

## 基于分区光栅的可见-红外光谱成像系统的衍射杂散光分析及抑制方法

陈新华<sup>1,2\*</sup>, 李碧岑<sup>3</sup>, 朱嘉诚<sup>1,2</sup>, 赵知诚<sup>1,2</sup>, 沈为民<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>苏州大学光电科学与工程学院教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

<sup>2</sup>苏州大学光电科学与工程学院江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

<sup>3</sup>北京空间机电研究所, 北京 100190

**摘要** 光谱成像系统采用分区光栅作为分光元件,能够实现光学元件的复用,具有工作波段宽、光谱分辨率高和结构紧凑等优点。然而,该系统的孔径光阑位于分区光栅处,宽波段光束同时入射至各通道光栅区域上,不同频率光栅的多级衍射光会导致不同通道之间产生干扰,其难以被消叠级滤光片去除。该问题严重影响有效光谱信号的提取和分析,甚至淹没有效目标信号。通过光线追迹确定系统中衍射杂散光的来源,并根据分析模型计算衍射杂散光系数。根据光学系统的结构特点,提出采用线性渐变滤光片和光阑镀膜两种衍射杂散光的抑制方法,并分析了滤光片带宽要求以及光阑镀膜对衍射杂散光系数的改善效果。分析结果表明,光阑镀膜方法能够将系统的衍射杂散光系数降至 0.57%。相较于线性渐变滤光片方法,光阑镀膜方法易于实现,适用于基于分光光栅的光谱成像光学系统的衍射杂散光的抑制。

**关键词** 光学设计; 光谱成像仪; 分区光栅; 衍射杂散光; 光阑

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1822003

## Diffraction Stray Light Analysis and Elimination of VIS-IR Imaging Spectrometer Based on Multi-Zone Grating

Chen Xinhua<sup>1,2\*</sup>, Li Bicen<sup>3</sup>, Zhu Jiacheng<sup>1,2</sup>, Zhao Zhicheng<sup>1,2</sup>, Shen Weimin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

<sup>2</sup>Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

<sup>3</sup>Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China

**Abstract** The imaging spectrometer, which uses a multi-zone grating as the dispersing element, can realize the sharing of optical elements. It has the advantages of wide wavelength band, high spectral resolution, and compact structure. However, the stop of this system is located at the multi-zone grating and the broadband beam is incident on the whole grating area of each channel at the same time. The multi-order diffraction of the gratings with different frequencies will cause interference among different channels, and thus it is difficult to be removed by the order-sorting filter. This problem seriously influences the extraction and analysis of the effective spectral signals, and even overwhelms the effective target signals. This paper uses ray tracing to determine the source of multi-order diffraction stray light in the system, and calculates the diffraction stray light coefficient with the analysis model. According to the structure of the optical system, two methods for suppressing the multi-order diffraction stray light using the linear variable filter and the stop coating are proposed, and the bandwidth requirement of the filter and the

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-03-31; 录用日期: 2021-04-12

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500501-02)、江苏高校优势学科建设工程(PAPD)资助项目

通信作者: \*xinhua\_chen@suda.edu.cn

improvement effect of diffraction stray light coefficients using the stop coating are analyzed. The analysis results show that the stop coating method can reduce the diffraction stray light coefficient to 0.57%. Compared with the linear variable filter method, the stop coating method is easier to implement, and is more preferred for the suppression of multi-order diffracted stray light in the imaging spectrometer with multi-zone grating.

**Key words** optical design; imaging spectrometer; multi-zone grating; diffraction stray light; stop

**OCIS codes** 220.4830; 330.6100; 080.2740

## 1 引言

光谱成像仪具有“图谱合一”的优点,是行星探测和小行星探测等深空探测任务中的必备光学载荷之一<sup>[1-5]</sup>。深空探测任务的特点要求光谱成像仪具有工作波段宽、光谱分辨率高以及体积小等特点,这给光谱成像仪光学系统的设计和研制带来了挑战。为了满足这些要求,Reininger 等<sup>[6]</sup>提出分区光栅方案,将可见近红外通道和红外通道光学元件进行复用,实现了宽工作波段、高光谱分辨率的紧凑结构。VIRTIS-M (Visual IR Thermal Imaging Spectrometer-Mapping channel)光谱成像仪最先采用了该方案,并先后搭载于 2000 年发射的“罗塞塔号”、2005 年发射的“金星快车”以及 2007 年发射的小行星带探测器“黎明号”等深空探测器<sup>[6-8]</sup>。VIRTIS-M 中的分区光栅包含两个具有不同光栅周期的区域,这两个区域分别工作于 0.4~1.0  $\mu\text{m}$  的可见近红外波段(VNIR)和 1~5  $\mu\text{m}$  的红外波段(IR)。在分区光栅光谱成像系统中,孔径光阑位于分区光栅处,入射的宽波段光束会同时入射至可见近红外通道光栅区域和红外通道光栅区域,这会导致不同通道之间产生干扰,即可见近红外光经红外通道光栅后的衍射光以及红外光经可见近红外通道光栅区域后的衍射光都有可能叠加在相应的工作谱面上,从而影响有效光谱信号的提取和分析,甚至淹没有效目标信号<sup>[9]</sup>。

本文首先介绍了基于分区光栅的光谱成像光学

系统的设计结果;然后根据光学设计结果,建立了分析模型,分析了系统中的衍射杂散光来源和衍射杂散光系数;根据光学系统的结构特点,提出采用线性渐变滤光片和光阑镀膜两种衍射杂散光的抑制方法,并进行了分析;最后进行了讨论和总结。

## 2 基于分区光栅的光学设计结果

根据任务需求,基于分区光栅的光谱成像光学系统的主要技术指标要求如表 1 所示。该系统的工作波段为 0.4~5.0  $\mu\text{m}$ ,其可见近红外通道(0.4~1.0  $\mu\text{m}$ )和红外通道(1.0~5.0  $\mu\text{m}$ )的  $F$  数分别为 6 和 3。两个通道的光谱分辨率分别为 3.6 nm 和 9.6 nm。系统的狭缝长度为 10 mm,系统要求的谱线弯曲和色畸变均小于 10%的像元尺寸<sup>[10]</sup>。

表 1 系统的主要参数

Table 1 Main parameters of system

Parameter	Value	
	VNIR	IR
Spectral range /nm	400–1000	1000–5000
Spectral resolution /nm	3.6	9.6
$F$	6	3
Slit length /mm	10	

根据指标参数,计算初始结构参数,并进行优化设计,最终光学系统光路如图 1 所示。图 1 中 PM 为主镜, TM 为三镜, G 为凸面分区光栅, DBS 为二向色性滤光片, SLIT 为狭缝, VNIR-OSF 和 IR-OSF 为可见近红外通道和红外通道的消叠级滤光片, VNIR-IMP 和 IR-IMP 为可见近红外通道和红

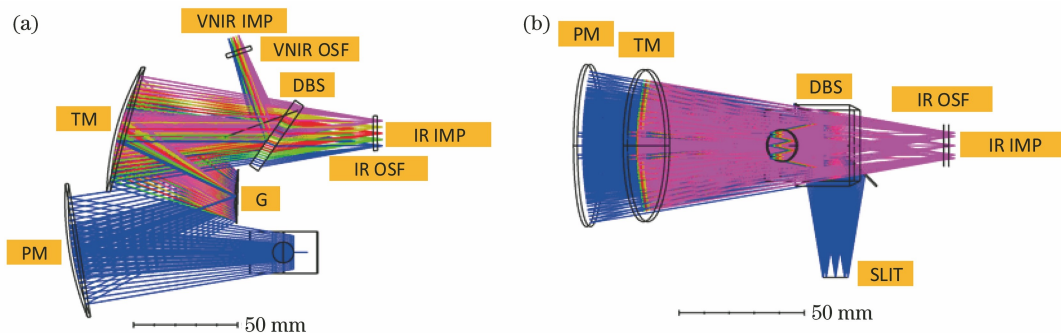


图 1 可见-红外成像光谱仪的光路图。(a)主视图;(b)俯视图

Fig. 1 Optical layouts of VIS-IR imaging spectrometer. (a) Front view; (b) side view

外通道的像面。二向色性滤光片用于分离可见近红外波段和红外波段的光束。

所用的凸面分区光栅如图 2 所示,包括两个区域:中心圆形区域为可见近红外通道光栅,具有较高的槽密度,而外部环形区域为红外通道光栅,槽密度较低。经过优化设计,两个通道光栅在不同级次下的衍射效率曲线如图 3 所示。图 3(a)为可见近红外通道光栅的-1 级、-2 级和-3 级的衍射效率曲线,其中-1 级为工作级次;图 3(b)为红外通道光栅的-1 至-5 级的衍射效率,其中-1 级为工作级次。

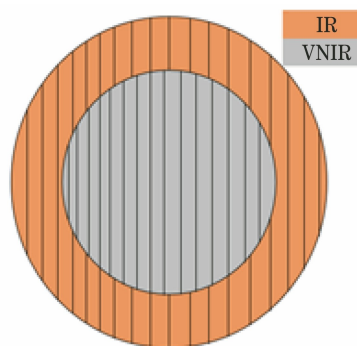


图 2 分区衍射光栅的示意图

Fig. 2 Schematic of multi-zone grating

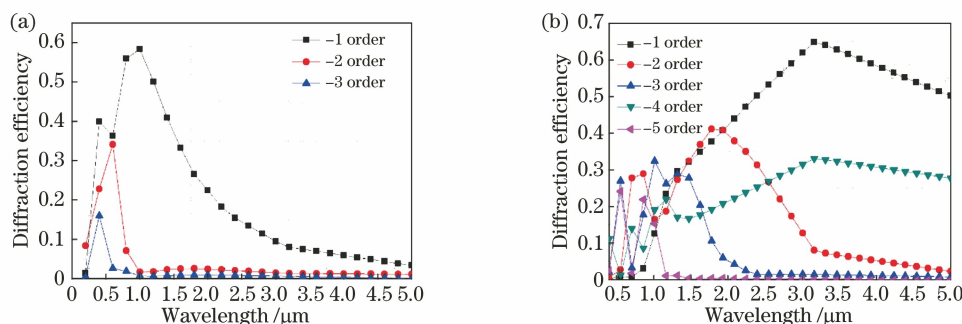


图 3 分区光栅的衍射效率曲线。(a)可见近红外光栅;(b)红外光栅

Fig. 3 Diffraction efficiency of multi-zone grating. (a) VIS-NIR grating; (b) IR grating

### 3 分析模型

根据光学设计结果,在光学软件 LightTools 中建立分析模型,如图 4 所示。在模型中,反射镜的反射率取 98%,吸收率取 2%;机械表面吸收率取 90%,散射率取 8%,反射率取 2%;探测器光敏面的反射率取 15%,吸收率取 85%;光栅的衍射效率按第 2 节中的计算结果输入。

消叠级滤光片是光谱成像系统中的重要光学元件,用于消除叠加在光栅工作级次对应谱面上的高级次衍射光所成的像。图 5 是系统中所用的消叠级滤光片的示意图。可见近红外通道的窗口滤光片材料为熔石英,其后表面被分成 I、II 两个区域,其中区域 I 为 400~700 nm 带通滤光片,谱段范围内的透过率取 96%,区域 II 为 600~1000 nm 带通滤光片,谱段范围内的透过率取 95%。红外通道的窗口

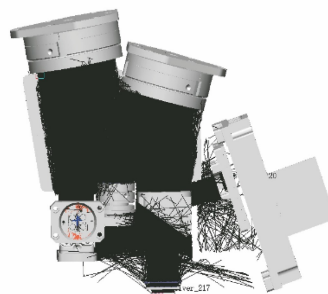


图 4 LightTools 分析模型

Fig. 4 LightTools analysis model

滤光片材料为锗,其后表面被分成 I、II、III 三个区域,区域 I 为 1000~2000 nm 带通滤光片,谱段范围内的透过率取 96%;区域 II 为 1880~3700 nm 带通滤光片,谱段范围内的透过率取 95%;区域 III 为 3500~5000 nm 带通滤光片,谱段范围内的透过率取 95%。

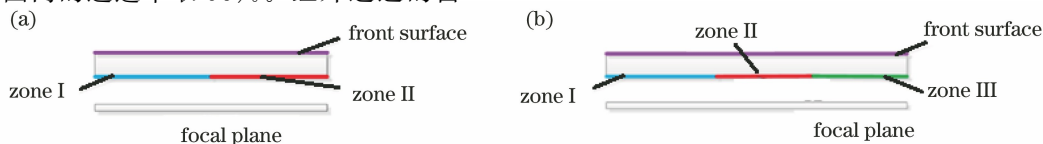


图 5 消叠级滤光片示意图。(a)可见近红外通道;(b)红外通道

Fig. 5 Schematic of order-sorting filter. (a) VIS-NIR channel; (b) IR channel

## 4 衍射杂散光分析

通过光线追迹,可以获得不同波长下不同级次衍射光主光线的像面坐标。根据不同波长主光线像面坐标的分布,可以确定衍射光为衍射杂散光的级次。需要注意的是,这里所说的衍射杂散光特指上文常规消叠级滤光片无法去除的光栅衍射光。

对于可见近红外通道,可见近红外光栅的多级衍射光和红外光栅的多级衍射光都有可能在像面上造成干扰。表 2 是可见近红外通道中不同级次衍射光主光线的像面坐标,其中  $N_1$  为可见近红外光栅衍射光的级次, $N_2$  为红外光栅衍射光的级次,坐标原点为工作级次下  $0.4 \mu\text{m}$  波长主光线的坐标。由

表 2 可见近红外通道像面上不同级次衍射光主光线的坐标

Table 2 Chief ray position at each diffraction order in image plane of VIS-NIR channel

Wavelength / $\mu\text{m}$	Chief ray position /mm						
	$N_1=-1$	$N_1=-2$	$N_1=-3$	$N_2=-1$	$N_2=-2$	$N_2=-3$	$N_2=-4$
0.4	0	3.33	6.67	-2.13	-0.93	0.27	1.48
0.55	1.25	5.83	10.43	-1.68	-0.03	1.63	3.28
0.70	2.50	8.34	14.19	-1.23	0.88	2.98	5.09
0.85	3.75	10.84	17.97	-0.78	1.78	4.33	6.89
1.00	5.00	13.36	21.78	-0.33	2.68	5.69	8.70

同理,根据光线追迹结果可得红外通道像面上不同级次衍射光主光线的像面坐标,如表 3 所示。由表 3 结果可知,红外光栅高级次衍射光产生的干扰可倍消叠级滤光片去除;红外光经过可见近红外

表 3 红外通道像面上不同级次衍射光主光线的坐标

Table 3 Chief ray position at each diffraction order in image plane of IR channel

Wavelength / $\mu\text{m}$	Chief ray position /mm						
	$N_1=-1$	$N_1=-2$	$N_1=-3$	$N_2=-1$	$N_2=-2$	$N_2=-3$	$N_2=-4$
1.00	0	2.99	5.98	8.98	11.98	5.30	13.61
2.00	3.00	8.99	14.99	21.03	25.61	13.62	30.57
3.00	5.99	15.00	24.08	33.54	-	21.99	-
4.00	8.99	21.04	33.54	-	-	30.57	-
5.00	11.99	27.17	47.72	-	-	40.36	-

通过以上分析可知,衍射杂散光仅存在于可见近红外通道中,是可见近红外光经红外光栅衍射后产生的。

## 5 衍射杂散光系数的分析

在基于分区光栅的光谱成像光学系统中,杂光的来源主要包括两部分:一部分是由光学元件表面的反射以及机械元件表面的散射等引起的,另一部分是由衍射杂散光引起的。相比较而言,衍射杂散光引起的杂光可能是系统杂光中的主要部分。为了表征衍射杂散光对系统的影响程度,本节引入了衍

表 2 可见,在可见近红外通道中,可见近红外光栅工作级次(-1 级)的衍射光对应的像面坐标范围为  $0\sim 5 \text{ mm}$ ,可见近红外光栅-2 级衍射光的质心坐标范围为  $3.33\sim 13.36 \text{ mm}$ ,其干扰可被消叠级滤光片消除。可见近红外光栅-3 级衍射光的像面坐标范围与工作级次衍射光的像面坐标范围不重叠,故不会造成干扰。需要注意的是,可见近红外光经过红外光栅后的多级衍射光也会聚到可见近红外通道的像面上。根据分析结果和所用的消叠级滤光片参数可知,红外光栅的-2、-3 和-4 级主光线的像面坐标范围与可见近红外通道工作级次主光线的像面坐标范围有重叠,会对可见近红外通道造成干扰。

光栅后的-1 级衍射光的干扰同样可被消叠级滤光片去除,-2 级等其他高级次衍射光的质心坐标与红外通道工作级次的质心坐标范围不重合,不会产生影响。

射杂散光系数,即在相同谱面位置处,其他衍射光引起的像面照度和工作级次衍射光引起的像面照度之比。

根据建立的分析模型,利用 LightTools 软件分析得到可见近红外通道像面照度,如图 6 所示。图 6 分别给出了可见近红外光栅工作级次、红外光栅-2 级和红外光栅-3 级衍射光在可见近红外通道像面上的照度,其中 X 和 Y 表示像面坐标。具体计算结果如表 4 所示,可以看出,衍射杂散光系数最小值约在  $0.85 \mu\text{m}$  处,为  $47.64\%$ ,最大值约在  $1.00 \mu\text{m}$  处,为  $200.53\%$ 。从像面照度图和表 4 中

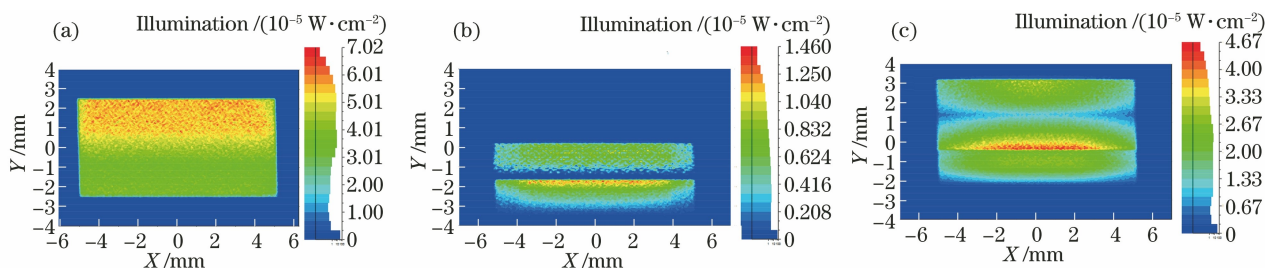


图 6 不同衍射光在可见近红外通道像面上的照度。(a) VIR-NIR 光栅 -1 级衍射光; (b) IR 光栅 -2 级衍射光; (c) IR 光栅 -3 级衍射光

Fig. 6 Illuminations of different diffraction light in image plane of VIS-NIR channel. (a) -1 order diffraction light of VIR-NIR grating; (b) -2 order diffraction light of IR grating; (c) -3 order diffraction light of IR grating

表 4 可见近红外通道像面上的衍射杂散光分析结果

Table 4 Analytical results for diffraction stray light in image plane of VIR-NIR channel

Diffraction order	Illumination / (W · mm <sup>-2</sup> )				
	Wavelength of 1.00 μm	Wavelength of 0.85 μm	Wavelength of 0.70 μm	Wavelength of 0.55 μm	Wavelength of 0.40 μm
-1 order of VIS-NIR grating	1.73 × 10 <sup>-5</sup>	2.84 × 10 <sup>-5</sup>	2.83 × 10 <sup>-5</sup>	3.23 × 10 <sup>-5</sup>	1.96 × 10 <sup>-5</sup>
-1 order of IR grating	1.18 × 10 <sup>-7</sup>	1.17 × 10 <sup>-7</sup>	9.45 × 10 <sup>-8</sup>	1.27 × 10 <sup>-7</sup>	1.44 × 10 <sup>-7</sup>
-2 order of IR grating	4.70 × 10 <sup>-8</sup>	5.71 × 10 <sup>-8</sup>	1.83 × 10 <sup>-5</sup>	6.83 × 10 <sup>-6</sup>	3.56 × 10 <sup>-5</sup>
-3 order of IR grating	2.49 × 10 <sup>-5</sup>	1.26 × 10 <sup>-5</sup>	3.02 × 10 <sup>-5</sup>	2.66 × 10 <sup>-5</sup>	1.22 × 10 <sup>-7</sup>
-4 order of IR grating	9.58 × 10 <sup>-6</sup>	6.99 × 10 <sup>-7</sup>	5.92 × 10 <sup>-6</sup>	1.28 × 10 <sup>-7</sup>	9.62 × 10 <sup>-9</sup>
Total illumination caused by IR grating	3.47 × 10 <sup>-5</sup>	1.36 × 10 <sup>-5</sup>	5.45 × 10 <sup>-5</sup>	3.37 × 10 <sup>-5</sup>	3.59 × 10 <sup>-5</sup>
Diffraction stray light coefficient	200.53%	47.64%	192.24%	104.28%	183.46%

的照度值可以看出, 衍射杂散光的主要来源是可见近红外光经过红外光栅后的 -2 级和 -3 级衍射光。

## 6 衍射杂散光的抑制方法

通过分析可知, 可见近红外光经过红外光栅后的衍射光会叠加到可见近红外通道的工作谱面上, 且无法被常规的消叠级滤光片去除, 因此需要研究衍射杂散光的抑制方法。

### 6.1 基于线性渐变滤光片的抑制方法

线性渐变滤光片是指随着滤光片上位置的变化, 透射中心波长呈线性变化的一种滤光片。利用该滤光片窄带通和中心波长渐变的特点, 可通过在探测器附近放置线性渐变滤光片来抑制衍射杂散光。

由表 2 可见, 红外光栅 -3 级衍射光的像面坐标与可见近红外光栅 -1 级衍射光的像面坐标的距

离最小, 因此通过计算同一波长下两者的最小坐标距离, 可确定渐变滤光片的最大带宽。考虑到线性渐变滤光片通常只能镀制在探测器的窗口玻璃上, 因此首先分析衍射光光斑在探测器窗口玻璃表面上的分布情况。

根据光线追迹结果可知, 可见近红外光栅 -1 级衍射光在窗口玻璃上的光斑直径约为 0.112 mm, 不同波长下可见近红外光栅 -1 级衍射光光斑与红外光栅 -3 级衍射光光斑之间的最小距离如表 5 所示。由于可见近红外通道的倒线色散率为 0.12 nm/μm, 可以计算得到线性渐变滤光片在工作波段范围内的最小带宽应大于倒线色散率和可见近红外光栅 -1 级衍射光光斑直径的乘积 (13.4 nm), 最大带宽如表 5 所示。

表 5 红外光栅 -3 级衍射光光斑和可见近红外光栅 -1 级衍射光光斑在探测器窗口玻璃上的距离

Table 5 Distance between -1 order diffraction light spot of VIR-NIR grating and -3 order diffraction light spot of IR grating on detector window glass

Wavelength / μm	0.40	0.55	0.70	0.85	1.00
Distance / mm	0.120	0.233	0.340	0.450	0.555
Maximum bandwidth / nm	42.1	69.22	94.9	121.3	146.5

### 6.2 基于光阑镀膜的抑制方法

线性渐变滤光片的成本和制作难度较大,且透过率通常不高,因此另一种抑制方法考虑将可见近红外光和红外光分开,使得可见近红外光仅入射至可见近红外光栅上。在分区光栅红外通道对应的区域镀膜,该膜系仅反射红外波段,因而使得可见近红外光无法经过红外光栅产生衍射。在实际系统中,由于前置物镜的孔径光阑与 Offner 成像系统的光阑是共轭的,因此可以在光学设计时将前置物镜的孔径光阑前置,在该光阑上的红外光栅区域处放置一块可见近红外高反-红外高透的滤光片,使得仅有红外光进入红外通道。通过调研得到的这类膜系的典型镀膜曲线如图 7 所示。

利用 LightTools 软件计算,得到可见近红外光栅的 -1 级衍射光及红外光栅的 -2 和 -3 级衍射

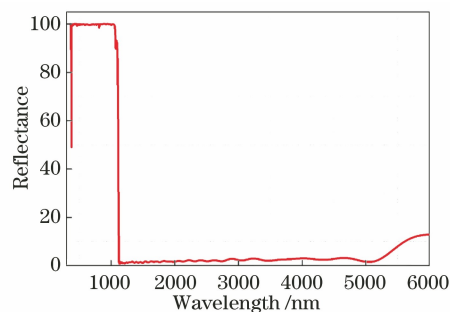


图 7 膜层的反射率曲线

Fig. 7 Reflectance curve of coating

光在可见近红外通道像面上的照度,如图 8 所示,各个特征波长处的衍射杂散光系数和照度值如表 6 所示。由分析结果可知,可见近红外通道的衍射杂散光系数最大值出现在  $1.00 \mu\text{m}$  波长处,最大衍射杂散光系数仅为  $0.57\%$ ,衍射杂散光得到了有效的抑制。

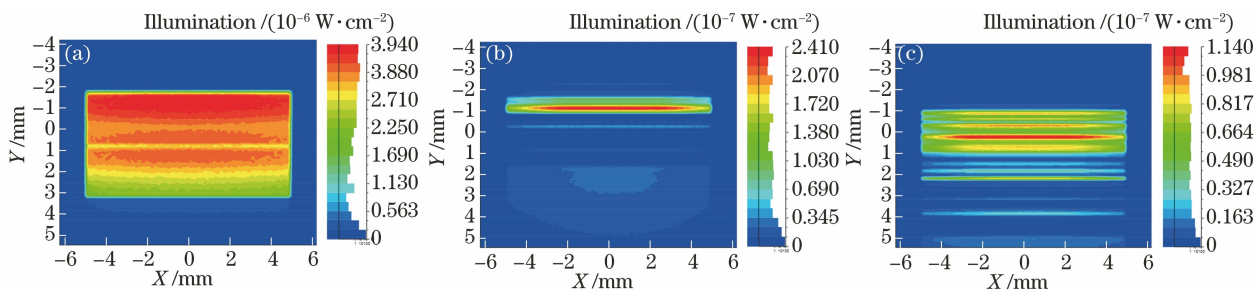


图 8 不同衍射光在光阑镀膜后可见近红外通道像面上的照度图。(a) VIS-NIR 光栅 -1 级衍射光;  
(b) IR 光栅 -2 级衍射光;(c) IR 光栅 -3 级衍射光

Fig. 8 Illuminations of different diffraction light in image plane of VIR-NIR channel after stop coating. (a) -1 order diffraction light of VIS-NIR grating; (b) -2 order diffraction light of IR grating; (c) -3 order diffraction light of IR grating

表 6 光阑镀膜后可见近红外通道像面上的衍射杂散光分析结果

Table 6 Analytical results for diffraction stray light in image plane of VIS-NIR channel after stop coating

Diffraction order	Illumination / ( $\text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$ )				
	Wavelength	Wavelength	Wavelength	Wavelength	Wavelength
	of $0.40 \mu\text{m}$	of $0.55 \mu\text{m}$	of $0.70 \mu\text{m}$	of $0.85 \mu\text{m}$	of $1.00 \mu\text{m}$
-1 order of VIS-NIR grating	$3.11 \times 10^{-5}$	$3.55 \times 10^{-5}$	$3.35 \times 10^{-5}$	$3.11 \times 10^{-5}$	$1.41 \times 10^{-5}$
-1 order of IR grating	0	$4.85 \times 10^{-9}$	$1.36 \times 10^{-8}$	$1.39 \times 10^{-8}$	$8.70 \times 10^{-9}$
-2 order of IR grating	$8.14 \times 10^{-8}$	$9.25 \times 10^{-9}$	$8.55 \times 10^{-9}$	$2.34 \times 10^{-8}$	$2.08 \times 10^{-8}$
-3 order of IR grating	$4.82 \times 10^{-10}$	$4.88 \times 10^{-8}$	$8.81 \times 10^{-8}$	$2.36 \times 10^{-8}$	$6.08 \times 10^{-9}$
-4 order of IR grating	0	$4.42 \times 10^{-14}$	$1.03 \times 10^{-8}$	$1.09 \times 10^{-12}$	$4.40 \times 10^{-8}$
Total illumination caused by IR grating	$8.19 \times 10^{-8}$	$6.29 \times 10^{-8}$	$1.21 \times 10^{-7}$	$6.10 \times 10^{-8}$	$7.97 \times 10^{-8}$
Diffraction stray light coefficient	0.26%	0.18%	0.36%	0.19%	0.57%

## 7 结 论

分析研究了基于分区光栅的光谱成像光学系统中的衍射杂散光问题。通过光线追迹,分析了衍射杂散光的来源和相应的衍射级次。对所设计的光学系统进行分析可知,衍射杂散光主要存在于可见近

红外通道中,其来源是可见近红外光经过红外光栅后的衍射光。根据衍射杂散光的特点,提出了两种衍射杂散光的抑制方法。第一种方法是采用线性渐变滤光片来抑制衍射杂散光,并计算了滤光片的带宽要求。第二种方法是采用光阑镀膜方法,通过在对应红外光栅的光阑区域镀制可见高反-红外高透

膜,抑制入射到红外光栅的可见光,衍射杂散光系数降至 0.57% 以下。第一种方法中的线性渐变滤光片的成本和制作难度较大,且透过率不高,会引起信噪比的下降。与之相比,第二种方法易于实现,且具有较好的抑制效果,适用于基于分光光栅的光谱成像光学系统的衍射杂散光的抑制。

### 参 考 文 献

- [1] Coradini A, Capaccioni F, Drossar P, et al. VIRTIS: an imaging spectrometer for the ROSETTA mission [C] // 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications, July 10-14, 1995, Firenze, Italy. New York: IEEE Press, 1995, 2: 1604-1606.
- [2] Reuter D C, Simon A A, Hair J, et al. The OSIRIS-REx visible and InfraRed spectrometer (OVIRS): spectral maps of the asteroid Bennu [J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(2): 1-22.
- [3] Sha W, Li J T, Lu C P. Quantitative analysis of Mn in soil based on laser-induced breakdown spectroscopy optimization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0511001.  
沙文, 李江涛, 鲁翠萍. 基于激光诱导击穿光谱技术寻优定量分析土壤中 Mn 元素[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0511001.
- [4] Liu X, Zhang T, Zhang G, et al. Carbon monoxide detection based on photoacoustic spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0111002.  
刘新, 张婷, 张刚, 等. 基于光声光谱技术的 CO 气体探测[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0111002.
- [5] Zhong H. Design and analysis of micro-spectrometer with high resolution and wide spectral range [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 153004.  
钟卉. 高分辨率宽光谱范围微型光谱仪的设计与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 153004.
- [6] Reininger F M, Coradini A, Capaccioni F, et al. VIRTIS: visible infrared thermal imaging spectrometer for the Rosetta mission[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2819: 66-77.
- [7] Drossart P, Piccioni G, Coradini A, et al. VIRTIS imaging spectrometer for the ESA/Venus express mission[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5543: 175-185.
- [8] Combe J P, Raponi A, Tosi F, et al. Exposed H<sub>2</sub>O-rich areas detected on Ceres with the dawn visible and infrared mapping spectrometer [J]. *Icarus*, 2019, 318: 22-41.
- [9] Filacchione G, Ammannito E, Coradini A, et al. On-ground characterization of Rosetta/VIRTIS-M. II. Spatial and radiometric calibrations [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10): 103106.
- [10] Yang F Z, Chen X H, Zhao Z C, et al. Visible-infrared imaging spectrometer for the exploration of asteroids [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0722002.  
杨福臻, 陈新华, 赵知诚, 等. 面向小行星探测的可见-红外光谱成像光学系统[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0722002.