

文章编号 1004-924X(2014)02-0266-08

消谱线弯曲长波红外成像光谱仪设计

张晓龙^{1,2}, 刘 英^{1*}, 孙 强¹, 李 淳¹, 周 昊^{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. 中国科学院大学, 北京 130049)

摘要:为了实现遥感目标的长波红外高光谱成像,有效消除平面光栅产生的谱线弯曲,设计了离轴透镜消谱线弯曲长波红外平面光栅成像光谱仪。分别计算了平面光栅和离轴透镜产生的谱线弯曲,分析了谱线弯曲随相关参量的变化关系,并基于此设计了消谱线弯曲的初始结构。通过优化设计得到的光学系统的通光孔径为 100 mm, F 数为 2, 光谱分辨率为 20 nm, 空间分辨率为 150 μrad , 冷光阑效率为 100%, 成像质量接近衍射极限, 系统谱线弯曲由原有的 180 μm 以上变为 14.3 μm 以内。该项设计获得了具有普适性的消谱线弯曲公式, 证明了离轴透镜具备校正谱线弯曲的特殊功能。最后的设计结果表明, 在满足系统成像质量要求且不增加系统复杂度的前提下, 采用离轴透镜的平面光栅光谱仪的系统谱线弯曲小于探测器像元尺寸的 1/2, 满足使用要求。

关键词: 光学设计; 成像光谱仪; 红外光谱仪; 谱线弯曲; 平面光栅; 离轴透镜

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0266

Design of long-wave infrared imaging spectrometer with eliminating spectral curvature

ZHANG Xiao-long^{1,2}, LIU Ying^{1*}, SUN Qiang¹, LI Chun¹, ZHOU Hao^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 130049, China)*

** Corresponding author, E-mail: liuy613@163.com*

Abstract: To achieve the long-wave infrared hyperspectral imaging for remote sensing targets and to eliminate the spectral curvature of a plane grating effectively, a long-wave infrared imaging spectrometer with an off-axis lens was designed. The spectral curvatures from the plane grating and a single off-axis lens were calculated, respectively, and the relationships between spectral curvatures and relative parameters were analyzed, then an initial structure for eliminating spectral curvature was designed. The optical system optimized shows an aperture of 100 mm, F number of 2, spectral resolution of 20 nm, spatial resolution of 150 μrad , and a cold aperture efficiency of 100%. Moreover, its image quality is close to the diffraction limit and the spectral curvature of system changes from more than 180 μm to less than 14.3 μm . The design obtains a universal eliminating spectral curvature formula, and

收稿日期: 2013-04-11; **修订日期:** 2013-05-28.

基金项目: 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资金资助项目 (No. 2011CJT0004); 吉林省科技厅资助项目 (No. 20106015, 20100310); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20090557)

proves that the off-axis lens has the function to eliminate spectral curvature. It concludes that the imaging spectrometer of plane grating using off-axis lens can offer a spectral curvature less than half the pixel size of the detector without increasing the system complexity, which meets the use request on the premise of satisfying imaging quality.

Key words: optical design; imaging spectrometer; infrared spectrometer; spectral curvature; plane grating; off-axis lens

1 引 言

成像光谱仪是 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的,它能同时获得目标的图像信息和光谱信息。长波红外波段(8~12 μm)是多种化学物质的吸收特征光谱所在的区域,因此可以根据地球上物质在此波段的光谱特征精确地识别它们。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发挥着越来越重要的作用^[1]。

成像光谱仪的核心为分光系统。在众多分光方式中,棱镜分光的缺点是光谱成像谱线弯曲较大,并且具有很大的色散非线性^[2-3];而采用平面光栅分光的常规成像光谱系统,由于狭缝方向垂直于系统的子午面,狭缝上不同物点发出的光线通过平面光栅后也会产生较严重的谱线弯曲。谱线弯曲是指狭缝的不同波长弯曲图像与直线的偏离程度,它会导致光谱混叠。为了减小谱线弯曲和谱带弯曲,近年来国内外很多学者研究了将光栅或棱镜应用于 Offner 中继结构组成 Offner 结构的光谱成像系统,这种结构在一定程度上实现了光谱成像系统的小型化和轻量化^[4-7];但由于该系统采用的是凸面光栅,存在衍射效率低、光通量小、偏振灵敏度高、有级次重叠和高级衍射杂光、鬼像多等缺点^[3]。2008 年,Warren 等对基于凹面光栅的 Dyson 同心成像光谱仪进行了研究,但该系统存在冷光阑设计困难、制冷系统体积大的缺陷^[8-10]。此外,曲面光栅的成像像差较大,凸面光栅的加工技术还不够成熟且价格昂贵。目前,

国内的凸面光栅主要还是依赖进口^[3]。

本文采用平面光栅作为分光元件对长波红外成像光谱仪进行了优化设计,为了消除平面光栅自身所产生的谱线弯曲,分析计算了平面光栅和离轴透镜各自产生的谱线弯曲以及它们随相关参数的变化关系,设计了离轴透镜消谱线弯曲的平面光栅成像光谱仪系统。优化设计后系统的谱线弯曲小于 14.3 μm,小于探测器像元尺寸(30 μm)的一半,满足使用要求。

2 系统主要技术指标

2.1 总体系统指标

成像光谱系统包括前置望远系统和光谱成像系统。前置望远系统将远处地物目标成像在狭缝上,再经过光谱成像系统准直、分光、成像,在探测器焦平面阵列上得到目标的光谱图像。为了保证系统具有足够的能量响应度,本文选用制冷型长波红外 HgCdTe 探测器,其主要的性能指标如下:像元数为 320×256;像元尺寸 l 为 30 μm×30 μm;光谱响应波段为 8~12 μm;系统 F 数为 2。

综合考虑系统视场以及孔径等性能,选择前置望远系统焦距 $f=200$ mm, F 数为 2。根据瞬时视场角 IFOV 公式:

$$2\tan \frac{IFOV}{2}=\frac{l}{f}, \tag{1}$$

得到仪器瞬时视场角为 0.15 mrad。系统总视场为:

$$FOV=IFOV\times 320=2.75^{\circ}. \tag{2}$$

为了使狭缝像与探测器匹配,光谱成像系统的放大率取 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
Tab.1 Optical design parameters

Performance parameters	Values
Spectral band	8~12 μm
Focal length	200 mm
F number	2
Field of view	2.75°
Instantaneous field of view	0.15 mrad
Slit size	9.6 mm×30 μm
Spectral channel number	256

2.2 光谱成像系统设计指标

光谱成像系统主要包括准直物镜、反射式平面衍射光栅、成像物镜以及面阵探测器。

平面光栅线色散率公式为：

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{m \cdot f'}{d \cdot \cos \theta}, \tag{3}$$

式中： dl 、 $d\lambda$ 分别为探测器像元尺寸与单个像元对应的光谱分辨率， 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， $m=1$ ， $d=20\text{ }\mu\text{m}$ ，中心波长 $\lambda_0=10\text{ }\mu\text{m}$ 处的衍射角 θ 较小，约为 0° ，计算得到成像物镜焦距 $f'=38.4\text{ mm}$ 。为了实现光谱成像系统 1:1 成像，准直物镜焦距也为 38.4 mm。

根据光栅方程：

$$d(\sin \theta \pm \sin \theta_0) = m\lambda, \tag{4}$$

可以计算得到衍射波长为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时入射角 $\theta_0=-30^\circ$ ， λ 为衍射波长。

为了保证整个系统的光瞳衔接，光谱成像系统采用二次成像法。此外，光谱成像系统的物方数值口径要与望远系统的像方数值口径相匹配。表 2 给出了光谱成像系统的设计指标。

表 2 光谱成像系统设计指标

Tab.2 Design parameters of spectral imaging system

Performance parameters	Values
Diffraction order	+1
Slit size	9.6 mm×30 μm
Incidence angle	-30°
Collimating lens focal length	38.4 mm
Imaging lens focal length	38.4 mm
Object space NA	0.242 5

3 平面光栅谱线弯曲的计算

为了获得平面光栅光谱仪谱线弯曲的精确表达式，本文从矢量衍射理论出发，建立了与光栅常数、工作波长、衍射级次、入射狭缝高度、入射狭缝中心点光线入射角、准直物镜焦距和成像物镜焦距等物理量相关的谱线弯曲表达式^[11]。图 1 为光栅衍射光路示意图。

设狭缝半高度为 h ，点 1 为入缝中心点，点 2 为端点。光栅面与 xoy 面重合，栅线平行于入射狭缝。入射面 P_1 为入缝中心点 1 的主光线与光栅平面法线 n 构成的平面，它与光栅主截面重合。来自入射狭缝端点 2 的主光线与光栅平面法线 n 构成入射面 P_2 。入射面 P_1 与 P_2 形成夹角 Φ_2 ，称为入射方位角。点 1、点 2 的主光线入射角分别为 θ_1, θ_2 ，显然 $\theta_1 \neq \theta_2$ 。点 2 的入射光束不在光栅主截面上，衍射光束显然也不在光栅主截面上，并且其衍射角也不等于点 1 的衍射角，这就会导致光谱线的弯曲。

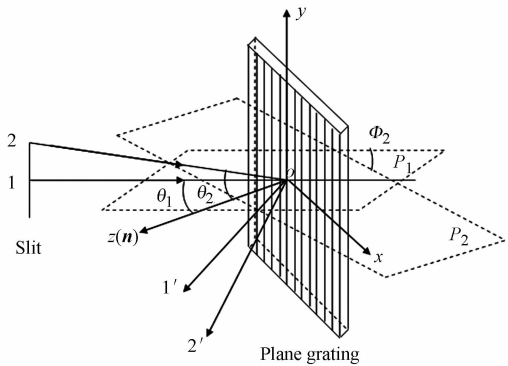


图 1 光栅衍射光路示意图

Fig.1 Sketch map for grating diffractive path

3.1 狭缝端点 2 主光线衍射公式的推导

点 2 发出的入射到光栅的主光线的波矢量的 x 分量、 y 分量分别为：

$$k_{xm} = k_x + m \cdot \frac{2\pi}{d}, \tag{5}$$

$$\begin{cases} k_x = k \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \Phi_2 \\ k_y = k \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \Phi_2 \end{cases}, \tag{6}$$

式中： $k=\frac{2\pi}{\lambda}$ 。设此时第 m 级衍射波的衍射极角

为 $\theta_{2,m}$, 衍射方位角为 $\Phi_{2,m}$ 。同理可得:

$$\begin{cases} k_{xm} = k \cdot \sin \theta_{2,m} \cdot \cos \Phi_{2,m} \\ k_y = k \cdot \sin \theta_{2,m} \cdot \sin \Phi_{2,m} \end{cases} \quad (7)$$

由式(5)、(6)、(7)推得光栅方程的一般形式为:

$$\begin{cases} \sin \theta_{2,m} \cdot \cos \Phi_{2,m} = \sin \theta_2 \cdot \cos \Phi_2 + m \cdot \frac{\lambda}{d} \\ \sin \theta_{2,m} \cdot \sin \Phi_{2,m} = \sin \theta_2 \cdot \sin \Phi_2 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)推得衍射极角和衍射方位角为:

$$\begin{aligned} \sin \theta_{2,m} &= \text{sign}(\sin \theta_2 \cdot \cos \Phi_2 + m \cdot \frac{\lambda}{d}) \cdot \\ &\sqrt{\sin^2 \theta_2 \cdot \sin^2 \Phi_2 + (\sin \theta_2 \cdot \cos \Phi_2 + m \cdot \frac{\lambda}{d})^2} \\ \tan \Phi_{2,m} &= \frac{\sin \theta_2 \cdot \sin \Phi_2}{\sin \theta_2 \cdot \cos \Phi_2 + m \cdot \frac{\lambda}{d}} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)为狭缝端点 2 主光线的衍射方程。

3.2 谱线弯曲方程的建立

对于来自狭缝中心点的主光线,其入射方位角为 0,衍射方位角也为 0,可得:

$$\sin \theta_{1,m} = \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{d} \quad (10)$$

只要求出来自狭缝端点 2 的衍射波矢的衍射极角 $\theta_{2,m}$ 在光栅主截面 P_1 内的投影 $\theta_{2 \rightarrow 1,m}$, 并求出它与 $\theta_{1,m}$ 的正切值偏离量 $\Delta\theta = \tan \theta_{2 \rightarrow 1,m} - \tan \theta_{1,m}$, 就可以得到谱线弯曲的精确表达式。

$$\tan \Phi_2 = \frac{h}{f_1 \cdot \sin \theta_1}, \quad (11)$$

$$\tan \theta_2 = \sqrt{1 + \tan^2 \Phi_2} \cdot \tan \theta_1. \quad (12)$$

对于衍射波而言,同样满足上述投影关系:

$$\tan \theta_{2,m} = \sqrt{1 + \tan^2 \Phi_{2,m}} \cdot \tan \theta_{2 \rightarrow 1,m}. \quad (13)$$

则平面光栅产生谱线弯曲的精确表达式为:

$$\Delta L = f_2 \cdot \Delta\theta = f_2 \cdot (\tan \theta_{2 \rightarrow 1,m} - \tan \theta_{1,m}), \quad (14)$$

其中: f_2 为成像物镜焦距。

根据表 2 参数及式(14)可计算得到工作波长分别为 8,10,12 μm 时平面光栅所产生的谱线弯曲,如图 3 所示。

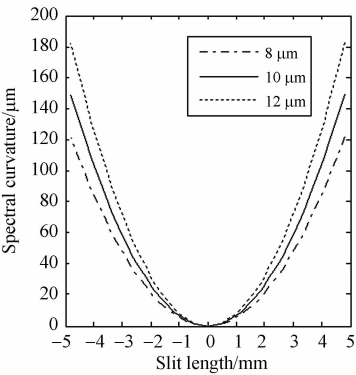


图 3 平面光栅产生的谱线弯曲
Fig.3 Spectral curvatures of plane grating

4 离轴透镜谱线弯曲的计算

假定光谱成像系统狭缝沿水平方向,则光栅产生的谱线弯曲为狭缝上不同点的像在像面上的垂直高度差。光栅为光谱成像系统的孔径光阑,狭缝上不同点发出的光线经光栅衍射后可近似看作光栅各点发出的一系列弧矢宽光束。为平衡光栅产生的谱线弯曲,需在光栅后方增加能够产生弧矢彗差的光学元件。在共轴光学系统中,轴上物点的主光线方向一定沿光轴方向,也一定通过透镜中心,因而不会产生彗差;对于轴外物点,子午面内的轴外物点发出的宽光束会产生彗差,而过光轴的弧矢面内的轴外物点不会产生任何彗差。因此,若光栅后续光学系统为共轴系统,且其光轴与狭缝中心物点主光线的衍射方向重合,则

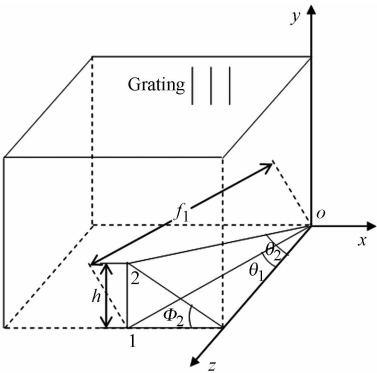


图 2 光栅入射光示意图
Fig.2 Sketch map for light incident of grating

图 2 为光栅入射光示意图。从图中可以看出,准直物镜焦距 f_1 在光栅面上的投影为 $f_1 \cdot \sin \theta_1$, 入射方位角 Φ_2 可表示为:

不能产生彗差,也不能校正谱线弯曲,因此需采用离轴光学系统。

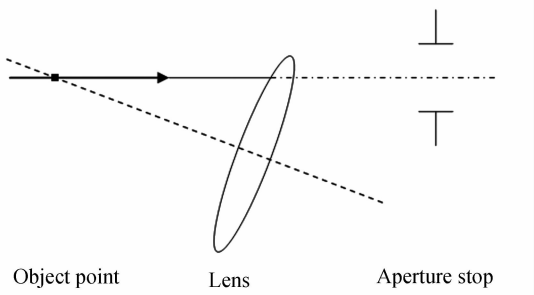


图 4 离轴透镜模型
Fig. 4 Model of off-axis lens

假设在透镜前有一轴上物点,现将透镜绕物点旋转一定角度,得到离轴透镜的一种简单模型,如图 4 所示。将整个系统旋转一定角度使透镜轴线沿水平方向。然后分析计算其产生的谱线弯曲。

设球面透镜的前后球面分别为面 1、面 2,相关物理量分别用下标 1,2 表示。对面 1 应用子午面内实际光线经过单个折射球面时的光路计算公式^[12]:

$$\begin{cases} \frac{\sin I}{\sin U} = \frac{L-r}{r} \\ n \sin I = n' \sin I' \\ U + I = U' + I' \\ \frac{\sin I'}{\sin U'} = \frac{L'-r}{r} \end{cases} \quad (15)$$

得到折射球面 1 出射角和像距的表达式:

$$\begin{cases} U_1' = U_1 + \arcsin\left(\frac{L_1-r_1}{r_1} \sin U_1\right) - \arcsin\left(\frac{L_1-r_1}{nr_1} \sin U_1\right) \\ L_1' = r_1 \left(1 + \frac{L_1-r_1}{nr_1} \frac{\sin U_1}{\sin U_1'}\right) \end{cases} \quad (16)$$

对折射球面 2 利用公式(15)以及过渡公式^[12]:

$$\begin{cases} U_2 = U_1' \\ L_2 = L_1' - d \end{cases} \quad (17)$$

得到折射球面 2 出射角:

$$U_2' = U_1' + \arcsin\left(\frac{L_1'-d-r_2}{r_2} \sin U_1'\right) - \arcsin\left(n \frac{L_1'-d-r_2}{r_2} \sin U_1'\right). \quad (18)$$

式中: L, L' 分别为物距和像距, U, U' 分别为物方和像方孔径角, r, d, n 分别为透镜的曲率半径、厚度和折射率。将式(16)代入式(18)即可得到透镜出射角的最终表达式。

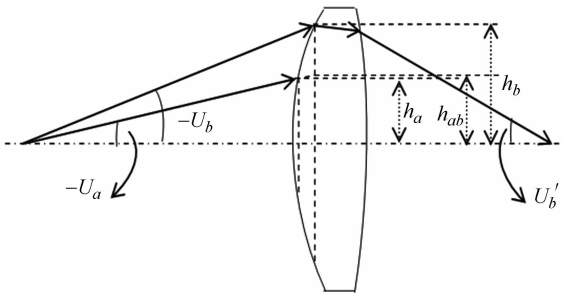


图 5 不同孔径角光线入射透镜示意图
Fig. 5 Layout for lights entering lens with different aperture angles

分析同一轴上物点,不同物方孔径角的光线通过透镜后的像方孔径角大小,如图 5 所示。设有 a, b, c 3 条光线,其中 $|U_a| < |U_b| = |U_c|$ 且光线 a, b 与光轴共面,不妨设此面与直角坐标面 $yo z$ 重合,记为面 AB ;光线 c 在面 AB 内的投影与光线 a 重合,即光线 c 入射孔径角在 y 轴方向的分量 $U_{cy} = U_a$ 。

不同物方孔径角的光线与透镜的交点位置不同,在垂直光轴方向上与透镜的截面大小也不同。记光线 a, b 与透镜的截面分别为面 A 、面 B ,光线 c 与透镜的截面与面 B 重合。

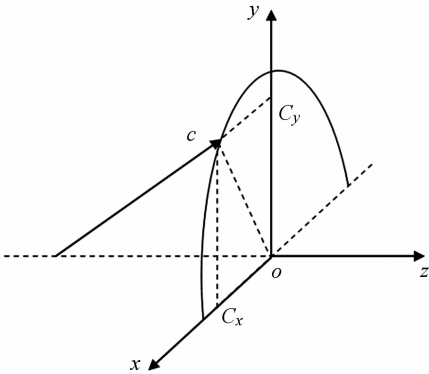


图 6 光线 c 入射透镜示意图
Fig. 6 Diagram for light c entering lens

以面 B 为 xoy 面、光轴为 z 轴建立的直角坐标系如图 6 所示。 C_x, C_y 分别为入射高度在 x, y

方向的分量。则 $C_y = h_{ab}$, $\sqrt{C_x^2 + C_y^2} = h_b$, $\tan^2 U_{cx} + \tan^2 U_{cy} = \tan^2 U_c$ 。光线 c 的像方孔径角为 U_c' , 在 x, y 方向的分量分别为 U_{cx}', U_{cy}' , 同理, $\tan^2 U_{cx}' + \tan^2 U_{cy}' = \tan^2 U_c'$ 。

轴上物点满足关系:

$$\frac{\tan U_{cx}'}{\tan U_{cy}'} = \frac{\tan U_{cx}}{\tan U_{cy}} \tag{19}$$

综上得:

$$\tan U_{cy}' = \frac{\tan U_c' \cdot \tan U_a}{\tan U_c} \tag{20}$$

透镜产生的谱线弯曲为:

$$\Delta L' = L_{\text{image}}' (\tan U_{cy}' - \tan U_a') = L_{\text{image}}' \left(\frac{\tan U_c' \cdot \tan U_a}{\tan U_c} - \tan U_a' \right) \tag{21}$$

其中: L_{image}' 为离轴透镜的像距, U_a', U_c' 由式(18)求得。

由式(16)、(18)、(21)可知, 离轴透镜产生的谱线弯曲与物距、物方孔径角、弧矢方向光束宽度以及透镜曲率半径、折射率、厚度相关。通过 matlab 计算和 zemax 仿真可以得到谱线弯曲随各参量的变化关系。图 7 给出了物距分别为 -60, -90, -120, -150 mm 时离轴透镜产生的谱线弯曲随入射孔径角的变化关系。其中, 透镜为锗透镜, 前后球面的曲率半径分别为 4 900, -400 mm, 厚度为 10 mm, 弧矢方向的光束角度为 $\pm 7.125^\circ$ 。

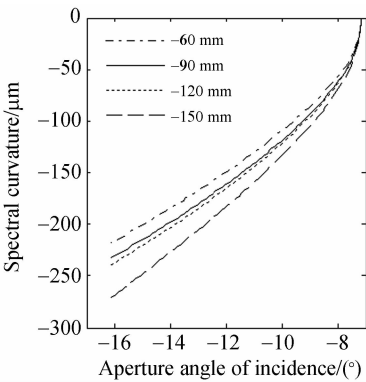


图 7 离轴透镜产生的谱线弯曲

Fig. 7 Spectral curvatures of off-axis lens

根据得到的平面光栅和离轴透镜产生的谱线弯曲建立消谱线弯曲的初始结构, 以有效地指导光学设计。

6 光学系统的设计

前置望远系统采用离轴三反系统, 以实现无遮拦、大口径、宽视场成像设计。对于光谱成像系统, 准直物镜采用两片分离式正负透镜校正主要像差——球差和彗差, 获得良好的准直光束; 而成像物镜利用 4 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。其中, 衍射光束经过离轴透镜成像在一次像面上, 消除了光栅产生的谱线弯曲。利用离轴透镜来优化系统谱线弯曲的主要过程为: 首先优化得到一次成像物镜未离轴时的光学系统; 然后根据一次成像物镜的相关参量(曲率半径、折射率、厚度)以及系统存在的谱线弯曲确定合适的离轴量; 最后适度改变离轴透镜的离轴量和前后表面的曲率半径, 优化得到消谱线弯曲的光学系统。系统总体光路如图 8 所示。

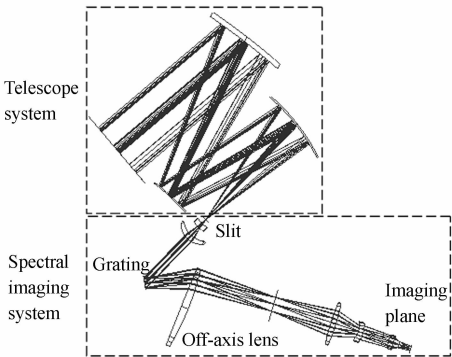
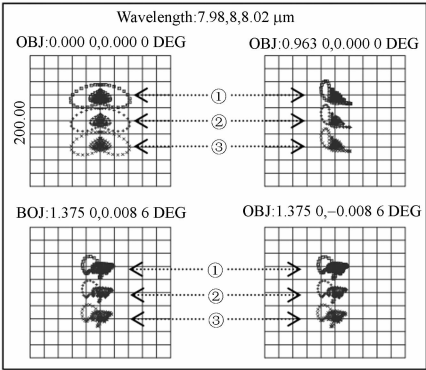


图 8 成像光谱仪系统光路图

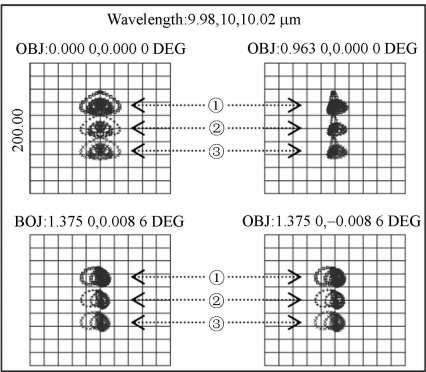
Fig. 8 Optical layout of imaging spectrometer system

图 9 给出了光谱分辨率为 20 nm 时不同中心波长的系统点列图, 系统在长波红外波段的光谱分辨率高达 20 nm。在各个中心波长处各视场的点斑均方根半径最大值为 $17.366 \mu\text{m}$, 小于艾里斑, 成像质量接近衍射极限, 光谱分辨率主要受艾里斑限制。图 10 为系统在特征频率为 16.67 lp/mm 处衍射极限、中心视场和边缘视场的调制传递函数随波长的变化曲线。T 和 S 分别代表子午和弧矢的调制传递函数, 在特征频率处系统的调制传递函数大于 0.39, 接近衍射极限, 满足高

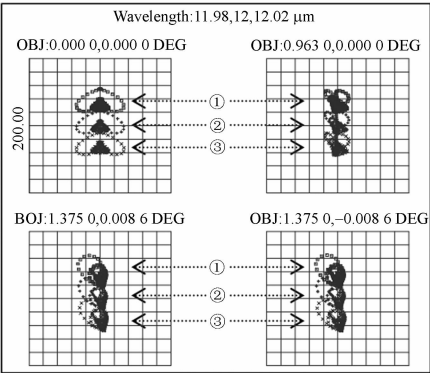
质量的成像要求。图 11 为光学系统在不同中心波长处产生的谱线弯曲随视场的变化曲线。其中,最大的谱线弯曲小于 $14.3\text{ }\mu\text{m}$,小于探测器像元尺寸的 $1/2$,满足光谱仪对谱线弯曲的要求。



(a) $8\text{ }\mu\text{m}$



(b) $10\text{ }\mu\text{m}$



(c) $12\text{ }\mu\text{m}$

图 9 谱宽为 $\pm 20\text{ nm}$ 时不同中心波长的系统点列图
Fig. 9 Spot diagrams at different central wavelengths with line width of $\pm 20\text{ nm}$

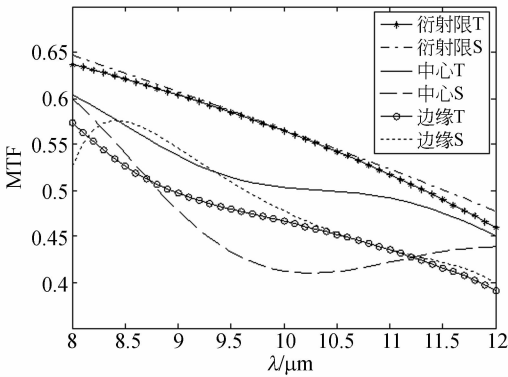


图 10 不同波长下系统的调制传递函数曲线
Fig. 10 Modulation transfer function curves at different wavelengths

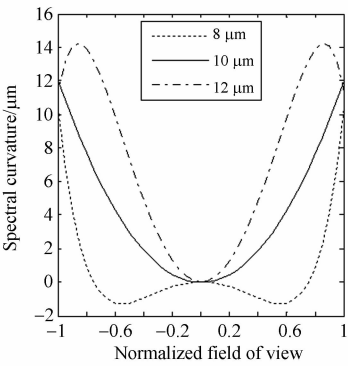


图 11 光学系统产生的谱线弯曲
Fig. 11 Spectral curvatures of optical system

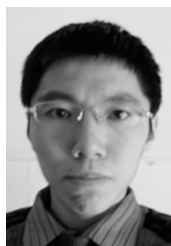
7 结 论

本文设计了一种利用离轴透镜消谱线弯曲的长波红外平面光栅成像光谱仪的光学系统,由前置望远系统和光谱成像系统组成。分别计算了平面光栅和离轴透镜产生的谱线弯曲,并分析了谱线弯曲随相关参数的变化关系,以指导光学设计。所设计的成像光谱仪的谱线弯曲小于 $14.3\text{ }\mu\text{m}$,光谱分辨率为 20 nm ,通过二次成像实现了 100% 冷光阑效率,成像质量接近衍射极限。设计结果表明,离轴透镜具备校正谱线弯曲的特殊功能。本文获得了具有普适性的消谱线弯曲公式,从而为成像光谱仪的设计提供了一种新的设计思路和理论指导。

参考文献:

- [1] 许洪,王向军,刘峰,等. 非制冷色散式成像光谱仪辐射传递模型[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 31-35.
XU H, WANG X J, LIU F, *et al.*. Radiative transfer model of uncooled dispersive imaging spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 31-35. (in Chinese)
- [2] 郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2347-2354.
ZHENG Y Q. Precise spectral calibration for hyperspectral imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2347-2354. (in Chinese)
- [3] 程欣,洪永丰,张葆,等. 插入 Féry 棱镜的小型 Offner 超光谱成像系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1773-1780.
CHENG X, HONG Y F, ZHANG B, *et al.*. Design of compact Offner hyperspectral imaging system with Féry prism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1773-1780. (in Chinese)
- [4] 刘玉娟,巴音贺希格,崔继承,等. 凸面光栅成像光谱仪的干涉法装调[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1736-1742.
LIU Y J, BAYANHESHIG, CUI J CH, *et al.*. Interferometric alignment of imaging spectrometers with convex gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1736-1742. (in Chinese)
- [5] ROBERT L L. Out-of-plane dispersion in an Offner spectrometer [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(7): 073004-1-073004-4.
- [6] 佟亚军,吴刚,周全,等. Offner 成像光谱仪的设计方法[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1148-1152.

作者简介:



张晓龙(1986—),男,山东潍坊人,博士研究生,2009年于青岛科技大学获得学士学位,主要从事红外光学系统设计等方面的研究。E-mail: long1986lucky@163.com

通讯作者:



刘英(1980—),女,山东滨州人,博士,副研究员,2005年于山东师范大学获得学士学位,2010年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事红外光学方面的研究。E-mail: liuy613@163.com

TONG Y J, WU G, ZHOU Q, *et al.*. Design method of Offner-type imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1148-1152. (in Chinese)

- [7] 刘玉娟,崔继承,巴音贺希格,等. 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): 52-57.
LIU Y J, CUI J CH, BAYANHESHIG, *et al.*. Design and application of imaging spectrometers with convex gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 52-57. (in Chinese)
- [8] DAVID W W, DAVID J G, ERIC R K. Dyson spectrometers for high-performance infrared applications [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(10): 103601-1-103601-9.
- [9] JEFFREY L H, RICHARD H B, DAVID J G, *et al.*. First flights of a new airborne thermal infrared imaging spectrometer with high area coverage [J]. *SPIE*, 2011, 8012: 31-37.
- [10] DAVID W W, DAVID J G, JEFFREY L H, *et al.*. Dyson spectrometers for infrared earth remote sensing [J]. *SPIE*, 2008, 7082: 0R-1-0R-8.
- [11] 巴音贺希格. 光谱仪谱线和谐带弯曲现象精确表述方式[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(9): 1524-1529.
BAYANHESHIG. Exact expressions for bend phenomena of spectral line and spectral band of spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(9): 1524-1529. (in Chinese)
- [12] 郝道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006. (in Chinese)

导师简介:



孙强(1971—),男,黑龙江海伦人,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,2006年于中科院长春光机所博士后出站,现为中科院长春光机所光电技术研发中心主任,主要从事现代红外光学仪器、二元光学、红外系统仿真等方面的研究。E-mail: sunq@ciomp. an. cn