

小人射角棱镜成像光谱仪光学系统设计

陈 杨^{1,2} 王跃明^{1,3}

(¹ 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; ² 中国科学院大学, 北京 100049)

³ 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083

摘要 研究了棱镜色散型光谱仪的特点及分光原理, 提出一种新型的小入射角棱镜分光光谱仪的设计方法。该光谱仪采用了全反射光路, 不需要加入校正透镜, 避免因色差引起的像差, 成像质量好, 可以有效地校正光谱弯曲。给出了成像光谱仪系统设计实例, 运用光学设计软件 Zemax 对成像光谱仪光学系统的成像质量进行了分析。结果表明, 光学系统在各个波段的光学传递函数均接近衍射极限, 光谱弯曲很小, 完全满足设计指标要求。

关键词 光学设计; 棱镜光谱仪; 小人射角

中图分类号 TH743 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0922002

Optical Design of Prism Spectrometer System with a Small Incident Angle

Chen Yang^{1,2} Wang Yueming^{1,3}

¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China

³ Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China

Abstract The characteristics and principle of prism spectrometer are studied and a new method to design the prism spectrometer system with a small incident angle is proposed. This type of spectrometer uses reflective triplet optical path, so there is no need to add the correcting lens. The system has no aberration caused by the chromatic aberration and has excellent imaging quality. The spectral inflection can be corrected effectively. An optical system of imaging spectrometer is designed. The imaging quality is analyzed by using optical design software. The result shows that the modulation transfer function (MTF) of the system at different wavelengths is close to the diffraction limit and the design requirements are fully met.

Key words optical design; prism spectrometer; small incident angle

OCIS codes 120.4570; 300.6190; 120.4820

1 引 言

高光谱成像仪是 20 世纪 80 年代初在多光谱遥感成像技术的基础上发展而来的新一代光学遥感仪器, 能够以高光谱分辨率获取目标的连续光谱图像, 同时得到空间和光谱信息。它对于探测地表构成及其变化具有特殊的识别能力, 作为一种重要的观测手段, 在农业、森林、矿产、水资源、军事等方面得到了广泛的应用^[1]。

目前超光谱成像仪的分光方式主要有棱镜色散型、光栅色散型和傅里叶变换型 3 种^[2-3]。色散型高光谱成像仪的光学部分通常由望远系统和分光系

统组成。地物目标经望远系统成像在分光系统的入射狭缝面上, 分光系统对狭缝处的像进行色散, 将不同波段的光信号投射到探测器的对应行, 再经沿轨方向推扫, 获得图谱合一的图像信息。光谱仪系统采用的分光技术直接影响整个超光谱成像仪的性能、结构复杂度、重量和体积等。而棱镜光谱仪具有能量利用率高、杂散光少、波长范围宽、加工简单及可靠性高等特点, 得到了广泛的应用^[4-5]。

本文提出了一种基于自准直结构的棱镜成像光谱仪, 光谱仪的准直光束和色散后的会聚成像光束近似成自准直关系, 有效地校正了光谱弯曲, 可实现

收稿日期: 2013-03-06; 收到修改稿日期: 2013-04-25

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121102)

作者简介: 陈 杨(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: chenyl988@yahoo.cn

导师简介: 王跃明(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光谱成像技术方面的研究。E-mail: wangym@mail.sitp.ac.cn

宽光谱覆盖(0.4~2.5 μm)的成像光谱系统。

2 理论研究

棱镜分光光谱仪主要利用了棱镜的色散原理，

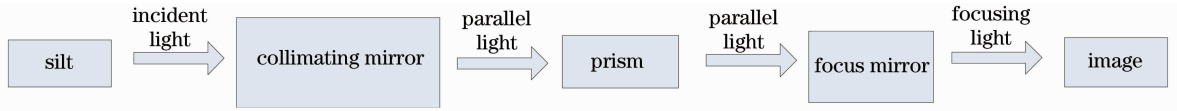


图 1 棱镜光谱仪基本结构

Fig. 1 Basic structure of prism spectrometer

在棱镜处，入射光线与出射光线均为平行光，基于这一点，可以使发散镜与会聚镜共用同一组光学系统，实现棱镜面处光线小角度入射。

图 2(a)为一离轴三反系统，平行光线入射，依次经过反射镜 M1、M2、M3 反射后成像。其中，入瞳在 P1 处，出瞳在 P2 处，像面在 S 处。根据光路的可逆性，在 S 处的点物发出的光线，依次经过反射镜 M3、

其基本结构如图 1 所示。光线由狭缝入射，经过准直镜发散成平行光，被棱镜分光，再经会聚镜聚焦成像在像面处。在棱镜面处，光线入射角度越大，则引起的光谱弯曲越严重，成像质量降低越多。

M2、M1 反射后，发散成平行光出射。在 P1 处放置其中一面为反射面的棱镜，则光线平行入射后经过棱镜分光并反射，仍然为平行光，依次经过 M1、M2、M3 反射成像，如图 2(b) 所示。控制棱镜面处入射光线与出射光线的角度，即可将物像分离^[6]。

目前典型的棱镜光谱仪有折反射式离轴球面光谱仪(COSIS)、离轴全球面成像光谱仪(OASIS)，离

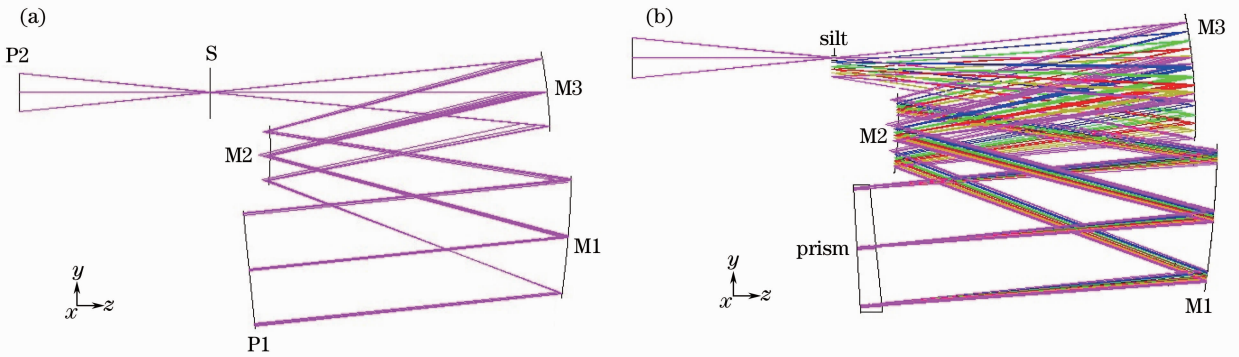


图 2 系统结构示意图。(a)离轴三反系统；(b)改进后的棱镜光谱仪

Fig. 2 System structure schematic. (a) Off-axis three-mirror system; (b) improved prism spectrometer

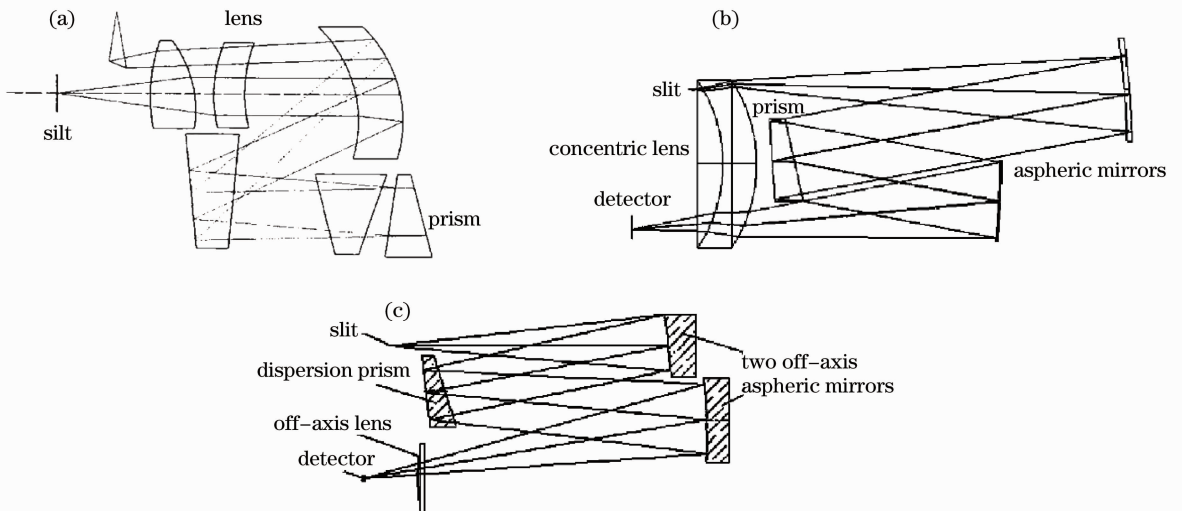


图 3 常见光谱仪系统结构。(b)折反射式离轴球面光谱仪；(b)离轴全球面成像光谱仪；(c)离轴非球面准直会聚型光谱仪
Fig. 3 Common system structure schematic. (a) COSIS; (b) OASIS; (c) off-axis aspheric collimation focus spectrometer

轴非球面准直会聚光谱仪等^[7]。它们都使用了校正透镜,这样降低了系统的学效率,并且需要校正由于透镜色差引起的像差,光线入射棱镜时入射角较大,易引起光谱弯曲。而这种棱镜分光光谱仪由于采用了全反射光路,不需要加入校正透镜,没有因色差引起的像差,能量利用率高。且通过3面反射镜来校正像差,可调变量多。光线小角度入射棱镜,成像质量好,可以有效地校正光谱弯曲。此外,由于离轴三反系统可以做到较小的相对孔径,因此该棱镜光谱仪同样可做到较小的 F 数。

采用的离轴三反初始系统出瞳位于像面 S 后,这种类型的棱镜光谱仪适于搭配具备二次成像性质、出瞳在像面前的前置物镜。

3 系统实例设计

根据上述方法设计一套成像光谱仪,其系统指标如下: $f=1500\text{ mm}$, F 数为5,波长范围为 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$,像元尺寸大小为 $30\ \mu\text{m}$,探测器像面光谱维长度为 3.15 mm ,即谱段间隔平均约为 20 nm ,狭缝长度为 30 mm 。

望远镜选择二次成像的同轴三反系统,如图4所示。焦距 $f=1500\text{ mm}$,视场角大小为 1.2° ,系统 F 数为5。光线平行入射,经过主镜 $M1$ 、次镜 $M2$ 、反射镜 $R1$ 、三镜 $M4$ 、反射镜 $R2$ 后成像,其中入瞳在 $M1$ 位置处,出瞳在 P 处, P 距离像面 87.58 mm 。

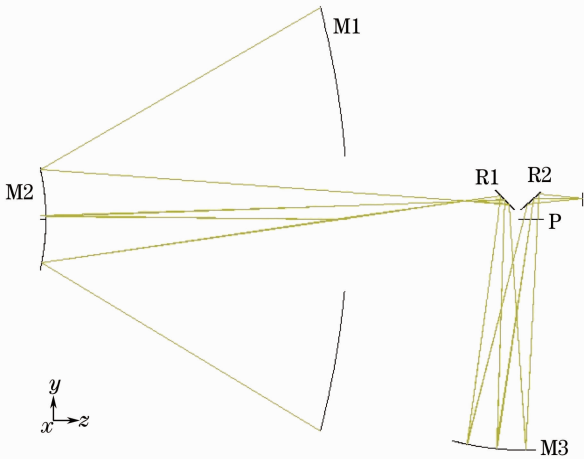


图4 望远镜系统光路

Fig. 4 Optical layout of telescope system

对于光谱仪部分,首先设计离轴三反系统,根据光瞳匹配原则,保证系统出瞳在像面后 87.58 mm ,

F 数为5,系统像面大小为 30 mm ,与狭缝长度一致。初始结构如图5所示,其中,入瞳在 $P1$ 处,出瞳在 $P2$ 处。

在 S 处放置狭缝, $P1$ 处放置分光棱镜并调整角度,调整系统,最终得到了全反射棱镜分光光谱仪,如图6所示。体积尺寸约为 $180\text{ mm}\times 120\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。

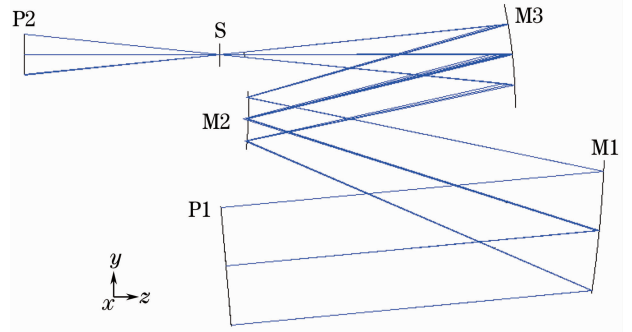


图5 离轴三反初始结构

Fig. 5 Off-axis three-mirror system original structure

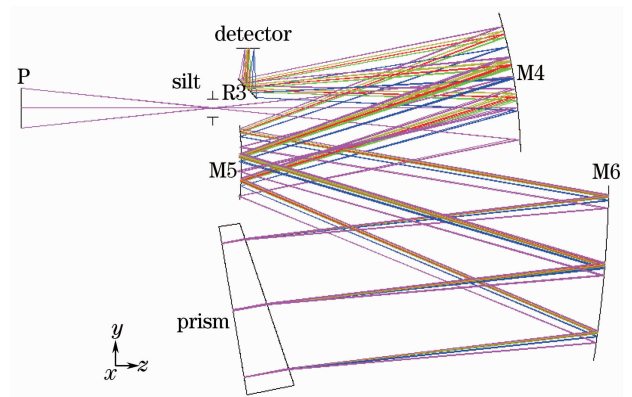


图6 全反射棱镜分光光谱仪光路图

Fig. 6 Optical layout of total reflective triplet prism spectrometer system

将望远镜与光谱仪拼接,得到了完整的成像光谱仪,如图7所示。系统结构参数如表1所示。系统成像质量如图8所示。可以看出,该成像光谱仪各视场不同波长的调制传递函数在奈奎斯特空间频率处为 16.7 lp/mm ,均接近衍射极限,性能良好。光谱仪不同波长处的光谱弯曲如图9所示,最大弯曲小于像元尺寸的 20% 。由于采用了棱镜分光,光谱仪存在一定的色散非线性,如图10所示。

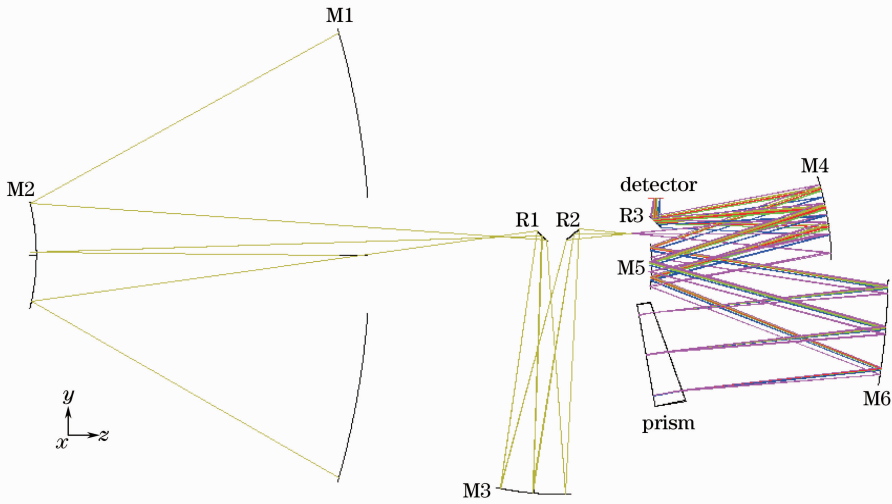


图 7 完整成像光谱仪系统光学结构

Fig. 7 Optical layout of imaging spectrometer system

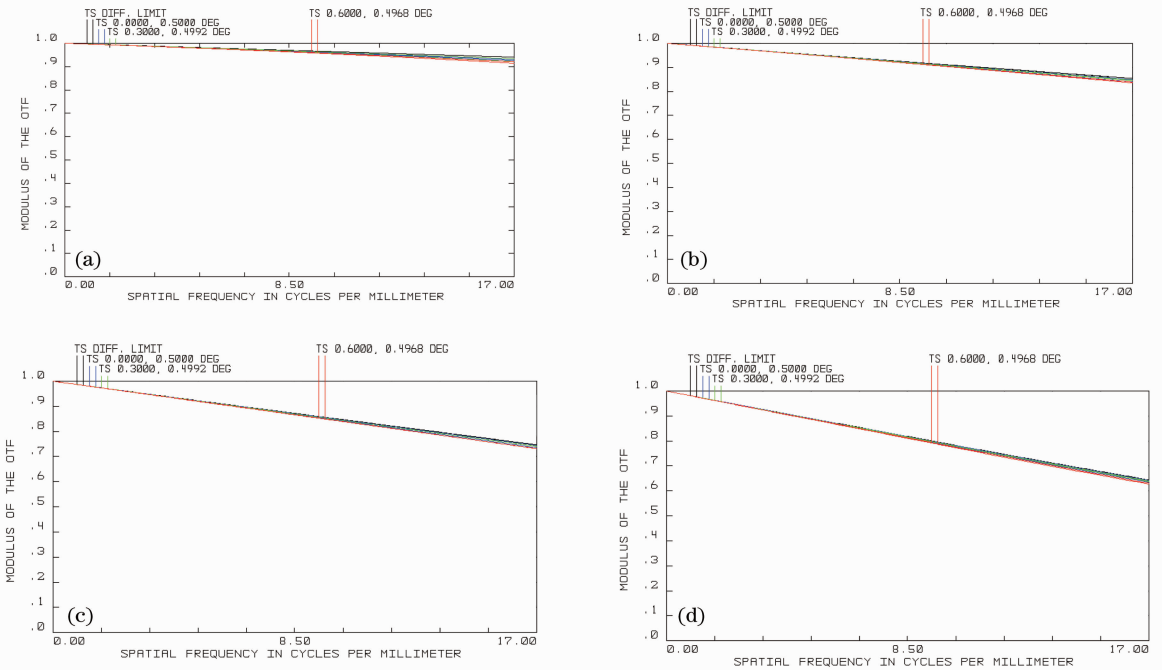


图 8 不同波长的调制传递函数。(a) $0.4 \mu\text{m}$; (b) $1 \mu\text{m}$; (c) $1.75 \mu\text{m}$; (d) $2.5 \mu\text{m}$

Fig. 8 Modulation transfer function of different wavelengths. (a) $0.4 \mu\text{m}$; (b) $1 \mu\text{m}$; (c) $1.75 \mu\text{m}$; (d) $2.5 \mu\text{m}$

表 1 光学系统结构参数

Table 1 Optical system structure parameter

| Surface | Radius /mm | Conic | Thickness /mm | Glass |
|---------|------------|-----------|---------------|--------------|
| M1 | 566.496106 | -0.952591 | -221.771420 | Fused quartz |
| M2 | 153.312035 | -1.844026 | 350.457502 | |
| R1 | | | 163.722781 | |
| M3 | 208.561050 | -0.502887 | -171.722781 | |
| R2 | | | -175.471254 | |
| M4 | 219.574085 | 0.015736 | 126.038801 | |
| M5 | 155.264748 | -0.382285 | -166.038802 | |
| M6 | 529.508869 | -1.408593 | 176.038802 | |
| Prism | | | | |

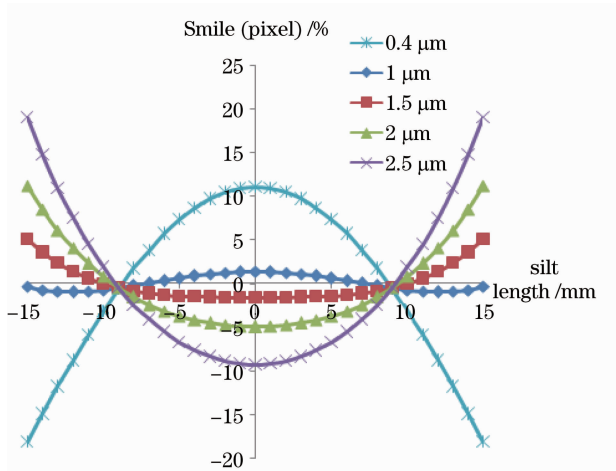


图 9 不同波长的光谱弯曲

Fig. 9 Smile of different wavelengths

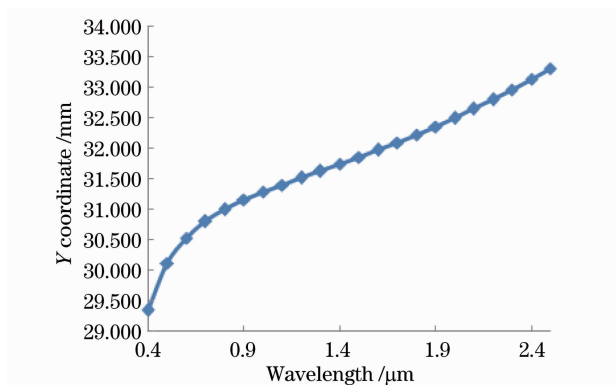


图 10 光谱仪的色散非线性度

Fig. 10 Dispersion non-linearity of spectrometer

4 结 论

在研究棱镜分光光谱仪的特点与分光原理的基础上,提出了一种小入射角全反射棱镜分光光谱仪的设计方法,并通过该方法设计了一款成像光谱仪。

分析结果表明,该光谱仪具有波长范围宽,能量利用率高,无色差引起的像差,光谱畸变小,调制传递函数高等优点。

参 考 文 献

- 1 Yu Bingxi. Research of high resolution imaging spectrometer [J]. Optics Mechanics and Electronics Information, 2000, 17(4): 1-5.
禹秉熙. 高分辨率成像光谱仪(C-HRIS)研究 [J]. 光机电信息, 2000, 17(4): 1-5.
- 2 Wang Yueming, Lang Junwei, Wang Jianyu. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology [J]. Laser & Optoelectronics Process, 2013, 50(1): 010008
王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010008
- 3 Yang Jin, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.*. Design of Dyson concentric optical hyperspectral imaging system with achromatized Féry prism [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1130003
杨 晋, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 基于 Dyson 同心光学系统的消色差 Féry 棱镜高光谱成像仪的设计 [J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1130003
- 4 Zheng Yuquan, Yu Bingxi. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers [J]. Remote Sensing, 2002, 6(1): 76-79.
郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览 [J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 76-79.
- 5 Wang Yiqun, Yan Changxiang, Miao Chun'an. Choice of spectral splitting modes in space-borne hyper-spectral imager [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(4): 304-308.
汪逸群, 颜昌翔, 苗春安. 星载高分辨率超光谱成像仪分光方式的选择 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(4): 304-308.
- 6 L G Cooka, J F Silnya. Imaging spectrometer trade studies; a detailed comparison of the offner-chrisp and reflective triplet optical design forms [C]. SPIE, 2010, 7813: 78130F
- 7 Wang Xin. Study About the Optical System of the Prism Hyperspectral Imaging Camera [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
王 欣. 棱镜分光超光谱成像仪光学系统的研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2010.

栏目编辑: 韩 峰