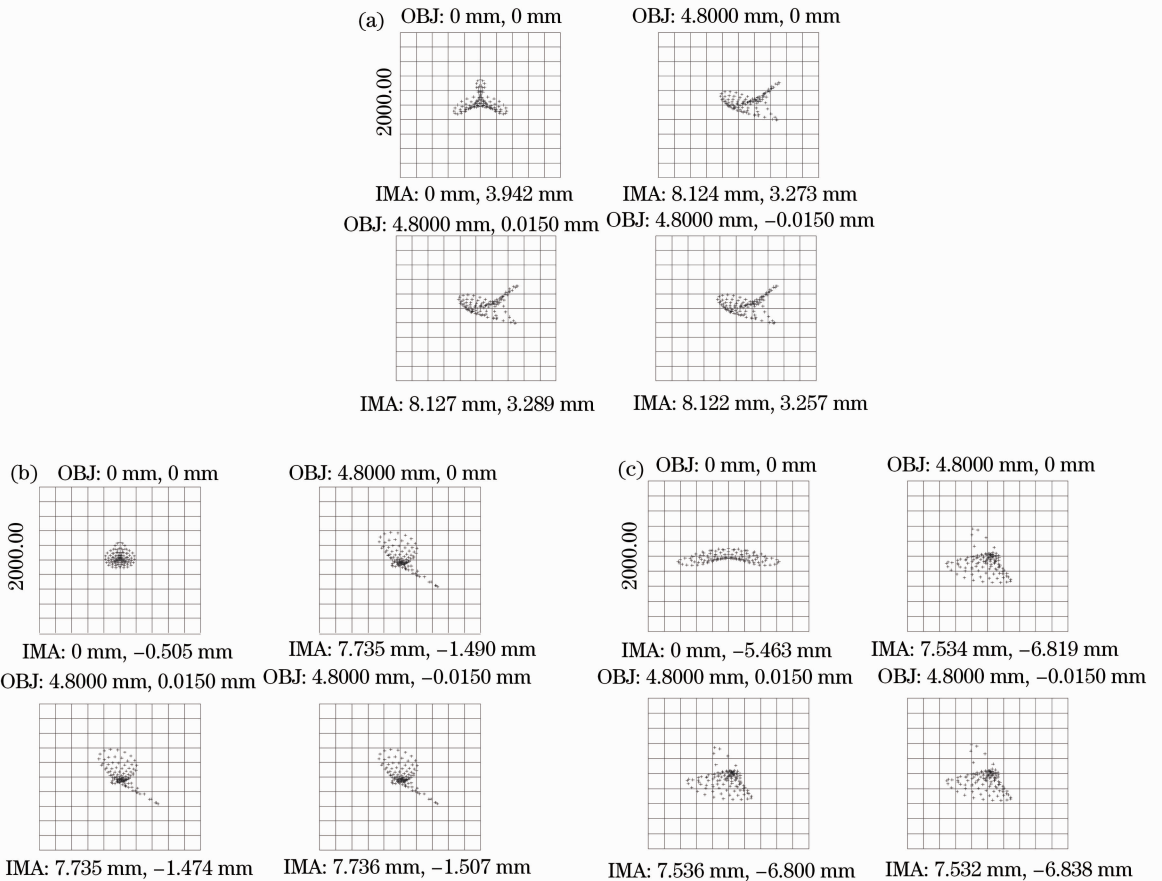


图4 反射式分光系统点列图。(a) 8 μm; (b) 10 μm; (c) 12 μm

Fig. 4 Spot diagram of reflective spectrophotometric system. (a) 8 μm; (b) 10 μm; (c) 12 μm

导致这种结构成像质量差的原因在于系统工作波长范围较宽,通过光栅分光后,不同波长之间的衍射角差达 11.48°,导致反射式成像物镜在分光方向具有较大的视场,由于反射式成像物镜需要设置冷光阑并且无中心遮拦,因此系统离轴量大,存在很大的离轴像散和彗差,这也充分证明了存在中间像的

离轴三反系统很难实现大视场成像系统设计。

此外,准直物镜焦距为 38.4 mm,而入瞳位于狭缝右侧 77.75 mm,即位于准直镜之后(如图3所示)。为了保证准直物镜的出瞳成像在光栅上,根据物像关系(4)式,得到光栅与准直镜间的距离小于准直物镜的焦距;为避免中心遮拦,准直镜与光栅之间

必须有足够的离轴量,这进一步增大了设计难度。

5.3 折射式分光系统的设计

为了解决反射式光谱分光系统的设计缺陷,本课题组对准直物镜和成像物镜系统采用折射结构进行改进设计,如图 5 所示。准直物镜采用两片分离式正负透镜对主要像差球差和彗差校正,获得良好的准直光束,避免了反射式结构在像质要求与挡光要求之间的矛盾;而成像物镜利用 5 片透镜,采用二次成像的方式实现了系统的冷光阑效率为 100%,并且在整个光路中光线在每个透镜上的入射角度比较小,避免了初、高级像差的产生。

图 6 给出了不同中心波长的光谱分辨率为 16 nm 时的系统点列图。由图 6 可以得到,系统在长波红外波段的光谱分辨率高达 16 nm。在各个中心波长处各视场的点斑均方根半径最大值为 $10.003 \mu\text{m}$,远小

于艾里斑。图 7 给出了不同波长下系统的调制传递函数,其成像质量接近衍射极限,光学系统完全满足长波红外机载遥感的需求。

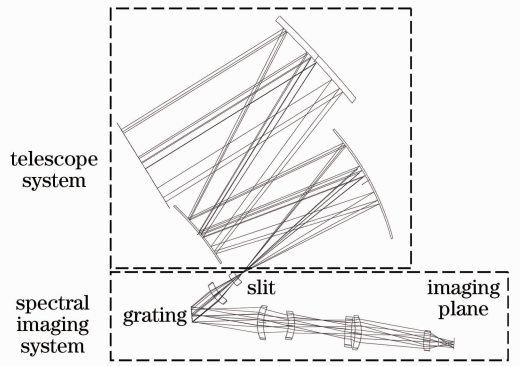


图 5 成像光谱仪系统光路图

Fig. 5 Optical layout of imaging spectrometer system

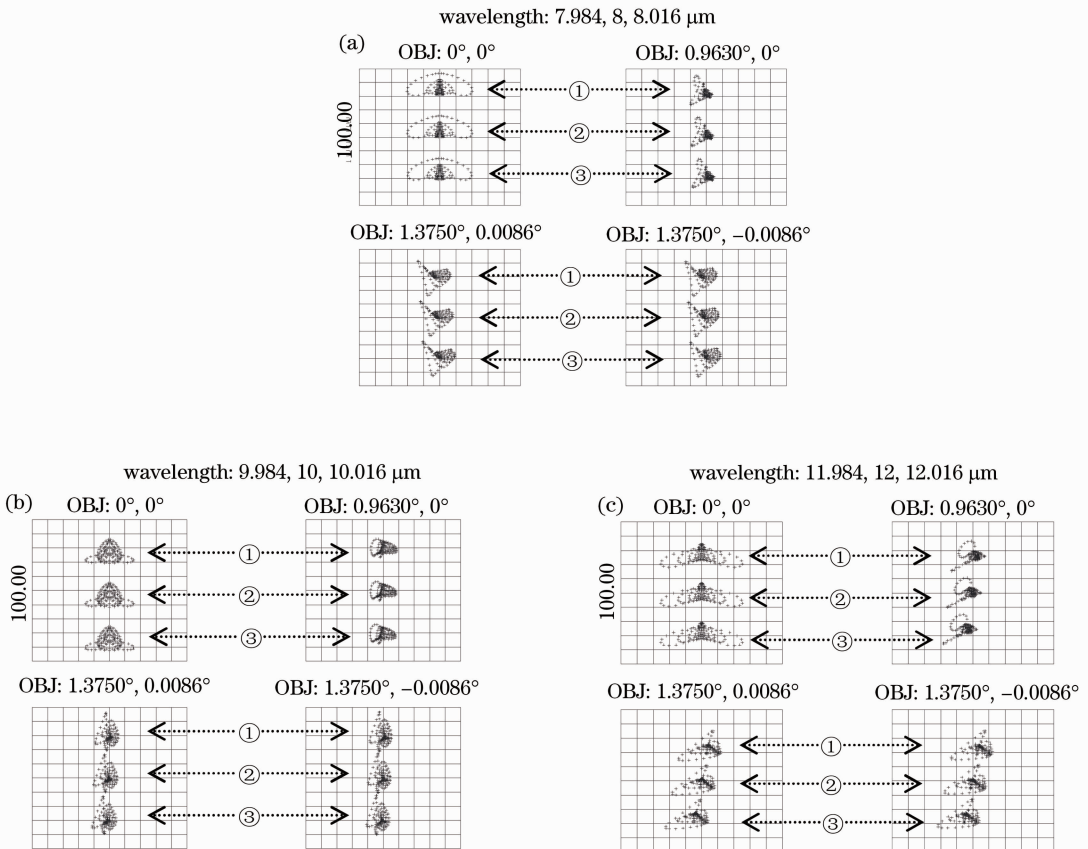


图 6 不同中心波长谱宽为 $\pm 16 \text{ nm}$ 的系统点列图。(a) $8 \mu\text{m}$; (b) $10 \mu\text{m}$; (c) $12 \mu\text{m}$

Fig. 6 Spot diagram of system at different central wavelengths with line width of $\pm 16 \text{ nm}$. (a) $8 \mu\text{m}$; (b) $10 \mu\text{m}$; (c) $12 \mu\text{m}$

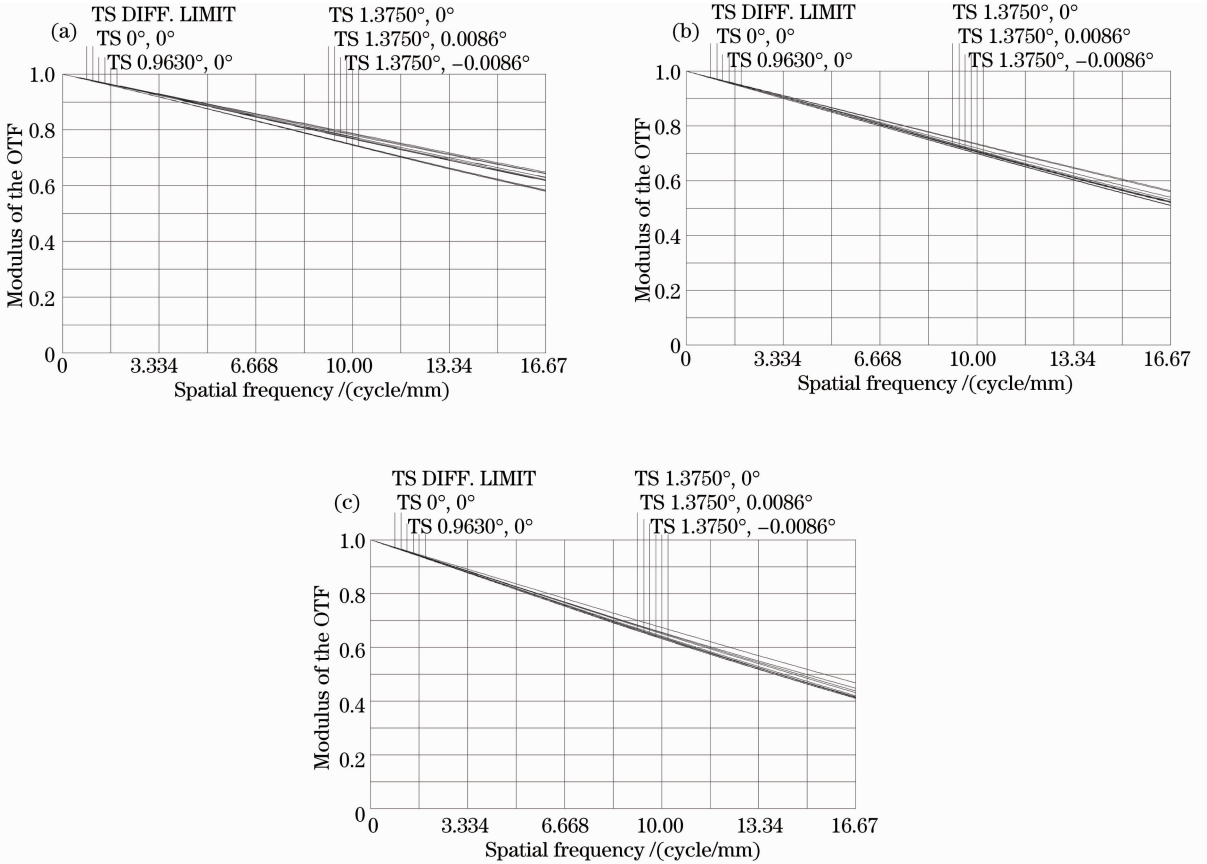


图 7 不同波长下系统的调制传递函数曲线。(a) 8 μm; (b) 10 μm; (c) 12 μm

Fig. 7 Modulation transfer function curves of system at different wavelengths. (a) 8 μm; (b) 10 μm; (c) 12 μm

6 结 论

本文设计了一种应用于机载遥感的长波红外成像光谱仪光学系统,系统由前置望远系统和光谱分光系统组成。其中望远系统采用离轴三反式;分光系统对反射式和折射式进行了比较,设计结果证明折射式分光系统具有光谱分辨率高、成像质量好以及结构合理的优点,可实现较大的设计视场。设计的成像光谱仪全系统 F 数为 2,视场为 2.75° ,光谱分辨率 16 nm,空间分辨率 $150 \mu\text{rad}$,通过二次成像实现 100%冷光阑效率,成像质量接近衍射极限。预计该系统将在长波红外高光谱遥感领域发挥重要的作用。

参 考 文 献

- Zheng Yuquan, Yu Bingxi. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers[J]. *J. 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
- Liang Shuang, An Zhiyong, Feng Yutao *et al.*. Scenery radiation acquisition features of short-wave infrared imaging spectrometer

- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1304~1307
- 梁爽, 安志勇, 冯玉涛等. 短波红外成像光谱仪的景物辐射采集特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1304~1307
- Xu Hong. Research of Key Technologies of Multispectral, Hyperspectral Imaging Detection [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. 30~31
- 许洪. 多光谱、超光谱成像探测关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008. 30~31
- Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2001, **9**(4): 315~318
- 常军, 翁志成, 姜会林等. 长焦距空间三反光学系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(4): 315~318
- Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2): 278~280
- 张亮, 安源, 金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(2): 278~280
- Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683
- 郭永祥, 李英才, 梁天梅等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2680~2683
- Li Huan, Xiang Yang. Optical design of off-axis three-mirror telescope systems of imaging spectrometers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3): 500~504
- 李欢, 向阳. 成像光谱仪离轴三反望远系统的光学设计[J].

- 红外与激光工程, 2009, **38**(3): 500~504
- 8 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
- 9 Bu Jiangping, Tian Weijian, Yang Xiaojun *et al.*. A novel design of off-axis three-mirror reflective optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 608~610
卜江萍, 田维坚, 杨小君等. 一种新型离轴三反式光学系统的设计[J]. 光子学报, 2006, **35**(4): 608~610
- 10 Liu Qunlong, Wu Hanping, Zhang Yan *et al.*. Structural features and technical analysis of new infrared optical system[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2010, **25**(2): 29~34
刘群龙, 吴晗平, 张焱等. 新型红外光学系统的结构特点与技术分析[J]. 光电技术应用, 2010, **25**(2): 29~34
- 11 Wang Lihui, Yu Yunjian, Lu Duanjun. Optical design of IR imaging system with large linear field of view and large relative aperture[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2008, **27**(1): 39~41
王立辉, 郁蕴健, 陆段军. 大线视场大相对孔径红外成像系统的光学设计[J]. 红外与毫米波学报, 2008, **27**(1): 39~41

栏目编辑: 韩 峰