文章编号 1004-924X(2015)04-0965-10

中/长波红外双衍射级次共路 Offner 成像光谱仪

张 浩[1,2],方 伟[1*],叶 新[1],姜 明[1],宋宝奇[1]
(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 100049)

摘要:为提高成像光谱仪的工作波长范围,提出了基于双波段焦平面探测器(FPAs)的双衍射级次全共路 Offner 成像光谱仪结构。该结构中凸面光栅的一级衍射光和二级衍射光完全重叠共路传输,并可由焦平面处的双波段红外焦平面探测器 IR FPAs 实现级次的自然分离和同时探测。分析了该结构的工作原理和设计方法,基于几何光线追迹法仿真了谱线弯曲和色畸变特性,基于 Huygens 点扩散函数(PSF)仿真了光谱响应函数(SRF)并导出了光谱带宽。实验显示:双衍射级次共路 Offner 成像光谱仪的工作波段为 3~6 μm(二级衍射)和 6~12 μm(一级衍射),谱线弯曲和色畸变均小于 0.5 个像元宽度,光谱带宽分别为 13.2~14.3 nm(二级衍射)和 28.3~33.3 nm(一级衍射),两个工作波段内的衍射效率均大于或等于 20%。整个系统结构简单紧凑、光谱范围宽,满足对地物或深空目标的中等分辨率的中远红外光谱探测需求。

关 键 词:成像光谱仪;双衍射级次;共光路探测;双波段红外焦平面探测器(IR FPAs)
中图分类号:TH744.1;TP73 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20152304.0965

Dual-order overlapped Offner imaging spectrometer in middle- and long-wave infrared regions

ZHANG Hao[1,2], FANG Wei[1*], YE Xin[1], JIANG Ming[1], SONG Bao-qi[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: fangw@ciomp.ac.cn*

Abstract: An Offner imaging spectrometer based on Infrared Focal Plane Arrays(IR FPAs) operated in two common-path diffraction orders was proposed to extend the spectrometer wavelength coverage. The overlapped rays from the first order and the second order of convex grating could be naturally separated and simultaneously detected by the dual-band IR FPAs on the focal plane. The basic principles and design cautions were discussed in detail. Through geometrical ray tracing, the spectral smile and keystone were evaluated. Based on Huygens Point Spread Function(PSF), the Spectral Response Function (SRF) was also simulated, from which the spectral bandpass was derived as well. The dual-band Offner imaging spectrometer covers the wavelength range of 3 to 6 μm in the second order and 6 to 12 μm in the first order with bandpasses of 13.2—14.3 nm and 28.3—33.3 nm respectively. The

收稿日期:2013-12-23;**修订日期**:2014-01-21.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41227003)

two diffraction orders have the same spectral smile and keystone characteristics by both within half of a pixel width. The grating efficiencies are not lower than 20% over the full wavelength ranges. For its compact construction and wide spectral coverage, the instrument is competent for the measurements of the earth surface or deep space objects in the middle- and long-wave infrared (MWIR/LWIR) regions with moderate resolutions.

Key words: imaging spectrometer; dual-order overlapped; common-path detection; dual-band IR Focal Plane Array(FPA)

1 引　言

太空中星体或尘埃的中/长波红外(Mid Wavelength Infrared/Long Wavelength Infrared,MWIR/LWIR)连续光谱辐射测量是研究恒星和行星等星体形成的重要手段[1-3];而对地红外超光谱遥感成像是地物目标识别的有效方法[4]。1995 年欧洲航空航天局(ESA)发射了用于观测太空中冷目标红外辐射特征的 ISO (Infrared Space Observatory)卫星[5],其上搭载的短波光谱仪(SWS)[6-7]由短波段(Short Wavelength,SW)和长波段(Long Wavelength,LW)两台相对独立的扫描式光栅光谱仪组成,分别与分级滤光片配合、轮换使用前四级和前两级衍射级次,总波长覆盖 2.38～45.2 μm,分辨能力为 1 000～2 000,并可在 LW 的输出端加入扫描式 Fabry-Perot (F-P)标准具,使分辨能力提高至～25 000,此时光栅对 F-P 标准具起了预色散和级次分离的作用。1996 年 Hackwell 等[4]报道了工作于地基或航空平台的 SEBASS (Spatially-Enhanced Array Spectrograph System)上的远红外超光谱成像仪,其入射光由分色器分成两个波段分别进入两个曲面棱镜分光通道,工作波段分别为 2.0～5.2 μm 和7.5～13.8 μm,波长分辨率分别为～0.025 μm 和～0.05 μm。2001 年和 2003 年,两台红外摄谱仪(Infrared Spectrograph,IRS)[8-11]先后随英国航空航天局(NASA)的 SIRTF(Space Infrared Telescope Facility)太空红外望远镜平台[12]和 Spitzer 太空望远镜[13]任务发射升空。IRS 由 SL(具有成像功能),LL,SH 和 LH 4 个独立摄谱仪模块构成,其中 SL 和 LL 模块均利用两个子狭缝及分级滤光片来获取光栅的两个衍射级次的光谱,波长分别覆盖 5.2～14.7 μm 和 14.0～38.0 μm,分辨能力为 64～128;SH 和 LH 模块使用一级衍射平面光栅预色散,然后使用阶梯光栅的 11～20 级级次交叉色散实现了更高的分辨能力(～600),波长分别为 9.9～19.6 μm 和 18.7～37.2 μm。

相对于棱镜,光栅分光方式具有色散线性、分辨能力高等优点[14-15];虽然 F-P 多光束干涉结构和阶梯光栅可实现更高的分辨率,但自由光谱范围太窄,需要预色散或级次分离处理,因此普通光栅在宽波段、中等分辨率的红外摄谱探测方面具有更明显的优势。然而普通闪耀光栅的一级波段仅在约一个倍程波长范围内具有较高的衍射效率,对于多个倍程波长范围的探测,一般要拆分成多个独立光谱仪通道或使用分级滤光片分别探测多级衍射波段,这增加了仪器的体积和复杂性。双闪耀角光栅[16-18]可以扩展有效工作波长范围,但总体衍射效率偏低,并且宽波段、高分辨率的长线色散会增加光学系统的设计难度。2000 年 Levan 等[19-20]率先提出了基于双波段红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Arrays,IR FPAs)[21]和双衍射级次平面光栅的双波段成像光谱仪,并进行了原理样机的研制及应用试验[22-23],该仪器展现了巨大的应用潜力。本文基于 Levan 多波段成像光谱仪的设计思想,深入全面地探索了双波段 IR FPAs 与 Offner 凸面光栅系统相结合的双衍射级次全共路成像光谱仪的设计方法,并对其独特性能进行了分析,给出了仅使用标准球面面型光学元件、工作波段为 3～6 μm(二级衍射)和 6～12 μm(一级衍射)的 MWIR/LWIR Offner 成像光谱仪的设计实例,最后进行了光谱响应函数(Spectral Response Function,SRF)的仿真和光栅参数的优化设计。相对 Levan 的平面光栅,凸面光栅具有更紧凑的结构和更优异的光学性能;因此相对传统的单级次光栅光谱仪,本文提出的光谱仪在保证足够高的衍射效率的前提下,有效解决了光谱范围与光谱分辨率之间的矛盾,而且不会增加光学系统的设计、加工和装调难度。

2　双衍射级次全共路 Offner 成像光谱仪的光学系统设计

2.1　基本原理

光栅方程的一般表达式为：

$$d(\sin\theta+\sin\varphi)=m\lambda,(m=1,2,3\cdots),\quad(1)$$

式中：θ 和 φ 分别为入射角和衍射角，d 为光栅周期，m 为衍射级次，λ 为波长。可以看出，波长为 λ 的一级光衍射方向与波长为 λ/m 的 m 级光衍射方向相同，即它们具有相同的传播路径。对式(1)两端求微分可得光栅的角色散公式为：

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}\lambda}=\frac{m}{d\cos\theta},\quad(2)$$

即 m 级衍射光的角色散率是一级光的 m 倍。闪耀光栅一般使用它们的一级衍射级次，但波长为 $\lambda/2$ 的二级衍射光与波长为 λ 的一级衍射光具有严格重叠的传播路径，且角色散率加倍，这一特征成为一二级衍射全共路探测的出发点。

假定光谱仪的工作波长为 $\lambda_{\min}\leqslant\lambda\leqslant\lambda_{\max}$，根据衍射光谱级次分布的理论模型[24]，如果存在整数 $m(m\geqslant2)$ 满足 $\lambda_{\min}<\lambda_{\max}/m$，则 m 级衍射光谱会重叠在一级光谱的位置，即在一级衍射的 $m\lambda_{\min}\leqslant\lambda\leqslant\lambda_{\max}$ 的波长区域，会叠加 m 级衍射 $\lambda_{\min}\leqslant\lambda\leqslant\lambda_{\max}/m$ 的光谱数据。当光栅使用两个重叠衍射级次且波长范围覆盖两个连续倍程区间时，即选择二级衍射波长 $\lambda_{\min}\leqslant\lambda\leqslant2\lambda_{\min}$ 和一级衍射波长 $2\lambda_{\min}\leqslant\lambda\leqslant4\lambda_{\min}=\lambda_{\max}$，则由前述级次叠加关系式可知，一级衍射工作光谱区只会叠加二级和三级光谱，四级及以上级次光谱偏离出谱面，并且二级衍射光谱刚好与一级衍射光谱完全重叠，三级衍射光谱部分重叠。在传统宽光谱应用中，光栅仅使用一级衍射光谱，而叠加的二级光谱成为严重的杂散光源，必须在探测器的对应区域镀制消二级光谱滤光膜；而双衍射级次则把二级光谱问题变弊为利，杂散光仅剩微弱的三级光谱。不论哪种应用，三级光谱都要依据具体需求来决定是否镀膜消除。

标量理论下刻槽光栅的衍射效率[16]为：

$$D_m=D_{0m}\left\{\frac{\sin\left[\pi\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}-m\right)\right]}{\pi\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}-m\right)}\right\}^2,\quad(3)$$

其中：D_m 和 D_{0m} 分别为第 m 级的相对衍射效率和峰值衍射效率，λ_0 为光栅的一级闪耀波长。标量衍射理论没有具体考虑光栅刻槽的面型、光波的偏振性等因素，因而是一种近似描述方法；矢量衍射理论更精确，但数学表述较复杂。令 $\frac{D_m}{D_{0m}}=0.2$，由式(3)可得衍射效率大于 20% 的二级和一级衍射波长区间分别为 $0.38\lambda_0\sim0.74\lambda_0$ 和 $0.61\lambda_0\sim2.80\lambda_0$。二级衍射区间接近一个倍程波长范围，一级衍射区间则略大于两个倍程波长范围。如果选择二级 $0.38\lambda_0\sim0.76\lambda_0$ 和一级 $0.76\lambda_0\sim1.52\lambda_0$ 两个连续倍程波长范围作为光栅分光系统的工作波段，则这两个波段的衍射光在空间中的分布范围是完全重叠的。假定复色光垂直入射到光栅表面，即 $\theta=0$，则由式(1)和式(3)可得各衍射级次的衍射效率随衍射角的变化关系为：

$$D_m=D_{0m}\left\{\frac{\sin\left[\pi m\left(\frac{\sin\varphi_0}{\sin\varphi}-1\right)\right]}{\pi m\left(\frac{\sin\varphi_0}{\sin\varphi}-1\right)}\right\}^2,\quad(4)$$

其中：φ_0 为一级闪耀波长 λ_0 的衍射角。一级和二级衍射效率随衍射角（正弦值）的变化如图 1 所示。

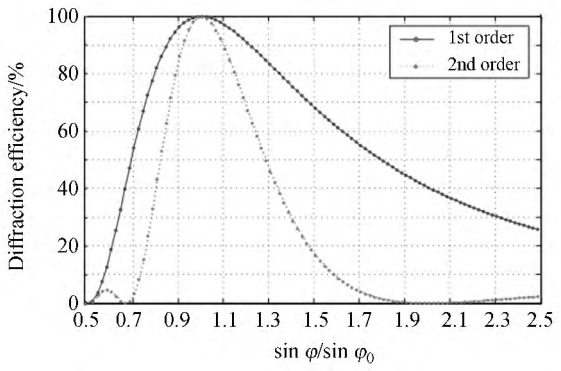


图 1　光栅的一级和二级衍射效率曲线

Fig. 1　Diffraction efficiency curves of 1st and 2nd grating orders

双波段 IR FPAs 探测器由响应两个不同波段的光敏元在探测芯片上纵向叠加而成，等效于在空间完全重叠的、具有不同响应波段的两片探测器，以 HgCdTe 型和量子阱型(QWIP)最为成熟。HgCdTe 型通过改变 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 的组分及生长工艺可以实现能带间隙在 1～30 μm 的调节，并且光谱响应曲线平滑、带通较宽，比较适合

应用于细分光谱探测。已报道的 HgCdTe 型双波段红外焦平面的最大分辨率已达到 1 280×720[25]，像元间距为 20 μm，在 78 K 温度下的截止波长分别为～10.5 μm 和～6.3 μm。当双波段探测器的两个响应波段恰好为 0.38λ_0～0.76λ_0 和 0.76λ_0～1.52λ_0，则可实现光栅两个衍射级次的全共路、同时探测；双波段探测器同时还起到了分级滤光片作用。

双衍射级次全共路 Offner 凸面光栅成像光谱仪使用光栅的一级和二级衍射光，经凸面光栅色散后的一级和二级衍射光在空间重叠，聚焦后两重叠级次的单色像由焦平面上的双波段 FPAs 自然分离并分别接收。为避免衍射级次间的串扰，双波段探测器短波响应波段的长波截止波长不应超出光栅一、二级工作波段的搭接波长(0.76λ_0)、长波响应波段的短波截止波长不能低于搭接波长；但另两端的截止波长均可超出工作光谱范围，此时必须在入射光路中加入相应的截止滤光片。当长波响应波段的长波截止波长超出一级衍射工作波段的长波限(1.52λ_0)时，延伸探测器长度，并在对应的探测器表面镀制 1.52λ_0 的短波截止滤光膜，也可实现对更长一级衍射波长的探测。

2.2 光学设计指标

3～5 μm 和 8～12 μm 为大气的两个红外透射窗口，选择光栅的二级和一级的倍程工作波段分别为 3～6 μm 和 6～12 μm，恰好可以覆盖以上两个红外窗口，因此非常适合作为地基天文望远镜后端或航空对地遥感平台上的高光谱分析仪器的工作波段，可直接进行太空或地面目标探测。

双波段面阵光电探测器的定型产品较少，大多需要定制。考虑到成本因素，选用 78 K 制冷型 HgCdTe IR FPA，它具有 320(空间维)×256(光谱维)像素，30 μm 像元间距，响应波段分别为 3～6 μm 和 6～12 μm。Offner 凸面光栅光谱成像系统的入射狭缝尺寸为 9.6 mm×30 μm，与探测器空间维像素行 1∶1 匹配；光谱采样间隔为一倍光谱带宽(Full Width Half Maximum，FWHM)。由光谱范围和光谱通道数估算出单像素的光谱带宽约为 12 nm(二级)和 24 nm(一级)，理论分辨能力 $\lambda/\Delta\lambda$ 达到 250～500。在中远红外波段，此分辨率满足对固态、液态及大部分多原子气体及蒸汽等目标的光谱特征探测[4,26]。为提高集光本领和衍射极限分辨率，数值孔径越大越有利，但像差校正难度也随之增大，故权衡选择数值孔径 NA 为 0.2。主要设计指标如表 1 所示。

表 1　双波段成像光谱仪光学系统主要技术指标

Tab. 1　Specifications of dual-band imaging spectrometer

参数		值	
		中波红外(二级衍射)	长波红外(一级衍射)
光谱/μm		3～6	6～12
光谱通道数		256	256
光谱带宽(FWHM)/nm		12	24
物方数值孔径 NA		0.2	0.2
入射狭缝尺寸 /(mm×μm)		9.6×30	9.6×30
探测器	感光元材料	HgCdTe	HgCdTe
	光谱/μm	3～6	6～12
	分辨率	320×256	320×256
	像素尺寸 /(μm×μm)	30×30	30×30
	工作温度/K	78	78

2.3 光学系统设计及结果分析

Offner 凸面光栅光谱成像系统[27-28]演变自反射式 Offner 中继光学系统[29-30]。Offner 中继光学系统为同心光学系统，具有旋转对称性，且对称轴通过所有光学表面的共同曲率中心，因此横向像差如彗差、畸变、子午场曲等自动消除。如果还满足物方和像方远心，即把 Offner 中继光学系统的孔径光阑设置在凸面反射镜上，且位于凹面反射镜的焦点上，则场曲亦可校正[31]。由于 Offner 凸面光栅光谱成像系统需将宽波段光同时成像在不同像方视场上，光路结构打破了同心对称性，因此需要在全波段重新平衡像差。单衍射级次 Offner 光谱成像结构的设计方法主要有解析法[28,32,33]、专用设计软件的数值优化方法[34-36]等。考虑到光栅一级衍射和二级衍射光路的重叠特征，双衍射级次的 Offner 光谱成像系统仅对第一级衍射波段进行主动设计。选择 RMS 波前差作为优化函数，优化时控制放大倍率和线色散量，获得的光学系统的最终结构参数如表 2 所示，光路结构如图 2 所示。系统所采用的反射镜及凸面光栅均为球面面型，利于加工和装调；凸面光栅刻线周期为 50 μm。

表 2　双波段成像光谱仪的结构参数

Tab. 2　Specifications of dual-band imaging spectrometer

表面	曲率半径/mm	厚度/mm	面型	Y 方向离心/mm	绕 X 轴倾斜/(°)
Object	——	143.04	——	−30.00	0
1	−143.95	−78.30	mirror	0	0
Stop	−61.65	47.34	grating	−1.30	0
3	−110.82	−117.75	mirror	0	0
Image	——	——	——	0	−1.51

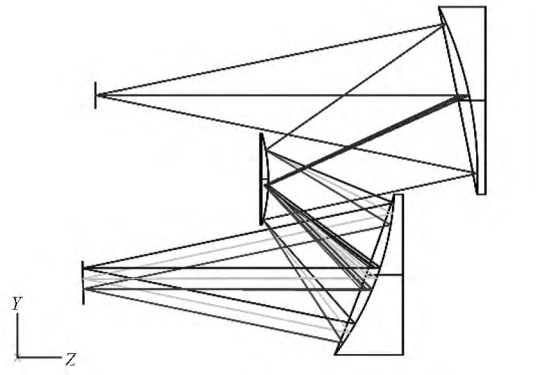
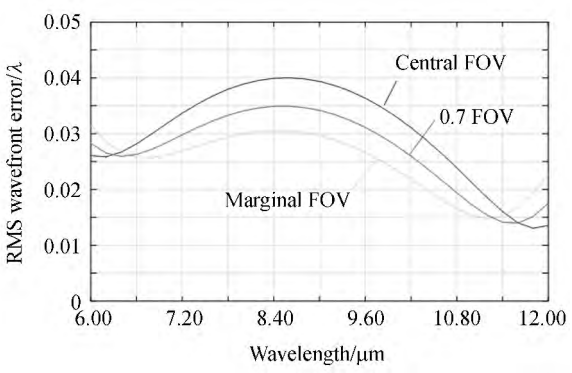


图 2　双波段成像光谱仪的光路图

Fig. 2　Optical layout of dual-band imaging spectrometer

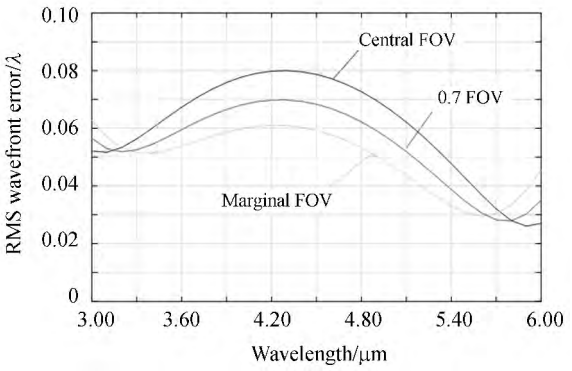
在相同的光学结构参数下，一级衍射波段(LWIR)及二级衍射波段(MWIR)的 RMS 波前差如图 3 所示。实际上两个波段的波前差曲线形状完全相同，但由于使用波长为衡量单位，二级衍射波长的波前差刚好是一级衍射波长的二倍。一级衍射的最大 RMS 波前差为 0.04，出现在中心视场的 8.6 μm 波长处；二级衍射的最大 RMS 值为 0.08，出现在中心视场的 4.3 μm 波长处。依据马雷夏尔判据[37]，当波前差 RMS<λ/14 时，斯特列耳比>0.8，此时光学系统成像质量良好；由图 3 曲线可以看出全系统的成像质量已基本达到衍射极限水平。图 4 为两个衍射波段的点列图，弥散斑基本被衍射限下的艾里圆环包围，具有较好的能量汇集能力。

图 5 为全视场调制传递函数(Modulation Transfer Fuction，MTF)曲线，两个波段的 MTF 曲线接近衍射极限，一级衍射全波段在特征截止频率 16.7 lp/mm 处的 MTF 值均高于 0.39，二级衍射全波段 MTF 均大于 0.62。在设计过程中并没有专门针对二级波长进行特殊优化，但因全波段成像质量接近衍射极限，且二级波段波长更短，衍射效应更弱，因此获得了更高的 MTF 特性曲线。



(a)一级衍射波段

(a) In 1st order



(b)二级衍射波段

(b) In 2nd order

图 3　RMS 波前差曲线

Fig. 3　RMS wavefront errors

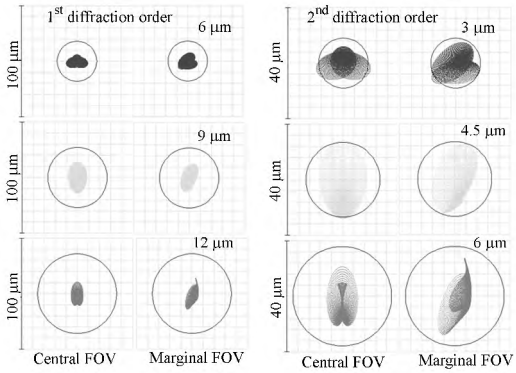
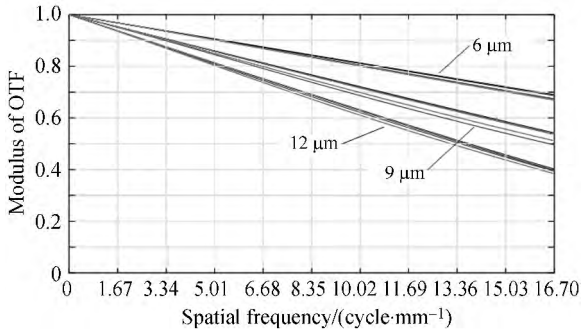


图 4　两级衍射波段的点列图

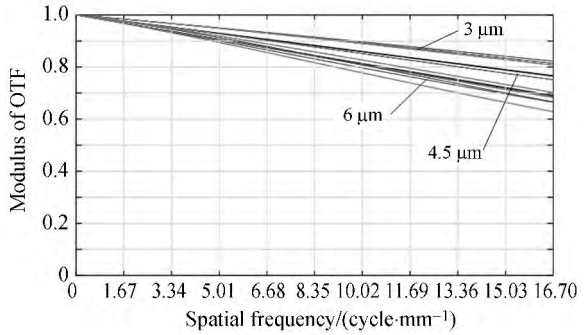
Fig. 4　Spot diagrams in both orders

图 6 为一级衍射波段的场曲和畸变特性曲线，二级衍射波段具有完全相同的结果，这里不再单独分析。不同波长的子午场曲曲线比较靠近，



(a)一级衍射波段

(a)In 1st order



(b)二级衍射波段

(b)In 2nd order

图 5　全视场 MTF 曲线

Fig. 5　MTF curves of cross full field of view

而弧矢场曲曲线离散较大，但最大值不超过 60 μm；最大相对畸变值为－0.015%，畸变微弱。这与同心光学系统像差特性的分析结果较为吻合。以主光线与像面交点位置近似代替像点位置进行光线追迹，获得了成像光谱图的谱线弯曲/色畸变网格，如图 7 所示。其中，横向曲线代表同一波长对平行于入射狭缝方向（X 轴方向）的一条直线所成的几何像，其沿 Y 方向的最大偏差即为此波长的谱线弯曲值；纵向曲线代表不同波长对同一视场点所成的光谱像，其沿 X 轴方向的最大偏差即为对此视场点的色畸变值。数值计算结果显示：波长为 6 μm 时谱线弯曲最大，为 4.1 μm，相当于像元宽度的 13.6%；波长为 12 μm 时谱线弯曲最小，为 3.0 μm，相当于像元宽度的 10.0%；在最大视场时色畸变最大为 13.0 μm，相当于像元宽度的 43.3%；零视场时没有色畸变。谱线弯曲和色畸变的最大值均在半个像元宽度内，对于一般精度的应用需求，可认为系统在空间和光谱方向均线性成像，即仅需对两坐标轴上的像素行或列进行空间几何或波长定标就可特征化光学系统；但对于高精度应用场合，还需完善轴外像素行和列的精细定标与校正。二级衍射波段具有完全相同的谱线弯曲和色畸变网格，但对应的波长坐标值减半。相对于使用两片独立面阵探测器的系统结构，探测器会不可避免地存在旋转、倾斜、平移等装调误差，甚至两个波段间因光路结构不同而产生完全不同的谱线弯曲和色畸变特性，因此会大大增加数据融合等后期处理的复杂程度，而双波段全共路探测方法则完全避免了这类问题。

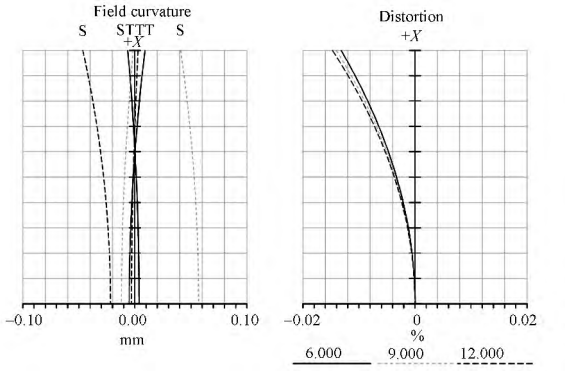


图 6　场曲和畸变图

Fig. 6　Field curvature and distortion

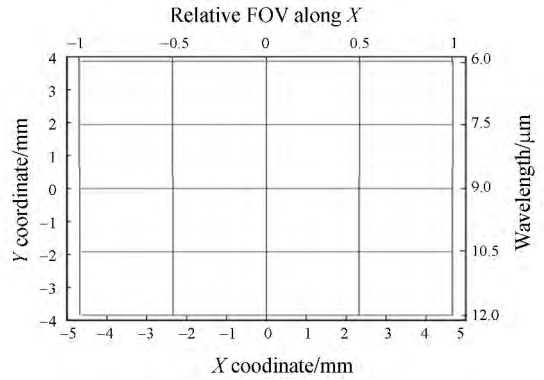


图 7　谱线弯曲和色畸变网格

Fig. 7　Grids of smile and keystone

因全系统在最长波长 12 μm 处的 MTF 曲线最低，因此选择 12 μm 波长的 RMS 波前差进行光学系统的公差分析。使用逆灵敏度法将 12 μm 波长的波前差上限设置为 0.072，即满足马雷夏尔判据，再使用后焦距和像面倾斜补偿像差。结果显示：最敏感的独立公差项为两反射镜的 X 倾

斜和 Y 倾斜，但容差限均高于 0.05°；而 0.1 mm 的表面离心和厚度调整量、2 个光圈的表面曲率、0.2 个光圈的局部面型不规则度等公差限对 RMS 波前差的影响均没有达到 0.072。收紧倾斜公差为 0.02°后进行蒙特卡洛分析，共计算了 20 个样本，结果显示 90% 的系统 RMS 波前差小于 0.080。选取 RMS 波前差为 0.079 的样本查看，截止频率处的 MTF 下降至 0.32，对后级电子学系统来说具有足够的余量，因此光学系统的倾斜、距离、面型等公差整体上是比较宽松的。

3　性能仿真分析

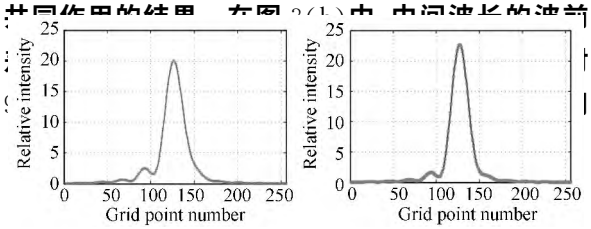
3.1　光谱响应函数(SRF)/光谱带宽仿真

光谱仪器(包含成像光谱仪)的探测单元(狭缝或光电探测器像元)对单位强度单色光辐射的响应随波长的变化称为此探测单元的 SRF[34,38-40]，也可作为此探测单元的等效光谱透光率函数。光谱仪器每一个位置的出射狭缝或光电探测器的每个像元均有对应的 SRF。对满足线性空不变条件的光学系统，其 SRF 为：

$$SRF(y)=\left[rect\left(\frac{y}{a}\right)*T_{\mathrm{LSF}}(y)\right]*rect\left(\frac{y}{b}\right),\quad(5)$$

式中：$*$ 代表卷积；两个矩形函数分别代表物(入射狭缝)函数和探测器像元(出射狭缝)的响应函数，取入射狭缝和探测器像元宽度分别为 a 和 b；y 为像面坐标；$T_{\mathrm{LSF}}(y)$ 为色散方向(子午方向)的线扩散函数。由色散关系可以确立波长 λ 与像面坐标 y 之间的互映射关系，代入式(5)将 SRF 变换成关于波长 λ 的函数。如果忽略所有的几何像差和衍射因素，即认为 $T_{\mathrm{LSF}}(y)$ 为理想狄拉克函数时，则 SRF 为梯形函数；此时 SRF 的 FWHM 由单色狭缝像和出射狭缝两者中宽度大的一方决定，由色散关系可换算成波长宽度即光谱带宽。假如系统为线性色散，则光谱带宽可表示为 $\max(a/(\alpha\beta),\ b/\alpha)$，其中 α 为色散系统的线色散率，β 为入射狭缝的几何放大倍率。对于 $T_{\mathrm{LSF}}(y)$ 值可与像素尺寸相比拟的实际光学系统，SRF 则接近于高斯型。另一方面，当探测器像元无限小，即认为 $\mathrm{rect}\left(\frac{y}{b}\right)$ 为狄拉克函数时，SRF 退化为入射狭缝的单色像表达式，此时单色像的 FWHM 宽度被认为是瑞利判据中的分辨率。如果也忽略像差和衍射因素，则单色像为几何宽度等于 a/β 的矩形，波长宽度即分辨率可认为是 $a/(\alpha\beta)$，与光谱带宽一致。但现代光电光谱仪基本以像元尺寸与单色像宽度相当的阵列光电探测器代替了传统的具有精细感光颗粒的胶片，因此基于单色像轮廓的光谱分辨率参数较难精确测出；而 SRF 不仅适用于单色仪式和摄谱仪式光电光谱仪，还具有多种测量方法[39,41]。此外，光谱带宽与连续光谱的谱密度曲线计算相关，因此相对来说，SRF 更具普遍意义。

本文使用计算机对 SRF 进行仿真分析。对于线性空不变光学系统，二维点扩散函数(PSF)对 x 坐标积分可获得线扩散函数 $T_{\mathrm{LSF}}(y)$。本文使用 Huygens PSF 计算 $T_{\mathrm{LSF}}(y)$，比快速傅里叶(FFT)PSF 具有更高的灵活性和通用性[42]。图 8 为此方法计算得到的 4.5 μm(二级衍射)和 9 μm(一级衍射)两个波长处的 LSF 曲线，可以较明显地看出衍射引起的次极大突起。图 9 为基于公式(5)仿真得到的 4.5 μm 和 9 μm 两个中心波长处的 SRF 曲线，由于本成像光谱系统无缩放比，且像元宽度与入射狭缝宽度相同，因此 SRF 曲线接近三角函数，但因像差和衍射作用，曲线的拐角处比较平滑。图 10 为两个衍射波段的光谱带宽曲线。在两个衍射波段内，光谱带宽均随波长变化；一级衍射波段的光谱带宽为 28.3～33.3 nm，且随波长线性增长，这是衍射效应占主导作用的明显表现；二级衍射波段的光谱带宽为 13.2～14.3 nm，但变化规律不单调，是几何像差和衍射效应共同作用的结果。在图 2(b)中，中间波长的波前

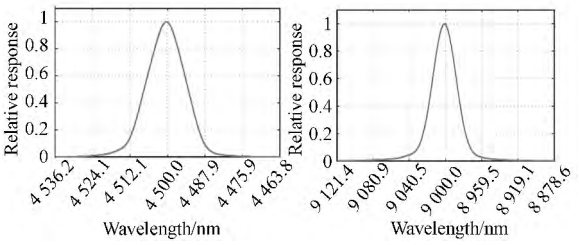


(a)二级波段 4.5 μm 波长　(b)一级波段 9 μm 波长
(采样网格点间距为 0.5 μm)(采样网格点间距为 1 μm)
(a) At 4.5 μm in 2nd order　(b) At 9 μm in 1st order
(Grid point interval is 0.5 μm)　(Grid point interval is 1.0 μm)

图 8　单色光的 LSF

Fig. 8　Monochromatic Linear Spread Functions(LSF)

更显著。两个衍射波段的光谱带宽均大于基于线性色散率的估算值，表明光学系统像差和衍射效应对 SRF 曲线的弥散和光谱带宽值的加宽具有不可忽略的影响；尤其对于红外光谱系统，必须通过仿真或实验方法对光谱带宽进行更精确的评估。

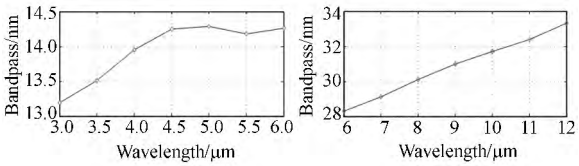


(a) 二级波段中心波长 4.5 μm　(b) 一级波段中心波长 9 μm

(a) At central wavelength of 4.5 μm in 2nd order　(b) At central wavelength of 9 μm in 1st order

图 9　SRF 曲线

Fig. 9　SRF curves



(a)二级衍射波段　(b)一级衍射波段

(a) At wavelengths in 2nd order　(b) At wavelengths in 1st order

图 10　光谱带宽曲线

Fig. 10　Spectral bandpass curves

3.2　光栅衍射效率分析

光栅的衍射效率由光栅的槽型微结构决定[16,43]。在设计光学系统时，依据光栅方程将光栅简化成偏折光线的几何光学元件，并仅从光栅的像差理论方面对光栅的基底面型、光栅周期、入射/衍射角等参数进行了评估与优化；而光栅的衍射效率即槽型微结构还需额外设计。本文使用 PCGrate 软件进行光栅衍射效率的设计；光栅刻线周期(50 μm)、入射光束特性、光栅基底面型等均已在光学系统设计中决定；光栅槽型选择锯齿形，相比矩形、正弦形槽型，衍射效率更高[44]。因此，仅需优化光栅闪耀角，即可获得在两个衍射级次内整体兼顾的衍射效率曲线。PCGrate 软件采用矢量衍射理论中的积分法，即通过精确计算改良边界积分方程(MIM)获得多层浮雕和位相光栅等周期性微结构从 X-ray 波段到米波段的各衍射级次的衍射效率。图 11 为本文所使用的闪耀角等于 5°的锯齿槽凸面闪耀光栅的一、二级衍射效率曲线。凸面光栅在 3～6 μm(二级衍射)和 6～12 μm(一级衍射)内的 TE 偏振波和 TM 偏振波的平均衍射效率均大于≥20%；当波长在 3.3～5.4 μm 和 6～12 μm 时，两偏振模态的平均衍射效率均大于 40%。同时可以看出，一级衍射的长波端偏振灵敏性越来越突出，而二级衍射全波段内的偏振灵敏性始终较微弱，这大大有助于抑制仪器的偏振灵敏度。

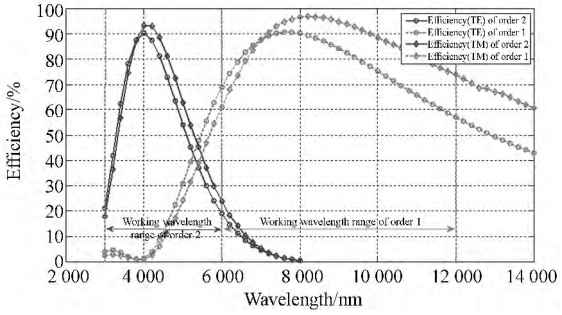


图 11　凸面光栅衍射效率曲线

Fig. 11　Diffraction efficiency of convex grating

4　结　论

本文提出了 Offner 色散结构加双波段焦平面探测器的超光谱成像结构，可实现光栅的两个衍射级次的完全共路探测。首先对该光谱仪的基本原理和独特性能进行了充分探讨，设计了工作波段为 3～6 μm(二级衍射)和 6～12 μm(一级衍射)的双衍射级次全共路 Offner 成像光谱仪实例，两个波段的 MTF 曲线均接近衍射极限，在特征截止频率处分别高于 0.62(二级衍射)和 0.39(一级衍射)。然后仿真计算了 SRF，导出了光谱带宽分别为 13.2～14.3 nm(二级衍射)和 28.3～33.3 nm(一级衍射)。最后进行了光栅参数设计，两个工作波段内的衍射效率均大于 20%。中/长波红外双波段 Offner 成像光谱仪具有结构紧凑、光谱范围宽、衍射效率高、杂散光和偏振灵敏度低、两个衍射级次的几何像差完全相同等鲜明特点，是传统光谱成像结构与新型焦平面探测器技术相结合的创新应用，具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] MERRILL K, STEIN W. 2-14 μm stellar spectrophotometry I. stars of the conventional spectral sequence [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1976, 88:285-293.

[2] SMITH J, DRAINE B, DALE D, *et al*.. The mid-infrared spectrum of star-forming galaxies: global properties of polycyclic aromatic hydrocarbon emission[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, 656(2): 770.

[3] HANNER M S, HACKWELL J A, RUSSELL R W, *et al*.. Silicate emission feature in the spectrum of comet Mueller 1993a[J]. *Icarus*, 1994, 112(2): 490-495.

[4] HACKWELL J A, WARREN D W, BONGIOVI R P, *et al*.. LWIR/MWIR imaging hyperspectral sensor for airborne and ground-based remote sensing [J]. *SPIE*, 1996, 2819: 102-107.

[5] KESSLER M, STEINZ J, ANDEREGG M, *et al*.. The Infrared Space Observatory (ISO) mission[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1996, 315: L27-L31.

[6] DE GRAAUW T, HASER L, BEINTEMA D, *et al*.. Observing with the ISO short-wavelength spectrometer[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1996, 315: L49-L54.

[7] BEINTEMA D A, DE GRAAUW M W, LUINGE W, *et al*.. Design and measured performance of the ISO short wavelength spectrometer [J]. *SPIE* 1993, 1946: 293-301.

[8] HOUCK J, ROELLIG T, VAN CLEVE J, *et al*.. IRS: the spectrograph on SIRTF: its fabrication and testing[J]. *SPIE*, 2000, 4131: 370-377.

[9] HOUCK J R, ROELLIG T L, VAN CLEVE J, *et al*.. The infrared spectrograph (IRS) on the spitzer space telescope [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2004, 154(1): 18-24.

[10] HOUCK J, VAN CLEVE J, BRANDL B, *et al*.. IRS: the infrared spectrograph on SIRTF [C]. *Proceedings of the Conference "ISO beyond the Peaks", Villafranca del Castillo, Spain: ESA*, 2000:1-3.

[11] HOUCK J R, VAN CLEVE J E. IRS: an infrared spectrograph for SIRTF[J]. *SPIE*, 1995, 2475: 456-463.

[12] FANSON J L, FAZIO G G, HOUCK J R, *et al*.. Space infrared telescope facility (SIRTF) [J]. *SPIE*, 1998, 3356: 478-491.

[13] WERNER M, ROELLIG T, LOW F, *et al*.. Spitzer space telescope mission[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2004, 154(1): 1-22.

[14] **安岩，孙强，刘英，等. 交叉型消像散** Czerny-Turner **结构光谱仪设计**[J]. **中国光学**, 2012, 5(5): 470-475.
AN Y, SUN Q, LIU Y, *et al*.. Design of astigmatism-free crossed Czerny-Turner spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5): 470-475. (in Chinese)

[15] **张晶，王淑荣，黄煜，等. 临边成像光谱仪的发展现状与进展**[J]. **中国光学**, 2013, 6(5): 692-700.
ZHANG J, WANG SH R, HUANG Y, *et al*.. Status and development of limb imaging spectrometers[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 692-700. (in Chinese)

[16] MOUROULIS P, WILSON D W, MAKER P D, *et al*.. Convex grating types for concentric imaging spectrometers [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(31):7200-7208.

[17] GREEN R, PIETERS C, MOUROULIS P, *et al*.. The Moon Mineralogy Mapper (M3) imaging spectrometer for lunar science: instrument description, calibration, on-orbit measurements, science data calibration and on-orbit validation[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991-2012), 2011, 116(E00G19):1-31.

[18] MOUROULIS P, SELLAR R G, WILSON D W, *et al*.. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(6): 063001.

[19] LEVAN P D. Multi-octave spectroscopy with multi-waveband infrared focal plane array: U S, 6, 104, 488 [P]. 2000.

[20] LEVAN P D, JEPSON D M. 3.5-to 12-μm dual-band spectrometer [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(12): 3045-3054.

[21] ROGALSKI A, ANTOSZEWSKI J, FARAONE L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(9): 091101-091144.

[22] BEECKEN B P, LEVAN P D, TODT B D. Demonstration of a dual-band IR imaging spectrometer [J]. *SPIE*, 2007, 6660: 666004.

[23] LEVAN P D, BEECKEN B P, LINDH C. Dual-band infrared imaging spectrometer: observations of the moon[J]. *SPIE*, 2008, 7055: 705507.

[24] **刘康. 微型光谱仪关键技术及其应用研究**[D]. **杭州：浙江大学**, 2013.
LIU K. *Research on the key technology of the miniature spectrometer and its application system* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)

[25] KING D, RADFORD W, PATTEN E, *et al*.. 3rd generation 1280×720 FPA development status at Raytheon vision systems[J]. *SPIE*, 2006, 6206: 62060W-62015.

[26] CLEGG P, ADE P, ARMAND C, *et al*.. The

ISO long-wavelength spectrometer[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1996, 315: L38-L42.

[27] KWO D, LAWRENCE G, CHRISP M. Design of a grating spectrometer from a 1∶1 Offner mirror system[J]. *SPIE*, 1987, 818: 275-281.

[28] CHRISP M P. Convex diffraction grating imaging spectrometer: US, 5,880,834[P]. 1999.

[29] OFFNER A. Unit power imaging catoptric: US, 3, 748,015[P]. 1973.

[30] OFFNER A. New concepts in projection mask aligners[J]. *Optical Engineering*, 1975, 14(2): 130-132.

[31] LOBB D R. Theory of concentric designs for grating spectrometers[J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(13): 2648-2658.

[32] PRIETO-BLANCO X, MONTERO-ORILLE C, COUCE B, *et al*.. Analytical design of an Offner imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9156-9168.

[33] **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(4): 1148-1152.
TONG Y J, WU G, ZHOU Q, *et al*.. Design method of Offner-type imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010(4): 1148-1152. (in Chinese)

[34] MOUROULIS P, GREEN R O, CHRIEN T G. Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic and spatial information[J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(13): 2210-2220.

[35] MOUROULIS P, MCKERNS M M. Pushbroom imaging spectrometer with high spectroscopic data fidelity: experimental demonstration[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(3): 808-816.

[36] **郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计**[J]. **光学 精密工程**, 2009, 17(11): 2629-2637.
ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2629-2637. (in Chinese)

[37] **侯静, 姜文汉. 偏差与斯特列耳比的极限曲线**[J]. **光学学报**, 2001, 21(9): 1065-1067.
HOU J, JIANG W H. Ultimate curves of aberration and Strehl ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(9): 1065-1067. (in Chinese)

[38] **张浩, 方伟, 叶新, 等. 宽光谱棱镜型太阳光谱仪设计**[J]. **光学学报**, 2013(2): 178-186.
ZHANG H, FANG W, YE X, *et al*.. Design of prism spectrometer with wide spectral coverage for solar spectrum measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013(2): 178-186. (in Chinese)

[39] **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)

[40] KUNZE H J. *Introduction to Plasma Spectroscopy*[M]. Heidelberg: Springer, 2009.

[41] HARDER J, THUILLIER G, RICHARD E, *et al*.. The SORCE SIM solar spectrum: comparison with recent observations[J]. *Solar Physics*, 2010, 263(1): 3-24.

[42] ZEMAX Development Corporation. *ZEMAX Optical Design Program User's Guide*[M]. Washington DC: ZEMAX Development Corporation, 2009.

[43] **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 spectrometer with covex grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 52-57. (in Chinese)

[44] **汪海滨. 凸面闪耀光栅的设计及其制作**[D]. **苏州: 苏州大学**, 2010.
WANG H B. *The design and fabrication of convex blazed grating*[D]. Suzhou: Soochow University, 2010. (in Chinese)

作者简介:



张　浩(1988－), **男, 山东枣庄人, 博士研究生**, 2009 **年于青岛科技大学获得学士学位, 主要从事空间太阳光谱辐照度测量仪器设计与定标方面的研究。**
E-mail: zhanghao_jngz@126.com

导师简介:



方　伟(1965－), **女, 辽宁朝阳人, 博士, 研究员, 博士生导师**, 1987 **年于山东大学获得学士学位**, 1997 **年、**2005 **年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位, 主要从事辐射计量及空间光学遥感仪器的研究。**E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

(版权所有　未经许可　不得转载)