

轻小型掩膜式光谱光学系统

李鹏达¹, 胡源¹, 钟晓明², 王旭¹, 王月旗¹, 李轶庭¹, 骆强³

- (1. 长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 北京空间机电研究所先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094;
3. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710000)

摘要: 掩膜式光谱仪通过分光镜, 将入射场景分为空间维和光谱维两路分别采集, 然后对其进行信息融合, 实现光谱高动态视频信号的获取, 在动态高光谱成像领域具有广泛的应用价值。为了解决掩膜式光谱仪轻小型化问题, 针对光谱光学系统部分, 进行镜片数量的精简设计, 采用光栅替换传统棱镜, 在实现线性色散的同时使结构进一步紧凑。并针对光栅无用级次产生的杂散光问题进行分析, 论证了系统设计的可行性。最终设计的系统在 400~1 000 nm 范围内, 光谱分辨率均小于 4 nm, 全视场奈奎斯特频率处平均调制传递函数 (MTF) 均大于 0.4, 像面照度均匀性高于 0.9, 实现良好像质; 同时杂散光产生的信噪比为 0.06, 不影响光谱信息的采集。

关键词: 掩膜式; 光谱仪; 光学设计; 光栅; 小型化

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0414001

Light and small mask spectral optical system

Li Pengda¹, Hu Yuan¹, Zhong Xiaoming², Wang Xu¹, Wang Yueqi¹, Li Yiting¹, Luo Qiang³

- (1. Key Laboratory of Opto-electronic Measurement and Optical Informon Transmission Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;
3. Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: The mask spectrometer uses the beam splitter to separate the incident scene into two dimensions: spatial dimension and spectral dimension, then information fusion is used to achieve high spectral resolution of dynamic video signal acquisition. It has wide application value in the field of dynamic hyperspectral imaging. In order to solve the problem of miniaturization of mask spectrometer, for the part of the spectral optical system simplified design of the number of lenses, and the conventional prism was replaced by the grating, the linear dispersion was realized while the structure was further compacted. The problem of stray light generated by the unwanted stages of the grating was analyzed, and the feasibility of the system design was demonstrated. Finally, in the range of 400-1 000 nm, the spectral resolution was less than 4 nm, the average modulation transfer function (MTF) at the full field of view Nyquist frequency was greater than 0.4, and the image illumination uniformity was higher than 0.9, achieved good image quality. Meanwhile, the SNR generated by stray light was 0.06, which did not affect the collection of spectral information.

收稿日期: 2019-12-02; 修订日期: 2020-01-09

基金项目: 北京市科技计划课题 (Z181100003018003)

作者简介: 李鹏达 (1994-), 男, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究工作。Email: 13154223058@163.com

导师简介: 胡源 (1981-), 女, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学工程应用方面的研究工作。Email: huy@cust.edu.cn

Key words: mask type; spectrometer; optical design; grating; miniaturization

0 引言

2011 年, Cao 提出了棱镜掩膜式多光谱成像系统 (PMVIS, Prism-Mask Multispectral Video Imaging System)^[1-2], 该系统采用空间信息复用的方法, 通过空间维和光谱维双路信息获取, 实现了高动态高分辨率的光谱视频采集。相比传统扫描式光谱仪, 不依赖于复杂光学和机械装置, 可以更好适应新型平台的快速发展和搭载需求。目前首个比较成熟的 PMVIS 光学系统是中科院长春光机所刘冰在 2015 年设计研制的可见/近红外视频型成像光谱仪光学系统, 该系统采用传统棱镜形式, 实现了平均光谱分辨率为 10 nm 的设计^[3], 对进一步验证和推广 PMVIS 型光谱仪起到了重要作用。

为了使 PMVIS 更具实际应用价值, 本文针对轻量化这一核心要解决的问题, 提出采用光栅优化分光方式以及光学系统精简优化设计等方法, 实现了 400~1 000 nm 光谱范围下, 平均分辨率小于 5 nm, 全视场 MTF 在奈奎斯特频率处平均调制传递函数 (MTF)

均大于 0.4, 系统光学总长度为 165.36 mm, 使光谱仪在高性能前提下更加趋于小型化。同时分析了新的分光形式可能带来杂散光的问题, 最终信噪比为 0.06, 在光谱采集可容忍范围内。

1 工作原理及其参数计算

PMVIS 系统包括 1) 物镜、2) 分光棱镜、3) 掩膜板、4) 准直模块、5) 分光模块、6) 会聚模块六个部分。为了同时获取空间高分辨率的实时视频监控和高光谱分辨率, 物镜对远处所成的像由分束棱镜按一定能量比例分为两路, 两路系统具有相同的目标视场, 如图 1 所示。一路透过分束棱镜进入 RGB 相机, 生成目标的彩色视频, 另一路通过分束棱镜的反射后, 成像在掩膜板 (掩膜板上刻有狭缝) 上, 再经过准直模块、分光模块、会聚模块后, 进入灰度相机, 生成含光谱信息的灰度视频图像, 最后通过图像处理算法获得清晰的光谱视频图像。掩膜板的尺寸与 RGB 相机的靶面尺寸一致, 保证光谱面和成像面具有相同的观察视场, 用于实现光谱维和空间维的信息融合。

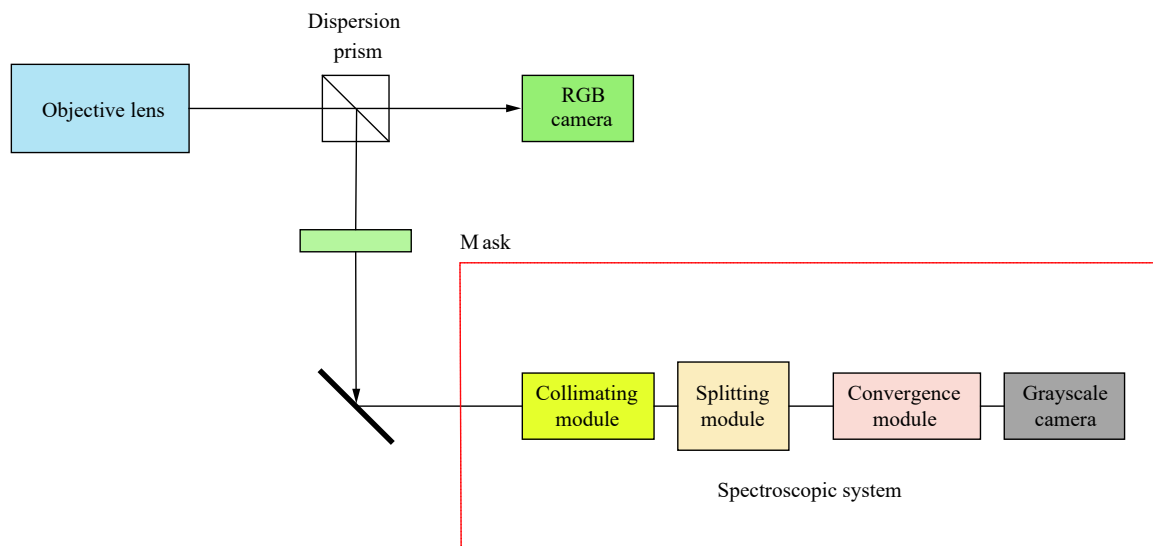


图 1 系统整体原理图

Fig.1 System overall schematic

系统中物镜可以选择现有成熟的商业产品, 而光谱分光光学系统较为复杂, 设计难度较大, 在整体中起决定性作用, 因此本文主要承担的设计是光谱分光系统, 物镜不作为本次研究重点。

棱镜的体积较笨重, 其色散具有很大的非线性且不均匀, 而光栅色散均匀, 分辨率高, 可以调制特定级次衍射光的出射角度和能量等特点, 在小型化设计中具有极大的优势。因此在本研究中选择闪耀光栅作

为分光元件,在保证色散的前提下,避免了二级衍射谱线干扰问题,并且折转光路有利于整个结构轻小型化。

光栅色散是衍射和干涉现象的综合作用,通过控制光栅常数 d 和光束入射角度 θ 来计算光栅刻痕密度,而光栅刻痕密度对光谱成像系统的光谱分辨率起决定性作用,光谱分辨率会随着光栅刻痕密度的增大而增大,光栅刻痕密度满足光栅方程:

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (1)$$

因光栅衍射角度 θ 的限制,且光栅的刻痕密度 p 为光栅常数 d 的倒数,则有^[4-5]:

$$\sin \theta = \frac{m \lambda}{d} < 1 \quad (2)$$

$$p = \frac{1}{d} < \frac{1}{m \lambda} \quad (3)$$

在公式 (3) 中,闪耀光栅工作衍射级次为一级则 $m=1$ 。系统设计时为保证所有工作谱段都能达到光谱分辨率的要求,选用边缘条件 $\lambda=1\ 000\ \text{nm}$,由以上公式可计算出 $p \leq 1\ 000\ \text{lp/mm}$ 。光栅的总刻痕数目直接决定光栅的光谱分辨率,总刻痕数目大,光谱分辨率就高,总刻痕数目少,可覆盖更宽的工作光谱范围,则有:

$$\delta \lambda = \frac{d \lambda}{d \theta} \Delta \theta = \frac{d \cos \theta}{m} \frac{\lambda}{N d \cos \theta} = \frac{\lambda}{m N} \quad (4)$$

式中: $\delta \lambda$ 为光谱分辨率; N 为光栅的总刻痕数。在光谱系统的设计过程中,设计应用的光栅分辨率应高于光谱系统的光谱分辨率,系统工作波长在 $400 \sim 1\ 000\ \text{nm}$,根据需求分辨率达到 $5\ \text{nm}$ 即 $\delta \lambda=5\ \text{nm}$,则通过公式 (4) 得到 $N > 200\ \text{lp}$ 。

经过上述计算,刻线数目太少则分光本领太低,刻线数太大又造成单一衍射级次光能不足,且后面光学系统体积会相应增大,为减小整体系统的体积以及现有商业产品规格,综合考虑之后,选择 $254\ \text{lp/mm}$ 的反射闪耀光栅^[6],线宽约为 $3.9\ \text{nm}$,光栅的总刻线数选择 $2\ 032\ \text{lp}$,可计算光栅的尺寸大小约为 $8\ \text{mm}$ 。该系统选用灰度相机探测像元尺寸为 $3.45\ \mu\text{m}$ 。由经验公式 (5) 可以计算出会聚模块焦距 f :

$$\theta = 2 \arctan \left(\frac{\delta}{2f} \right) \quad (5)$$

δ 为分开的像元大小,经过计算选择会聚模块的焦距为 $30\ \text{mm}$ 。

光谱分辨率由准直模块前掩模板的入射狭缝和分光模块的角色散率共同决定。文中所选用光谱维探测相机分辨率为 $2\ 480 \times 2\ 048\ \text{pixel}$,像素尺寸为 $3.45\ \mu\text{m}$ 。因光谱带宽为 $600\ \text{nm}$,为实现平均光谱分辨率 $5\ \text{nm}$,理论上最低需要获取 120 个光谱通道,所以设置掩模板上光谱维方向狭缝阵列为 10 个,可计算出每个狭缝宽度方向对应像素为 $2\ 480/10/120 \approx 2\ \text{pixel}$,即狭缝宽度为 $6.9\ \mu\text{m}$ 。为使探测器能够接受到足够的能量,刻划狭缝大小为 10×2 像元区间,即 $34.5 \times 6.9\ \mu\text{m}^2$ 。

2 子模块光学设计

光谱分光系统采用反向设计思路,由探测器性能和光栅线对数计算会聚模块和准直模块设计参数。会聚模块的初始结构在专利结构中选择,较小的系统 F 数,可以保证得到的图像不失真也能保证接收到较多的光谱信息^[7],会聚模块设计参数如表 1 所示。

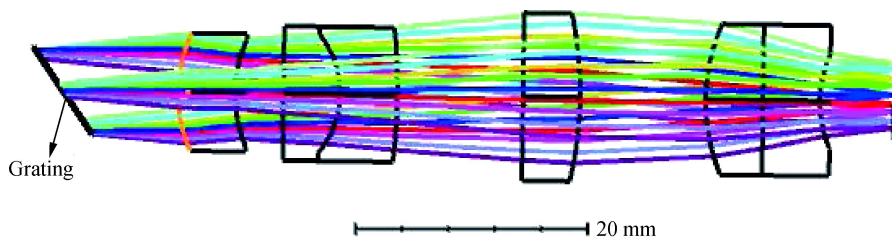
表 1 会聚模块系统参数

Tab.1 Convergence module system parameters

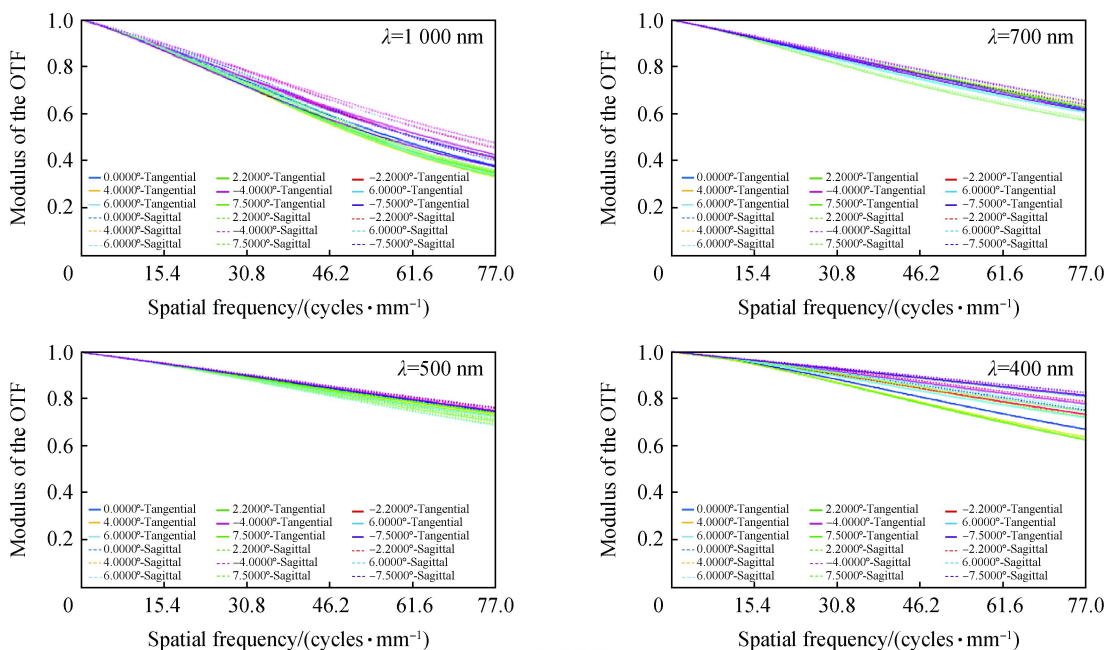
Parameter	Value
Wavelength range/nm	400 -1 000
Pixel/pixel	2 480×2 048
Pixel size/ μm	3.45
Focus of convergence module/mm	30
Grating notch density/lp·mm ⁻¹	254
F number	4
Resolving power/nm	5
Field angle/(°)	± 7.5

由于系统包含光栅元件,使得视场非对称,所以设计时设置全视场进行优化。为达到轻小型化的目的需控制镜片数量及大小,系统中存在较大的球差和色差,矫正难度高。因此系统使用两组胶合镜对色差及球差进行矫正,两片单透镜使用消色差材料。设计完成的会聚模块系统如图 2 所示。由此可以看出使用较少的镜片会聚模块仍达到良好像质且系统体积较小,满足轻小型化的目的^[8]。

为保证与空间维视场一致,需要放大倍率为 1,因此选用与会聚模块对称结构,系统参数如表 2 所示。同时为与光栅及会聚模块更好的拼接,准直模块设计



(a) 会聚模块系统结构图
(a) Convergence module system structure diagram



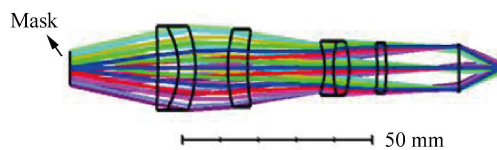
(b) 会聚模块MTF
(b) Convergence module MTF

图 2 会聚模块系统设计

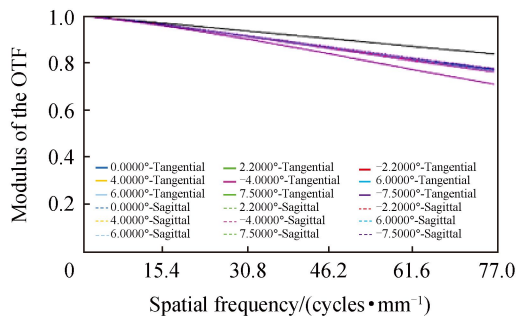
Fig.2 Convergence module system design

要考虑到光瞳匹配以及装调等问题^[9], 准直模块光学系统采用像方远心系统。考虑到系统中光谱范围较大, 会存在较大的色差, 因此准直模块还需要重点校正色差。上述几个问题叠加在一起均增加了系统总体设计难度。设计完成的准直模块如图 3 所示。图 3(a) 为准直模块结构图; 图 3(b) 显示在截至频率处 MTF 接近衍射极限; 从图 3(c) 可以看出掩膜板处点

列图光斑最大 RMS 为 3.1 μm 小于掩膜板狭缝宽度,



(a) 准直模块系统结构图
(a) Collimation module system structure diagram

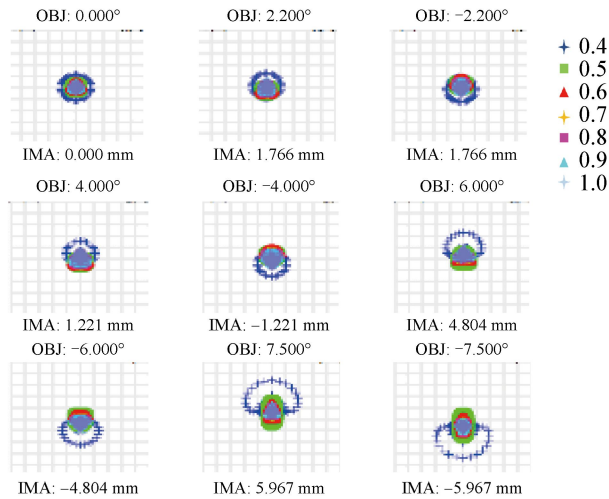


(b) 准直模块MTF
(b) Collimation module MTF

表 2 准直模块系统参数

Tab.2 Collimation module system parameters

Parameter	Value
Wavelength range/nm	400 -1000
Focus of collimation module/mm	30
F number	4
Field angle/(°)	±7.5
Mask slit width/μm	6.9



(c) 掩模板处点列图
(c) Spot diagram at mask

图 3 准直模块系统设计

Fig.3 Collimation module system design

满足对掩模版空间分辨的要求,同时系统像质良好,MTF 接近衍射极限。

3 系统整体设计结果

将准直模块、分光模块、会聚模块三部分进行拼接,这里着重考虑准直模块与会聚模块在分光面上的光瞳匹配问题,具体采用像方远心光路设计来实现。

拼接后的系统整体结构图如图 4 所示。系统的焦距为-18.5 mm, F 数为 3.9。

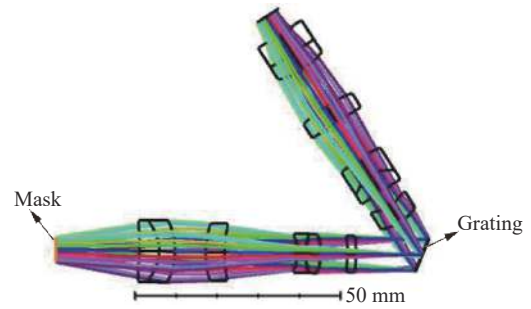
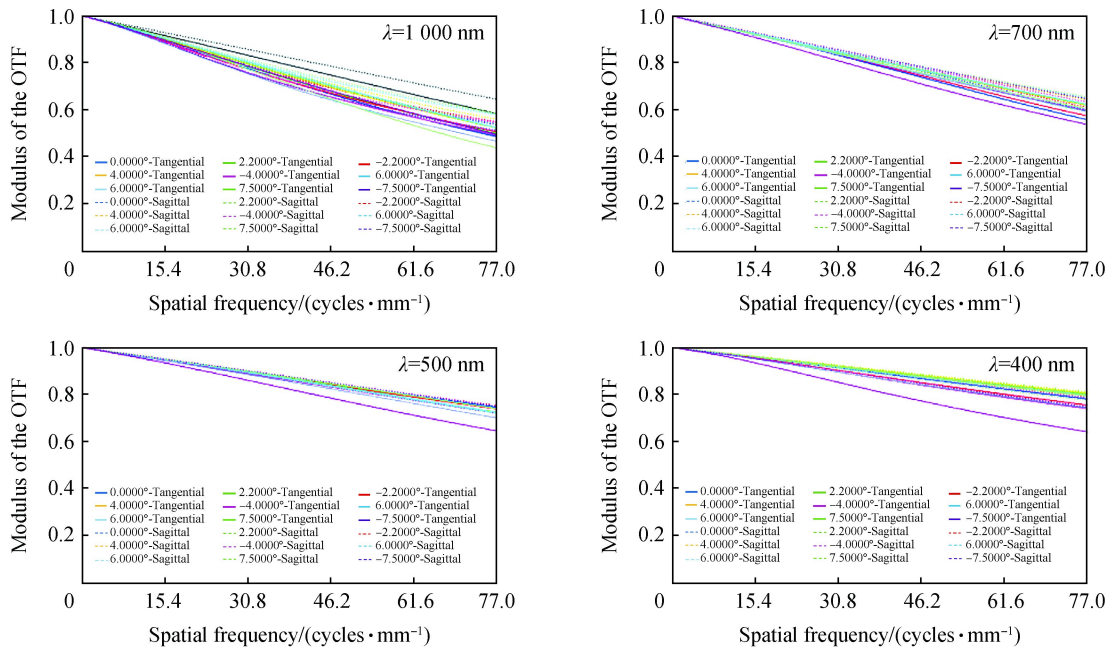


图 4 系统整体结构图

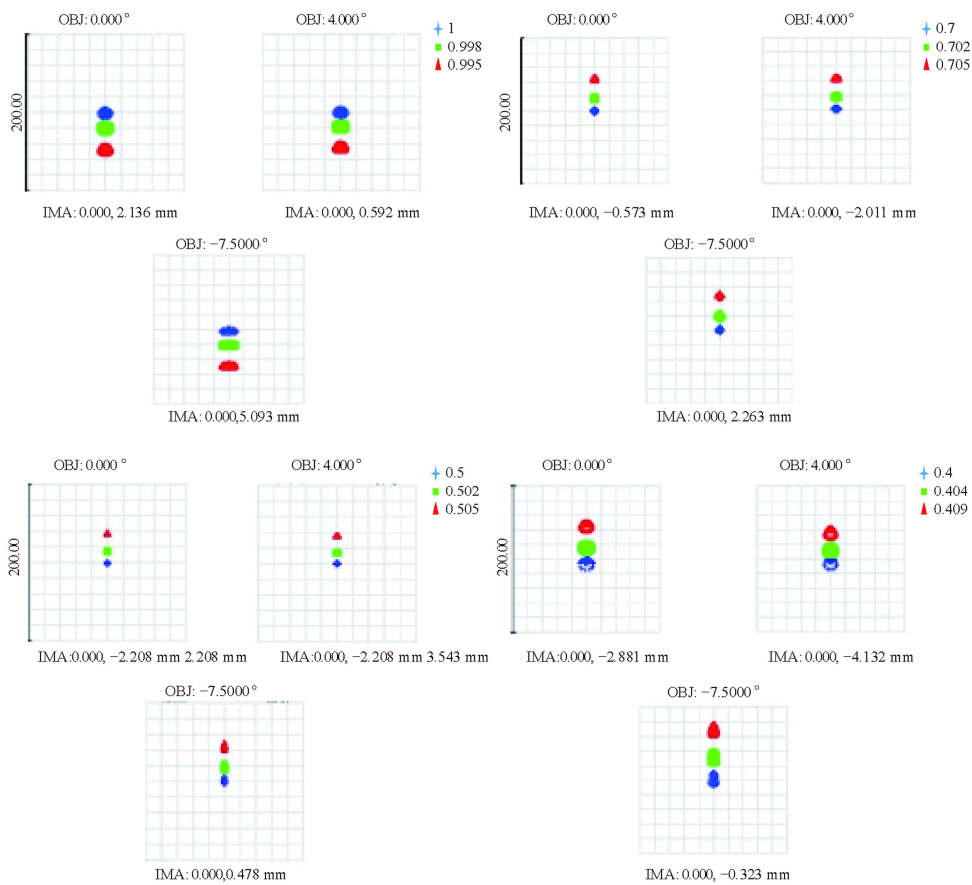
Fig.4 System overall structure

图 5(a) 表示光学系统各波段传递函数 (MTF) 均大于 0.4; 从图 5(b) 中可以看出光学系统在 1 000、700、500、400 nm 处的分辨率分别为 2、2、2、4 nm, 在 400 nm 处达到最低分辨率, 450 nm 处分辨率可达 3 nm, 其余个波段均可达到 2 nm 分辨率; 图 5(c) 中目标能量的 80% 包含在 3.45 μm 半径内, 并且如图 5(d) 所示像面照度均匀高于 0.9, 图 5(e) 中畸变小于 3%, 光学系统像质良好。系统使用四个胶合镜组和四片单透镜完成设计, 光学总长度为 165.36 mm。



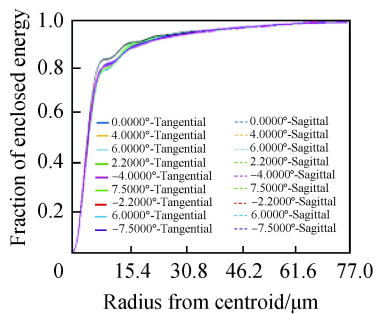
(a) 系统各个波段MTF

(a) MTF of each band of the system



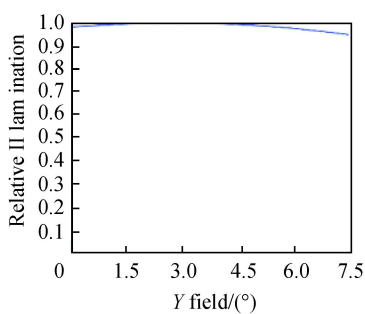
(b) 系统各个波段点列图

(b) Spot diagram of each band of the system



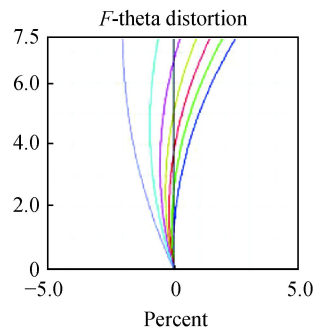
(c) 系统像面圈内能量

(c) Encircled energy of the system image



(d) 系统像面像面照度曲线

(d) Illumination curve of the system



(e) 系统的畸变曲线

(e) Distortion curve of the system

图 5 光谱分光系统评价

Fig.5 Spectral spectroscopy evaluation

4 杂散光分析

采用光栅作为分光元件的缺点是无用的衍射级次将产生杂散光对像面产生影响,即使是闪耀光栅也只有约 80%的能量集中在工作级次,因此建立光学系统杂散光分析模型,分析光栅无用级次的杂散光影响。根据闪耀光栅目前的工艺水平,无用级次零级、二级的反射率均为为 10%;光栅工作级次一级衍射反

射率为 80%。运用蒙特卡洛方法追迹光线 127 939 条,分析光栅无用级次产生杂散光对一级衍射的信噪比^[10],到达像面的辐照度如图 6 所示。

由图 6 可以看出无用级次产生的杂散光能量集中在工作级次,但由图 6(a)可以看出工作级次到达像面的最大辐照度值为 $1.0067 \times 10^9 \text{ W/m}^2$;图 6(b)零级衍射到达像面的最大辐照度值为 $1.0399 \times 10^7 \text{ W/m}^2$,

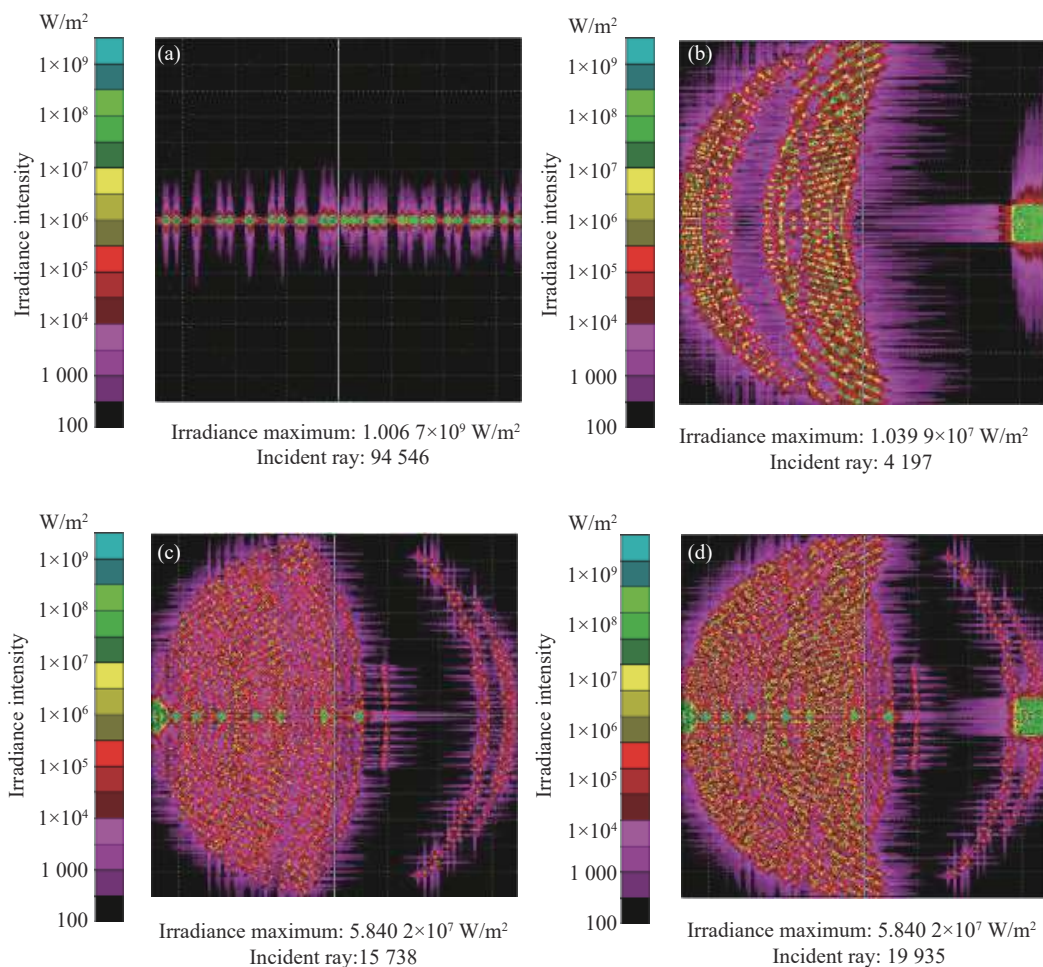


图 6 像面辐照度分析图。(a) 一级衍射; (b) 零级衍射; (c) 二级衍射; (d) 零级和二级衍射

Fig.6 Image surface irradiance analysis diagram. (a) First order diffraction; (b) Zero order diffraction; (c) Second order diffraction; (d) Zero order and second order diffraction

能量主要集中在工作级次的右边; 图 6(c) 二级衍射到达像面的最大辐照度值为 $5.8402 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, 产生的能量主要集中在工作级次的左边。图 6(d) 为零级衍射和二级衍射共同产生的杂散光最大辐照度值为 $5.8402 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ 。可以分析出二级衍射对工作级次影响较大信噪比为 5.8%, 零级衍射的信噪比为 1%, 产生的杂散光在可接受范围之内。

5 结 论

文中设计了结构更为简单, 重量更为轻便的轻小型掩膜式光谱分光系统。文中运用的模块化设计, 简化的优化系统的环节, 减小了各个部分像差的互相影响, 使像质更为优良。在球面设计时使镜片数量的得到简化并且像质良好, 使系统达到轻小型化的目地并

进行杂散光分析验证了光栅在小型化的可行性。文中设计的系统平均分辨率均在 4 nm 以下, 全波段 MTF 在奈奎斯特频率处平均调制传递函数 (MTF) 均大于 0.4, 系统光学总长度为 165.36 mm , 占空间面积为 $93 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm}$, 总重量 30.32 g 。并且具有结构简单, 光谱分辨均匀, 能量集中, 便于携带等特点。

参考文献:

[1] Cao X, Du H, Tong X, et al. A prism-mask system for multispectral video acquisition [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2423-2435.
 [2] Cao X, Tong X, Dai Q, et al. High resolution multispectral video capture with a hybrid camera system[C]//Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on. IEEE,

- 2011; 297-304.
- [3] Liu Bing, Liu Ying, Li Can, et al. Design of optical system for miniature visible/near-infrared real-time imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0630002. (in Chinese)
刘兵, 刘英, 李灿, 等. 轻小型可见/近红外实时成像光谱仪的光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0630002.
- [4] Yang Guojun, Qi Xiangdong, Yu Haili, et al. Development of mosaic technology for large-size reflective grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(3): 542-551. (in Chinese)
杨国军, 齐向东, 于海利, 等. 大尺寸反射式光栅拼接技术的研究进展[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(3): 542-551.
- [5] Zhang Tianyi, Zhu Yongtian, Hou Yonghui, et al. Construction of a LAMOST high resolution spectrograph [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 148-155. (in Chinese)
张天一, 朱永田, 侯永辉, 等. LAMOST高分辨率光谱仪研制[J]. *中国光学*, 2019, 12(1): 148-155.
- [6] Chen Wei, Zheng Yuquan, Xue Qingsheng. Airborne imaging spectrometer with wide field of view and large relative-aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 15-21. (in Chinese)
陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 机载宽视场大相对孔径成像光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 15-21.
- [7] Chen Chenxiyang, Jin Chunshui, Wang Jun, et al. Design of a compact spectrometer under grazing incidence conditions for near-edge X-ray absorption spectroscopy [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 265-278. (in Chinese)
陈晨曦阳, 金春水, 王君, 等. 小型掠入射式近边X射线吸收谱仪的设计[J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 265-278.
- [8] Yuan Liyin, Xie Jianan, Hou Jia, et al. Optical design of compact infrared imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0418001. (in Chinese)
袁立银, 谢佳楠, 侯佳, 等. 紧凑型红外成像光谱仪光学设计[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(4): 0418001.
- [9] Yao Xuefeng, Cui Jicheng, Yin Lu, et al. Calibration devices for band range of echelle spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 304-311. (in Chinese)
姚雪峰, 崔继承, 尹禄, 等. 中阶梯光栅光谱仪波段范围校正装置[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 304-311.
- [10] Zhang Tianyi, Hou Yonghui, Xu Teng, et al. Stray light analysis on LAMOST high-resolution spectrograph [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0117003. (in Chinese)
张天一, 侯永辉, 徐腾, 等. LAMOST高分辨率光谱仪杂散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0117003.