

文章编号 1004-924X(2007)11-1656-06

高光谱短波红外地物光谱仪的光机设计

李 新, 郑小兵, 洪 津, 汤伟平, 张国伟, 寻丽娜

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 遥感研究室, 安徽 合肥 230031)

摘要:基于平场凹面光栅分光和线列阵探测器探测的最新设计方案,进行了短波红外波段地物光谱仪的光机设计。仪器采用光纤导光,两个独立单元分别探测,最大限度地简化了光学及结构设计。更换前置光学系统改变探测视场,视场内的辐射经过前置光学系统均匀地照亮入射光纤,保证了两个探测单元的视场相同。根据入射光通量、光谱分辨率和狭缝的关系确定入射狭缝的大小,仪器光谱覆盖 900~2 400 nm,光谱分辨率优于 12 nm,适合野外短波红外波段的探测。

关键词:高光谱;地物光谱仪;短波红外;遥感;光学设计

中图分类号:TP732 **文献标识码:**A

Optical and mechanical design of SWIR hyperspectral field spectroradiometer

LI Xin, ZHENG Xiao-bing, HONG Jin, TANG Wei-ping, ZHANG Guo-wei, XUN Li-na

(Remote Sensing Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on flat field diffraction gratings and array detectors, the optics and structures of a Shortwave Infrared(SWIR) field spectroradiometer were designed. The spectroradiometer comprises of two cells and guides light by fiber optic to simplify the optical designs of system and structure. In order to make two cells have the same Field of View(FOV), a pre-optical system was designed to ensure the radiance of any point in the FOV for illuminating all fibers uniformly. The FOV can be changed with different pre-optical systems also. Based on the relation of the luminous flux and the spectral resolution with incidence slit, the size of slit was deduced. The spectral range of radiometer is 900~2 400 nm with the resolution better than 12 nm. Experimental results show that the instrument can meet the requirements in field measurements.

Key words: hyperspectra; spectroradiometer; Shortwave Infrared(SWIR); remote sensing; optical design

1 引 言

地物目标的特征光谱测量、辐射测量,遥感仪器的场地定标都需要高光谱的地物光谱仪^[1]。短波红外波段是遥感应用的一个重要波段,广泛应用于工业、农业、环境监测等各方面^[2]。随着遥感技术的发展,短波红外波段地物光谱仪的应用越来越重要^[3-4]。

由于可见至短波(SWIR)红外波段(380~1 000 nm)使用成熟的 Si 探测器,使此波段光谱仪技术发展较为成熟,国内外均研制成功了高性能的商业仪器^[5]。而短波红外波段由于受到探测器性能的制约,仪器的发展受到很大的限制。早期研制的短波红外光谱仪器在光谱分辨率、使用便携性、信噪比等主要指标上与使用要求相差甚远。

近年来,短波红外探测器技术的发展^[6-7]和新型平场凹面光栅的出现^[8],为研制高性能的短波红外光谱仪提供了可能。本文采用平场凹面光栅分光、线阵列探测器探测这一最新设计方案,结合短波红外仪器的使用要求,进行了光谱仪的设计,并主要就仪器光机方面的设计做了较详细论述。

2 总体设计

整台仪器的工作原理如图 1 所示。由透镜 L_1 、 L_2 组成的前置光学系统使视场范围内目标的反射均匀地照亮入射光纤束,每根光纤都接受整个视场范围内相同的光通量,保证了两个探测单元视场的同一性,并可通过更换前置光学系统方便地改变仪器视场。采用光纤束导光,简化了光机结构设计,并在使用上更加方便。由平场凹面光栅和线阵列探测器组成的分光探测单元是仪器的核心部分,通过光纤的光照亮狭缝,经过光栅分光、会聚,成像在列阵探测器平面上,各像元输出电信号。由于受到探测器响应波段的限制,对整个探测波段(900~2 400 nm)分为两个独立的分光探测单元进行探测。CPU 产生驱动时序,驱动电路实现探测器的工作时序。探测器输出的模拟信号经过滤波及放大后进行 A/D 转换,由主控电路完成数字信号的存储和显示。

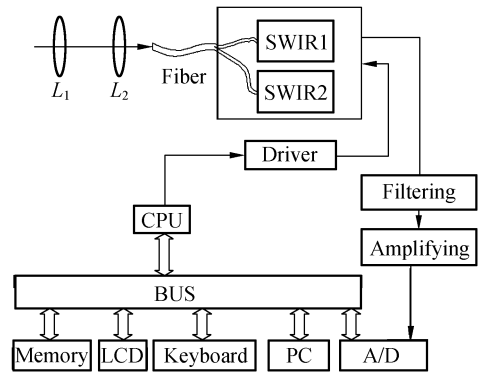


图 1 仪器原理图

Fig. 1 Sketch of instrument principle

3 光学系统设计

3.1 分光探测单元

分光探测单元主要由平场凹面光栅和线阵列探测器组成。平场凹面光栅集分光、会聚、像差校正于一体,将入射狭缝的光谱图像会聚到一个平面上,由线阵列同时探测各光谱的强度信号,如图 2 所示。该系统实现了较大的数值孔径并简化了光机结构设计,分光、探测元件全固化,无运动部件,保证了结构的可靠性和波长稳定性。

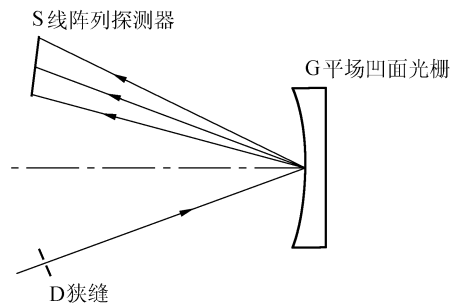


图 2 分光探测结构图

Fig. 2 Structure of diffraction and measurement cell

由于受到光栅覆盖波长范围和探测器响应波长范围的限制,在整个波长范围需要两个分光探测单元来实现。结合系统光谱分辨率、信噪比要求,选择最佳匹配单元。在 SWIR1 波段(900~1 650 nm),光栅的色散优于 72 nm/mm,探测器为 256 元一级热电制冷 InGaAs。在 SWIR2 波段(1 650~2 400 nm),光栅的色散优于 58 nm/mm,探测器为 256 元二级热电制冷扩展 InGaAs。两个探测器的像元宽度均为 50 μm ,相

应系统的光谱取样间隔优于 3.6 nm。

3.2 光纤束

采用光纤束导光可以使光机结构设计进一步简化,并在使用时更加方便。选择光纤时主要考虑光纤的材料、芯径及与探测单元的 F 数匹配。根据系统的要求,选用了芯径为 200 μm 的低 OH 石英光纤。

光纤束在入端随机紧密排列在截面圆内,接受通过前置光学系统的入射光。光纤束在后端分成两束分别进入两个分光探测单元。两光纤束出端的光纤重新排列,每束光纤中的所有光纤紧密排列并且中心在一条直线上。光纤末端的出射光照亮狭缝或直接作为狭缝(光纤末端不加狭缝)入射进分光探测单元进行分光探测。

3.3 前置光学系统

前置光学系统的作用是限制仪器的视场范围并使两个探测单元的视场完全相同。为实现这一目的,将探测目标与前置光学系统组成柯拉照明系统^[9],如图 3 所示。图中 T —目标; L_1 —物镜; L_2 —场镜; I —光纤入光端面; α —视场角; β —前置光学系统出射角; D_1 —物镜孔径; D_2 —场镜孔径; D_3 —光斑直径; a —物镜场镜间距; b —场镜。

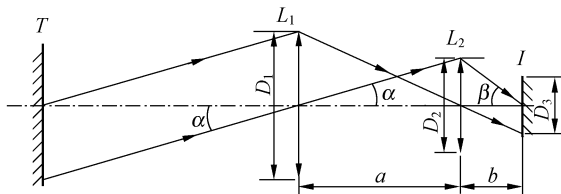


图 3 前置光学系统原理图

Fig. 3 Sketch of pre-optical system

光纤端面间距探测目标经过物镜 L_1 成像在场镜 L_2 上,物镜经过场镜成像在光纤入端面上,即光纤入端的每一点接受整个视场范围内目标的照亮(反射),视场范围内的每一点照亮整个光纤束入端。每根光纤的视场都相同,因此两探测单元的视场也相同。

进行前置光学系统设计时,首先确定系统的技术条件。主要包括:假定目标为无穷远;目标经过前置光学系统在光纤入端所形成的光斑略大于光纤束的排列截面圆;前置光学系统的出射角等于探测单元的孔径角。根据几何光学原理,得出关系式(1)、(2):

$$\text{atan } \alpha = \text{btan } \beta = D_2/2, \quad (1)$$

$$(D_1/2)\tan \alpha = (D_3/2)\tan \beta, \quad (2)$$

式中, α 、 β 、 D_3 可由系统的技术条件给出,只需综合考虑光机加工工艺,即可确定其他未知量。然后,通过 ZEMAX 软件进行优化设计,得出系统的具体尺寸。图 4 是 3° 视场前置光学系统点列图,可以看出视场范围的点经过镜头后形成一个均匀的弥散斑,弥散斑的直径大于排列光纤束的直径,表示视场内的每一点都均匀照亮整个光纤束。其他视场前置光学系统和 3° 视场前置光学系统效果相同,可以方便更换镜头改变视场。

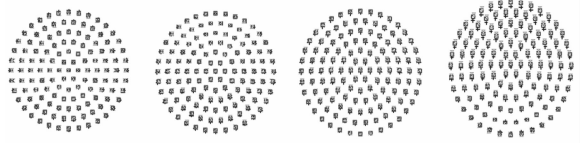


图 4 3° 视场前置光学系统点列图

Fig. 4 Spot diagram of 3° pre-optical system

3.4 狭缝尺寸的确定

狭缝大小与仪器的光谱分辨率、入射光通量、探测器输出直接相关,最终影响到积分时间、增益倍数等电子学参数设置及仪器的信噪比。因此,需综合考虑相关因素确定入射狭缝大小。

首先确定光通量和入射狭缝的关系。假设入射狭缝的宽为 K 、高为 G ,探测器像元的宽为 W 、高为 H ,系统的入射立体角为 Ω ,整个线阵列探测器相应波长范围目标亮度为 L_{ALL} ,系统的透过率为 T (包括前置光学系统的反射、吸收及光纤的耦合、反射、吸收,并认为所有波长均相同)。其中, $\Omega = \pi \tan^2 \beta$ 。为装调方便,入射狭缝的高度 G 大于探测器像元的高度 H 。式(3)可以表示通过入射狭缝的光通量:

$$\Phi_{\text{ALL}} = L_{\text{ALL}} T \Omega K G = \pi L_{\text{ALL}} T \tan^2 \beta K G. \quad (3)$$

经过分光会聚后,每个像元接收相应波长范围的光通量。假设第 n 个像元对应的中心波长为 λ_n ,波长范围为 $\Delta\lambda_n$ (光谱取样间隔),并认为在这一波长范围内目标的亮度 L_{λ_n} 为一常量,光栅效率为 η_n ,则探测器像元接收到的光通量可用式(4)表示:

$$\Phi_n = \pi L_{\lambda_n} \Delta\lambda T \tan^2 \beta \eta_n K H, \quad (4)$$

测量时,探测器的输出与接收光通量、积分时间、探测器光谱响应相关。用 ΔT 表示积分时间, r_{λ_n} 表示探测器光谱响应,探测器像元输出电荷可

由公式(5)表示:

$$Q_{\text{in}} = \Phi_n \Delta T r_{\text{in}} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知,当其他条件不变时,仅就信噪比而言,狭缝越宽越好。但同时考虑仪器的光谱分辨率及避免探测器输出饱和,狭缝宽度不应超过光纤芯径。

为方便设计,假设目标亮度为经过两个大气气团($m=2$)后太阳漫射亮度。结合探测器光谱响应、光栅效率可知两个探测单元输出峰值分别在 1 280 nm、1 700 nm。为了方便电子学参数设置并提高仪器的信噪比,两探测器的输出峰值应接近。比较两个探测单元,可以发现,SWIR2 单元(1 650~2 400 nm)的光谱取样间隔、探测器像元高度、目标的光谱亮度(峰值输出对应波长亮度)均小于 SWIR 1 单元,其入射狭缝应大于 SWIR 1 单元狭缝。将积分时间设定为最佳时间范围内(80 ms,实际使用时可根据测量值重新设置)并根据已知参数计算得出 SWIR 2 单元入射狭缝宽取为极限值,即直接以排列光纤为入射狭缝,将 SWIR 1 单元入射狭缝宽设置为 50 μm 。

4 结构设计

结构设计的目的是实现光学设计的要求。由于平场凹面光栅加线阵列探测器的光学设计方案无需附加准直、会聚光路,使结构的设计大大简化。结构设计的重点在于如何按照光栅的参数要求实现光栅、探测器、狭缝三者之间的高精度定位,并且装调容易、固定方便、轻量便携、牢固可靠。

按照上述设计要求,设计了两个独立的框架式壳体,分别固定两个探测单元,保证了结构轻量化且不易变形,使得器件固定方便可靠,如图 5 所示,图中字符含义同图 2。通过加工工艺保证三个器件的中心在同一平面上,相对位置接近理想位置,减少了调整维数和调整难度。装调时只需微调光栅的平移与旋转、狭缝的旋转,探测器的平移即可实现设计要求。其中,旋转光栅和狭缝调整狭缝正一级光谱成像与探测器像元平行(两者中心线夹角为 0°);平移光栅调整光谱会聚;平移探测器调整探测光谱范围。

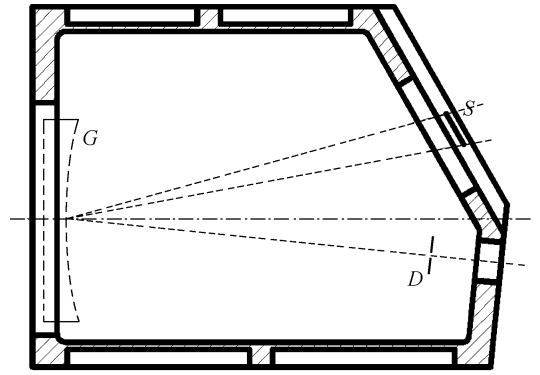


图 5 探测单元机械结构

Fig. 5 Mechanical structure of cells

5 系统测试

5.1 光谱特性

系统装调完成后,利用高压钠灯的多条特征谱线对仪器的光谱特性进行了测试。根据特征谱线成像后对应像元的位置、个数,结合光栅方程计算出仪器的光谱范围 900~2 430 nm,光谱分辨率 12 nm。

5.2 前置光学系统测试

前置光学系统的设计合理与否,可用亮度守恒定律来检测。测量均匀目标时,更换前置光学系统仅改变视场,仪器的输出 DN 值应保持不变。分别用 3°、10°视场前置光学系统测量积分球光源输出,测量结果如图 6 所示。从图 7 中可看出仪器输出满足亮度守恒定律。

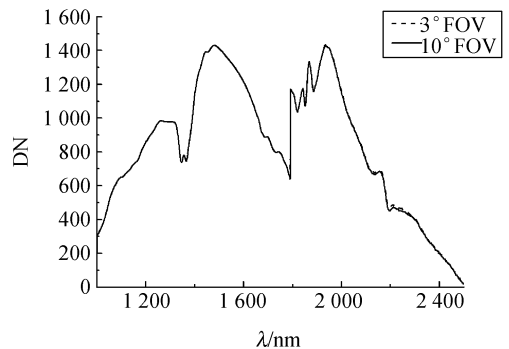


图 6 前置光学系统测试

Fig. 6 Test of pre-optical system

5.3 室外测量

图 7 为室外测量参考板时的光谱仪输出。测量时,积分时间设置为 80 ms,增益为 4。从图中

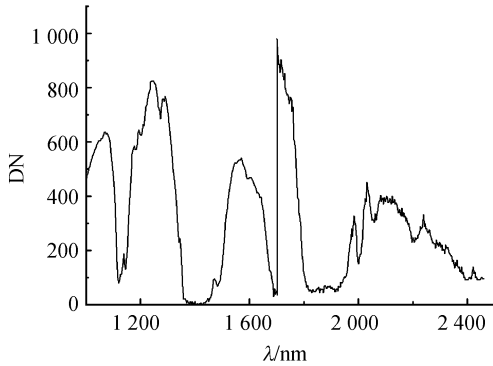


图 7 室外参考板测量

Fig. 7 Field reference panel measurement

可看出,两波段输出峰值接近,说明光谱仪两分光探测单元的入射狭缝设置合理。实际测量时,可根据目标的亮度对积分时间和增益进行重新设置,从而保证仪器的信噪比及大的动态测量范围。

6 结 论

采用平场凹面光栅和线阵列探测器进行短波红外地物光谱仪设计,大大简化了结构设计程序,实现了大的数值孔径和高光谱分辨率。通过光机结构的优化设计,实现了仪器的装调方便,牢固可靠,更换镜头方便改变仪器视场等功能。通过对仪器的实际测试验证了仪器设计满足要求,并具有光谱分辨率高、波长覆盖范围大、信噪比高、动态范围大的优点,适合室外 900~2 400 nm 波段辐射测量。

参考文献:

- [1] 胡秀清,张玉香,邱康睦,等. 中国遥感卫星辐射校正场科研成果论文选编[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
HU X Q, ZHANG Y X, QIU K M, *et al.*. *Collected Papers of China Radiometric Calibration Site*[M]. Beijing: Ocean Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 林雪松,王淑荣,李福田. 空间傅里叶变换红外光谱仪用全柔性机构的设计与研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 13(6): 691-696.
LIN X S, WANG SH R, LI F T. Design and study of the precision scans structure of space infrared FTS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 13(6): 699-705. (in Chinese)
- [3] 洪津,黄鲁,汪元均,等. 中国遥感卫星辐射校正场科研成果论文选编[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
HONG J, HUANG L, WANG Y J, *et al.*. *Collected Papers of China Radiometric Calibration Site*[M]. Beijing: Ocean Press, 2001. (in Chinese)
- [4] 杨广立,冯飞,熊斌,等. 微机械读出红外成像列阵器件机械特性对其性能的影响[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(2): 699-705.
YANG G L, FENG F, XIONG B, *et al.*. Effect of mechanical characteristic of an micro-mechanical optically readable infrared imaging array device on its performance[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 699-705. (in Chinese)
- [5] 黄鲁,洪津,汪元均,等. VF921B 型地物光谱仪[J]. 光电子技术与信息, 1998, 11(5), 37-41.
HUANG L, HONG J, WANG Y J, *et al.*. Model VF921B Field Radiometer [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 1998, 11(5), 37-41. (in Chinese)
- [6] 王广平,许廷发,倪国强,等. 多 ADSP-TS 红外弱小目标实时检测跟踪系统的硬件设计[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(6), 941-944.
WANG G P, XU T F, NI G Q, *et al.*. Hardware design of infrared dim target real time detection and tracking system based on multiple ADSP-TS201S [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 699-705. (in Chinese)
- [7] HAMAMATSU Corporation. InGaAs linear image sensor DATASHEET [EB/OL]. <http://jp.hamamatsu.com/en/index.html> 2005.

- [8] HORIBA Jobin Yvon Corporation. Gratings DATASHEET [EB/OL]. http://www.jobinyvon.cn/cndivisions/Gratings/concave_type4.htm 2007.
- [9] 张以谟. 应用光学[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
ZHANG Y M. *Applied Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1988. (in Chinese)

作者简介:李 新(1975—),男,安徽萧县人,中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生,主要研究方向为遥感辐射定标及精密仪器设计。E-mail: xli@aiofm. ac. cn

郑小兵(1969—),男,新疆伊宁人,中国科学院安徽光学精密机械研究所研究员,博士生导师,主要从事光学精确测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学等方面的研究。

E-mail: xbzhen@aiofm. ac. cn

第六届全国信息获取与处理学术会议征文通知

由中国仪器仪表学会主办,沈阳市仪器仪表与自动化学会与高等学校联合承办的全国信息获取与处理学术年会,从 2003 年至 2007 年分别在沈阳、大连、金华、贵阳和秦皇岛连续举办了五届。由于投稿地域分布广泛(各届均超过 26 个省、自治区、直辖市),投稿与参会人数多,投稿受国家地方基金资助比例逐年提高(07 年已经超过 41%),会议学术气氛浓厚,组织规范,在相关学校、各位作者和热心朋友的共同努力下,已经成为国内仪器仪表领域具有重要影响的学术会议,会议论文已连续两年被 EI 检索。

第六届全国信息获取与处理学术会议由沈阳市仪器仪表与自动化学会与河南理工大学联合承办,将于 2008 年 8 月 6 日至 9 日在焦作举行。

征文范围

(1)各种电量和非电量的测量方法(如医学量、机械量、热工量、物性和化学成分量、状态量等)(2)各种测量装置(如传感器、敏感元件、敏感材料、测量电路、处理电路、显示电路等)(3)测量信号的传输(如现场总线、遥感遥测、无线传输等)(4)模式识别(如图像、语音、生物特征识别等)(5)测量信号处理(6)故障诊断(7)过程控制方法与装置(8)其它。

重要日期

提交论文截止日期:2008 年 3 月 15 日 录用通知(电子版)发出日期:2008 年 4 月 15 日

重要信息

本次会议一律网上投稿,具体要求请登陆网址 www.meeting.org.cn 查看相关说明。本次会议录用论文将刊登在代表中国仪器仪表领域最高学术水平的学术性刊物,《仪器仪表学报》2008 年增刊上。本次会议论文将继续作为 EI 检索源。

联系方式

联系电话:024-25691417(传真) 联系人:魏秋敏 电子信箱:syias@126.com

通信地址:沈阳市铁西区兴华南街 58 号 663 信箱沈阳市仪器仪表与自动化学会 110023

中国仪器仪表学会
2007 年 10 月 12 日