

宽波段凸面闪耀光栅优化设计

朱嘉诚^{1,2}, 靳阳明^{1,2}, 黄绪杰^{1,2}, 刘全^{1,2,3}, 沈为民^{1,2}

- (1. 苏州大学 物理与光电·能源学部 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;
2. 苏州大学 物理与光电·能源学部 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;
3. 苏州大学 物理与光电·能源学部 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006)

摘要: 凸面闪耀光栅是研制高光谱分辨率成像光谱仪的关键元件之一, 一般凸面闪耀光栅的有效波段范围较窄, 较难满足宽波段成像光谱仪对光栅衍射效率的需求。为拓宽仪器观测波段, 对其中凸面闪耀光栅进行了优化设计。以 0.4~2.5 μm 波段 Offner 型成像光谱仪为例, 研究了凸面光栅单衍射级和双衍射级共路两种色散结构, 采用分区闪耀光栅和双角闪耀光栅来提高宽波段范围内的衍射效率。优化设计了两种双闪耀光栅在不同色散结构下的槽形, 用标量理论和有限元分析等方法对光栅衍射效率进行了计算。结合仪器信噪比, 给出了满足成像光谱仪不同需求时所适用的光栅。

关键词: 宽波段; 分区闪耀光栅; 双角闪耀光栅; 衍射效率; 信噪比

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1120003

Design and optimization of broadband convex blazed grating

Zhu Jiacheng^{1,2}, Jin Yangming^{1,2}, Huang Xujie^{1,2}, Liu Quan^{1,2,3}, Shen Weimin^{1,2}

- (1. Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China;
2. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China;
3. College of Physics, Optoelectronics and Energy & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Convex blazed grating is one of the key elements in hyperspectral imaging spectrometers. Generally, the effective wavelength coverage of blazed grating is not broad enough to meet the need of imaging spectrometer for grating's diffraction efficiency. To extend the observation band of imaging spectrometer, in which the convex blazed grating was designed and optimized. A case study of 0.4–2.5 μm band Offner type imaging spectrometer, single-order and dual-order dispersive structures of convex grating were researched. Partitioned blazed grating and dual-angle blazed grating were used to improve the diffraction efficiency in the range of a broadband. The groove shape of two types of dual-blazed gratings

收稿日期: 2017-03-21; 修订日期: 2017-04-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB05500501)

作者简介: 朱嘉诚(1993-), 男, 硕士生, 主要从事衍射光学及光谱技术方面的研究。Email: 20154208096@stu.suda.edu.cn

导师简介: 沈为民(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光学设计和仪器光学以及航天遥感技术等方面的研究。

Email: swm@suda.edu.cn

with different dispersive structures was optimally designed, and the diffraction efficiency was calculated by the method of scalar theory and finite element analysis. According to the signal-to-noise ratio(SNR) of the instrument, different types of grating were proposed to meet different requirements of imaging spectrometer.

Key words: broadband; partitioned blazed grating; dual-angle blazed grating; diffraction efficiency; SNR

0 引言

在成像光谱仪中,常见的锯齿形闪耀光栅有效光谱范围相对较窄,通常其一级衍射光在两倍频波段内具有较高衍射效率,随着波长远离闪耀波长,衍射效率下降较快。对于多倍频的工作波段,一般拆分成多个独立的光谱通道及与之匹配的分光系统^[1],这增加了仪器的体积、复杂性和成本。为研制独立的宽波段分光系统,亟需设计在宽波段内衍射效率高且相对平稳的闪耀光栅。

双闪耀光栅在较宽的波段上具有高衍射效率,它有两个定向面,能够实现两个波长同时闪耀。双衍射级的色散结构能有效提高光栅利用率,其衍射效率相比单衍射级结构时显著提高。1998年JPL的Pantazis Mouroulis等人^[2]将双闪耀光栅细分为分区闪耀光栅和双角闪耀光栅。分区闪耀光栅由两个区域组成,各区域具有不同闪耀角的锯齿槽;双角闪耀光栅只有一个槽形,但每个槽内包含两个不同闪耀角的定向面。

随着激光直写技术^[3]和电子束光刻技术^[4]的成熟,这两种双闪耀光栅在凸面基底上的制造难度大大降低。1996年美国新千年地球观测项目EO-1任务^[5]中的超光谱成像仪即采用分区闪耀光栅,光谱范围为0.4~2.5 μm,其中在0.4~1 μm使用光栅的二级衍射光,1~2.5 μm使用一级衍射光。2009年,NASA发射的军事战术小卫星TACSAT-3,其超光谱成像系统ARTEMIS^[6]采用了双角闪耀光栅的一级衍射光,光谱范围为0.4~2.5 μm。目前国内苏州大学等单位已有使用全息-离子束刻蚀法成功研制分区闪耀光栅的经验^[7],但仍未有实际运用到成像光谱仪中的案例。

文中以0.4~2.5 μm波段Offner型成像光谱仪为例,旨在通过分析光栅色散结构和槽形结构,设计

适用于该波段的凸面闪耀光栅,实现仅用一套分光系统完成可见-短波红外的分光任务。下文首先阐述凸面闪耀光栅设计原则,其次优化设计单衍射级和双衍射级两种色散结构下不同闪耀光栅的衍射效率,并从光学系统研制角度加以讨论。最后对比不同设计方案,结合成像光谱仪的信噪比需求,讨论不同方案的适用情况。

1 Offner 分光装架凸面闪耀光栅设计原则

经典的Offner凸面光栅型成像光谱仪^[8]装置如图1所示。由狭缝、凹面镜M1、凸面光栅、凹面镜M3和焦平面探测器组成,其中M1、凸面光栅、M3为同心结构。光线通过狭缝经凹面镜M1反射到凸面光栅并发生衍射,衍射后的光线经凹面镜M3反射聚焦,在焦平面上得到按波长排列的狭缝像,经探测器扫描后得到光谱信息。

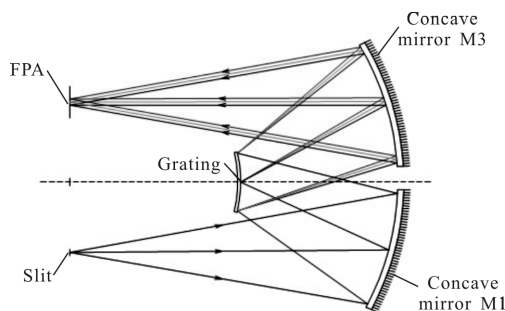


图 1 Offner 凸面光栅型成像光谱仪装置示意图

Fig.1 Schematic of Offner convex grating imaging spectrometer

对于普通的凸面闪耀光栅,闪耀角 θ 定义为槽形定向面法线与光栅凸面基底法线之间的夹角,并且满足公式:

$$\theta = (\alpha - \beta) / 2 \quad (1)$$

式中: α 和 β 分别为光栅的入射角和衍射角。根据光栅方程:

$$d(\sin\beta - \sin\alpha) = k\lambda \quad (2)$$

对于某一确定的光栅，衍射角 β 是关于入射角 α 、波长 λ 和衍射级次 k 的函数。因此在确定的衍射级次和闪耀波长下，闪耀角 θ 只与入射角有关。当入射角为定值时，闪耀角在整个光栅面内才唯一确定。而对于凸面闪耀光栅，很难保证入射角在整个光栅面内为一确定值，但在同心结构中，入射角在凸面内的变化较小。根据所设计的 0.4~2.5 μm 波段 Offner 型成像光谱仪，通过光线追迹读出在凸面光栅上的入射角范围为 13.1°~13.7°。这样小的入射角变化量可以使凸面闪耀光栅的槽形设计和衍射效率计算简化为平面光栅的模型来处理，无需考虑锯齿槽在凸面内不同位置处的闪耀角变化。

2 单衍射级色散结构

光栅处于单衍射级色散结构下，Offner 型成像光谱仪分光系统结构如图 1 所示，0.4~2.5 μm 波段工作于 +1 衍射级，色散后谱线由同一焦平面探测器接收。设计了 F 数为 5，光谱分辨率为 4 nm 的分光系统，其凸面光栅参数如表 1 所示。

表 1 凸面光栅工作于单衍射级次时参数

Tab.1 Convex grating parameters of single-order diffraction

Parameters	Value
Grating constant $d/\mu\text{m}$	20
Diffraction order	+1
Incident angle $\alpha/(\circ)$	13.32
Diffraction angle $\beta/(\circ)$	14.5~20.8

衍射角随波长而变化，不同闪耀波长都唯一确定一个闪耀角。根据标量理论，闪耀光栅衍射效率符合以下公式^[9]：

$$\eta_k = \eta_0 \left[\frac{\sin \left[\pi \left(\frac{\lambda_{\text{blaze}}}{\lambda} - k \right) \right]}{\pi \left(\frac{\lambda_{\text{blaze}}}{\lambda} - k \right)} \right]^2 \quad (3)$$

式中： η_k 为闪耀光栅在 k 级衍射时的相对衍射效率； η_0 为峰值衍射效率，与光栅槽顶角大小有关； λ_{blaze} 为对应的闪耀波长。若使用普通闪耀光栅，为使波段内衍射效率都大于零，设计得到闪耀角为 1°，闪耀波长为 0.7 μm ，对应的衍射效率曲线如图 2 所示。该曲

线包络范围较小，在短波长处十分陡峭，衍射效率值在波段内极不均匀，且长波长处衍射效率太低，难以满足成像光谱仪对光栅衍射效率相对较高且平稳的需求。

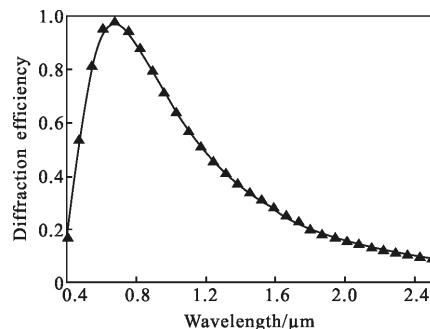


图 2 闪耀角为 1°时光栅衍射效率曲线

Fig.2 Diffraction efficiency curve of 1° blazed angle

以得到相对较高且较平稳的衍射效率为目标，考虑设计分区闪耀光栅，结构如图 3 所示。两个区域的不同闪耀角各确定一闪耀波长。在优化过程中，首先确定两个闪耀波长的大致位置，以初步确定每个区域的闪耀角。不同闪耀角对应的衍射效率按一定比例线性叠加，得到分区闪耀光栅的衍射效率，如下式：

$$\eta = a\eta_a + b\eta_b \quad (4)$$

式中： η 为分区闪耀光栅衍射效率； a 、 b 为分区比例，表示两区域的归一化面积； $a+b=1$ ， η_a 、 η_b 分别为两区域的衍射效率。通过数值法优选分区比例 a 、 b 的值并调整初始闪耀角大小，以获得满足目标的最优衍射效率曲线。

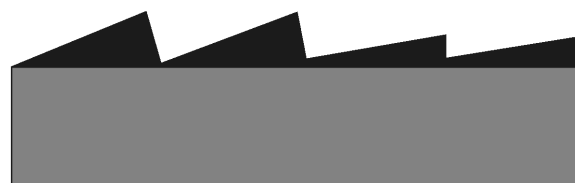


图 3 分区闪耀光栅结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of partitioned blazed grating

由于最终衍射效率是以线性叠加的方式获得，因此两区域衍射效率 η_a 和 η_b 不能在某些波长处都低。计算表明两区域闪耀角为 0.7°和 2.2°时较合适，衍射效率曲线如图 4 所示。调整 0.7°和 2.2°闪耀角的分区比例为 0.35 和 0.65，该比例下分区闪耀光栅整体衍射效率曲线如图 5 所示，最低衍射效率为

0.21, 最高为 0.65。对比普通闪耀光栅, 虽然峰值衍射效率降低, 但最低值有所提高并在波段内相对平稳。

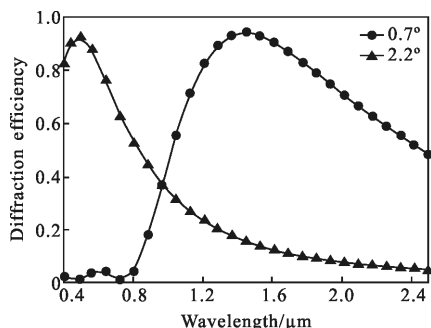


图 4 两区域分别对应的衍射效率曲线
Fig.4 Diffraction efficiency of two partitions

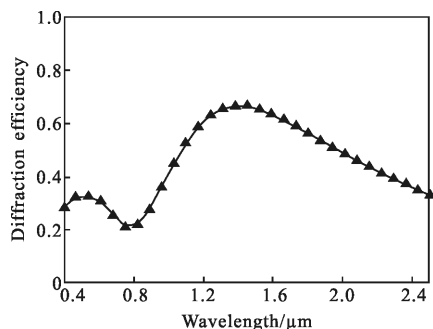


图 5 单衍射级次分区闪耀光栅衍射效率
Fig.5 Diffraction efficiency of single-order diffraction partitioned blazed grating

另一种拓宽波段范围的方法是改变槽形结构, 使用双角闪耀光栅, 如图 6 所示。影响槽形的主要参数为两闪耀角 θ_1 和 θ_2 , 以及其所占光栅周期的比例 a 、 b , $a+b=1$ 。图 6(a)和图 6(b)所示为不同槽形结构, 但其闪耀角和占比都相同, 因此它们具有完全相同的闪耀效果。

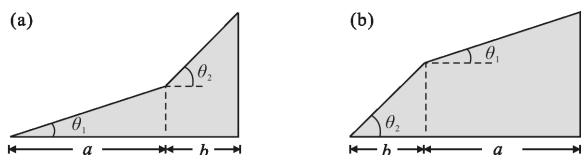


图 6 双角闪耀光栅槽形结构
Fig.6 Groove shape of dual-angle blazed grating

双角闪耀光栅在一个周期内有两个闪耀角, 无法简单地通过光栅方程得到两个闪耀波长的位置,

且衍射效率的计算也非通过公式(3)。文中对双角闪耀光栅衍射效率的计算使用有限元法^[10], 即通过在光栅的周期性边界条件内划分小面元, 在每个小面元内对菲涅尔-基尔霍夫衍射公式进行积分并累加求和得到最终光场振分布情况。通过调整闪耀角 θ_1 与 θ_2 , 及它们的占比 a 、 b , 优化得到的衍射效率曲线如图 7 所示。两闪耀角为 0.85° 和 4.4° , 与之对应的占比为 0.51 和 0.49, 最低衍射效率在 0.2 左右。

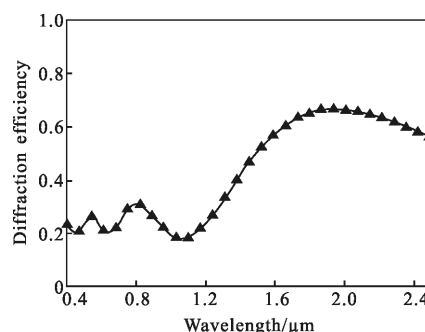


图 7 单衍射级次双角闪耀光栅衍射效率曲线
Fig.7 Diffraction efficiency of single-order diffraction dual-angle blazed grating

3 双衍射级共路色散结构

当凸面光栅同时工作于第一和第二衍射级次, 由光栅方程式(2)可知, 对于同一束入射光, 波长为 λ 的一级衍射光和波长为 N_2 的二级衍射光具有相同的衍射角, 即具有相同的传播路径; 一级闪耀波长为二级闪耀波长的两倍。文中所讨论的 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段为 6.25 倍频波段, 考虑等倍频分配原则, 可分为 $0.4\sim 1\ \mu\text{m}$ 和 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 两波段。 $0.4\sim 1\ \mu\text{m}$ 波段工作于第二衍射级次, $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段工作于第一衍射级次, 经光栅分光后两级次光路近似重合, 如图 8 所示。

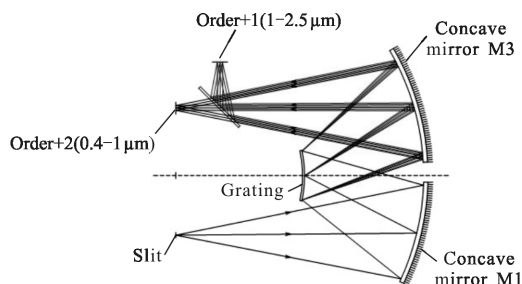


图 8 双衍射级共路 Offner 型成像光谱仪结构示意图
Fig.8 Schematic of dual-order diffraction overlapped Offner imaging spectrometer

该设计相对于仅使用一级衍射光的结构, 具有较小的焦平面线色散宽度, 结构可设计地更为紧凑, 并且每个焦平面探测器只需负责一半的探测压力, 能有效降低研制成本。对于两个 2.5 倍频的波段, 光路并非严格重合, 会有部分非工作级次光线进入探测器探测区域产生叠级, 造成杂散光影响, 需在焦平面前加消叠级滤波片^[2]来消除叠级。双衍射级共路结构中凸面闪耀光栅的设计参数如表 2 所示。

表 2 凸面光栅工作于双衍射级次时参数

Tab.2 Convex grating parameters of dual-order diffraction

Parameters	Value	
Grating constant $d/\mu\text{m}$	20	
Diffraction order	+1	+2
Wavelength range/ μm	1-2.5	0.4-1
Incident angle $\alpha/(\text{^\circ})$	13.22	13.22
Diffraction angle $\beta/(\text{^\circ})$	16.2-20.7	15.6-19.2

在双衍射级色散结构下, 分区闪耀光栅两个区域闪耀角同时确定每个波段内的闪耀波长。设计过程中, 第二级次衍射效率随闪耀角变化的灵敏度较高, 因此首先优化 0.4~1 μm 波段衍射效率。即通过调整闪耀角 θ_1 与 θ_2 , 和它们所在分区的比例 a 、 b , 使 0.4~1 μm 波段内的衍射效率不太低。同时兼顾 1~2.5 μm 波段内衍射效率, 对初步确定的闪耀角和占比进行微调得到全波段衍射效率值较高且平稳的最优曲线。根据表 2 参数优化得到两区域闪耀角分别为 1.4° 和 2.6°, 对应占比为 0.4 和 0.6。衍射效率曲线如图 9 所示, 全波段衍射效率在 0.2 和 0.75 之间。

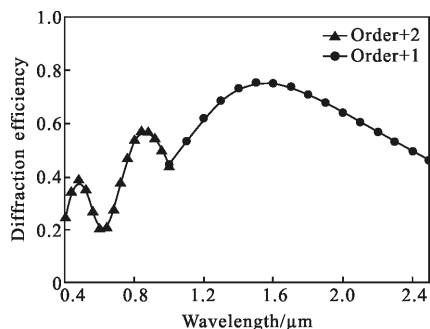


图 9 双衍射级次分区闪耀光栅衍射效率曲线

Fig.9 Diffraction efficiency of dual-order diffraction partitioned blazed grating

双衍射级色散结构下, 双角闪耀光栅与分区闪耀光栅的设计思路基本相同, 先后优化第二级次和第一级次衍射效率, 优化得到的衍射效率曲线如图 10 所示。其中两闪耀角为 1.3° 和 3.6°, 各占周期的 50%。

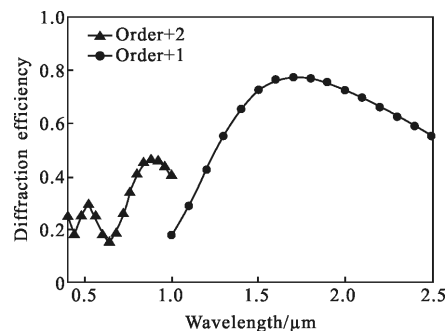


图 10 双衍射级次双角闪耀光栅衍射效率曲线

Fig.10 Diffraction efficiency of dual-order diffraction dual-angle blazed grating

该方案最低衍射效率为 0.15, 0.4~1 μm 波段与 1~2.5 μm 波段的衍射效率曲线不能平滑衔接, 在 1 μm 左右两侧存在明显突变。

4 比较与讨论

图 11 为四种设计方案的衍射效率曲线。分区闪耀光栅在单衍射级时, 0.5 μm 和 1.45 μm 处各存在一峰值, 短波限和长波限衍射效率值相差不大; 在双

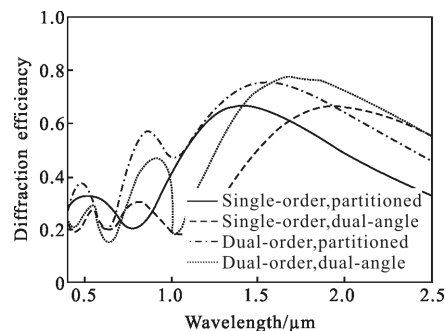


图 11 四种设计方案衍射效率曲线

Fig.11 Diffraction efficiency curves of four schemes

衍射级时, 全波段存在三个峰值, 且除在 0.62 μm 附近存在衍射效率低谷外, 整体衍射效率值较高。双角闪耀光栅在单衍射级时, 0.4~1 μm 波段衍射效率均较低且波动较小, 1~2.5 μm 波段的衍射效率平稳上升并保持在较高位置, 两波段衍射效率值存在明显区分度; 在双衍射级时, 衍射效率曲线在 1 μm 两侧存在突变, 这将导致焦平面探测器接收到的光能量

存在突变,对仪器使用造成影响,存在弊端。总体来说,各方案 1~2.5 μm 波段的衍射效率值高于 0.4~1 μm 波段;双衍射级色散结构下的衍射效率高于单衍射级;分区闪耀光栅衍射效率在短波长处比双角闪耀光栅高但在长波长处下降较快。

为获得高质量的光谱图像,要求仪器具有高且稳定的信噪比。Offner 型成像光谱仪在光子噪声限下信噪比计算公式^[11]如下:

$$SNR = \sqrt{B(\lambda)\tau(\lambda)\eta(\lambda)Q(\lambda)t \frac{\pi d_1 d_2}{4F^2} \frac{\lambda}{hc} \Delta\lambda} \quad (5)$$

式中: $B(\lambda)$ 为入射光光谱辐亮度; $\tau(\lambda)$ 表示除光栅外系统透过率; $\eta(\lambda)$ 为光栅衍射效率; $Q(\lambda)$ 为探测器光电量子转换效率; t 为系统曝光时间; d_1, d_2 为探测器像元尺寸。仪器光谱分辨率为 $\Delta\lambda$,相对孔径为 $1/F$ 。

由公式(5)可知,仪器信噪比和入射光光谱辐亮度、光栅衍射效率呈正相关。为获得仪器对地拍摄时的辐亮度信息,需仿真光谱辐射的大气传输模型。假设成像光谱仪工作于海拔 3 km 的机载平台,具体环境参数如表 3 所示。根据给出的环境参数,利用 MODTRAN 软件建立光谱辐射的大气传输模型。

表 3 建立辐射传输模型的环境参数

Tab.3 Environmental parameters used to build the radiation transmission mode

Parameters	Value
Observer height/km	3
Surface type	Urban
Weather condition	No clouds or rain
CO ₂ mixing ratio (ppm)*	400
Sun altitude angle/(°)	60
Surface albedo	0.3

* 1 ppm=10⁻⁶

利用软件得到模拟工作环境下仪器的入射光谱辐亮度曲线如图 12 所示。辐亮度整体随波长呈下降

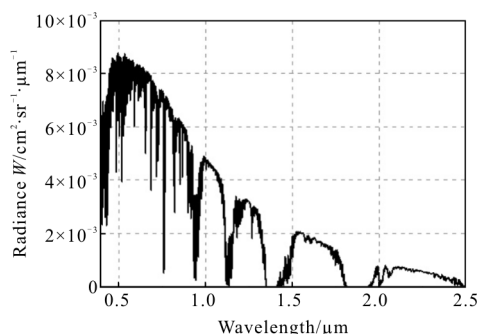


图 12 模拟工作环境下光谱辐亮度曲线

Fig.12 Spectral radiance of the simulative working environment

趋势,在短波长处的值相比长波长处大很多,辐亮度曲线存在的两零值为大气传输的强吸收带^[12]造成。

为使成像光谱仪获得信噪比相对均匀的光谱图像,需把光栅衍射效率设计成在短波长处较低而在长波长处较高,单衍射级次下的双角闪耀光栅具有这样的特性,因此选用该方案较合理。使用双角闪耀光栅工作于单衍射级次时,模拟工作条件下的仪器信噪比由公式(5)获得,信噪比曲线如图 13 所示,在全波段内相对较均匀。

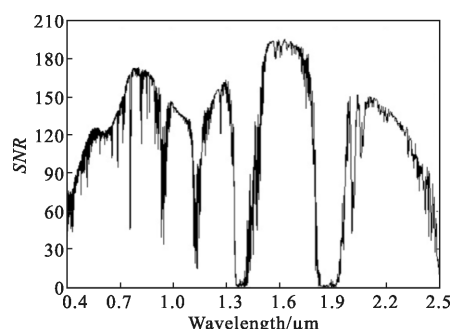


图 13 单衍射级双角闪耀光栅光谱仪信噪比图像

Fig.13 SNR of single-order diffraction dual-angle blazed grating spectrometer

若成像光谱仪旨在获得高信噪比的光谱图像,则光栅衍射效率在全波段越高越好。上文分析的四种方案中,双衍射级色散结构下分区闪耀光栅在全波段具有整体最高的衍射效率,因此选用该方案能使所模拟工作条件下仪器获得最高信噪比,对应的信噪比曲线如图 14 所示。全波段信噪比整体高于图 13 所示信噪比,但波动较大,最大峰值达到 265。

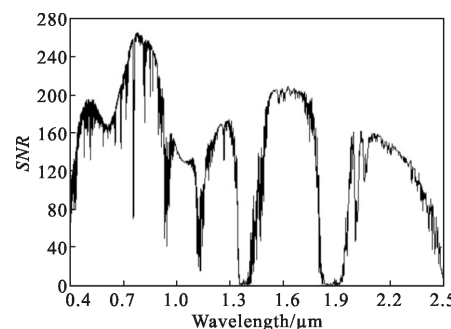


图 14 双衍射级分区闪耀光栅光谱仪信噪比图像

Fig.14 SNR of dual-order diffraction partitioned blazed grating spectrometer

5 结论

文中基于 0.4~2.5 μm 波段 Offner 型成像光谱

仪,指出 Offner 分光装架中凸面光栅在设计过程中可简化为平面模型。指出普通闪耀光栅较难满足该 6.25 倍频系统对光栅衍射效率的需求。在单衍射级和双衍射级两种色散结构下分别设计了分区闪耀光栅和双角闪耀光栅,结合衍射效率曲线说明了双闪耀光栅在宽波段范围内具有较高的衍射效率且衍射效率随波长变化较平稳。建立了机载成像光谱仪模拟工作条件下的信噪比模型。比较不同方案仪器信噪比,结果表明:分区闪耀光栅在双衍射级的色散结构下更有利于仪器获得高信噪比。单衍射级下的双角闪耀光栅可使仪器信噪比在宽波段内相对均匀。所得结论可用于指导实际应用中光栅种类和色散结构的选择,并可根据目标物辐射信息甚至探测器量子效率等特性对成像光谱仪信噪比进行优化。这对机载乃至星载宽波段独立分光系统设计有一定参考价值 and 借鉴意义。

参考文献:

- [1] Vane G, Green R O, Chrien T G, et al. The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44(2-3): 127-143.
- [2] 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.
- [3] Smuk A Y, Lawandy N M. Direct laser writing of diffractive optics in glass[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(13): 1030-1032.
- [4] Fomchenkov S A, Butt M A, Podlipnov V V, et al. E-beam lithography exposure conditions for the fabrication of RGB filter based on metal/dielectric subwavelength grating [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2016, 741 (1): 012150.
- [5] Seery B D, Lencioni D E. EO -1: NASA's first new millennium earth orbiting mission[C]//SPIE, 1996, 2810: 4-10.
- [6] Cooley T W, Lockwood R B, Davis T M, et al. Advanced responsive tactically-effective military imaging spectrometer (ARTEMIS) design [C]//IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, 2006: 1628-1630.
- [7] Liu Q, Wu J, Chen M, et al. The fabrication of the holographic dual-blazed grating [C]//International Conference on Optical Instruments and Technology (OIT2013). International Society for Optics and Photonics, 2013: 90470F.
- [8] Ji Yiqun, Shen Weimin. Design and manufacture of Offner convex grating hyper-spectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 285-287. (in Chinese)
季轶群, 沈为民. Offner 凸面光栅超光谱成像仪的设计与研制 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 285-287.
- [9] Buralli D A, Morris G M, Rogers J R. Optical performance of holographic kinoforms [J]. *Applied Optics*, 1988, 28(5): 976-983.
- [10] Wang Z, Bao G, Li J, et al. An adaptive finite element method for the diffraction grating problem with transparent boundary condition [J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 2015, 53(3): 1585-1607.
- [11] Jin Yangming, Wang Yan, Zhao Zhicheng, et al. Analysis and comparison of signal-to-noise ratio of spatially modulated interference and diffraction grating imaging spectrometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0911001. (in Chinese)
靳阳明, 王岩, 赵知诚, 等. 空间调制干涉型和衍射光栅型成像光谱仪信噪比性能的分析比较 [J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0911001.
- [12] Chen Yuheng, Ji Yiqun, Zhou Jiankang, et al. Signal-to-noise ratio evaluation of airborne visible-infrared hyperspectral imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2300-2303. (in Chinese)
陈宇恒, 季轶群, 周建康, 等. 机载可见-红外超光谱成像仪信噪比的估算[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2300-2303.