

文章编号: 1000-7032(2013)06-0807-04

用于农田土壤监测的高光谱成像仪

金 辉^{1,2}, 姜会林¹, 郑玉权^{2*}, 张晓辉², 崔继承²

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 土壤光谱分析技术具有分析速度快、成本低、无危险、无破坏、可同时反演多种成分等特点, 基于高光谱成像技术可以快速获取土壤性质及其空间分布特征。本文针对农田土壤监测的需求, 设计了一种无人机载高光谱成像仪, 选择 Offner 凸光栅光谱成像系统实现了无谱线弯曲和无色畸变的设计结果。400 ~ 1 000 nm 波长范围内的衍射效率为 15% ~ 30%, 对地成像效果清晰, 在 3 km 飞行高度可以获得覆盖宽度为 0.6 km、地面分辨率为 0.6 m 的地物目标高光谱图像, 可提供 0.4 ~ 1.0 μm 波长范围内 120 个谱段的高光谱图像, 光谱数据准确、稳定。结果表明, 该高光谱成像仪满足设计要求且可以快速获得高精度成像光谱信息, 适合用于对农田土壤的监测。

关键词: 高光谱成像仪; 农田土壤; 监测

中图分类号: O435.2

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20133406.0807

Hyperspectral Imager for Farmland Soil Monitoring

JIN Hui^{1,2}, JIANG Hui-lin¹, ZHENG Yu-quan^{2*}, ZHANG Xiao-hui², CUI Ji-cheng²

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding Author, E-mail: derek_zheng001@hotmail.com

Abstract: Soil spectral analysis technology has features of fast analysis speed, low cost, no risk, no damage, and it can inverse a variety of ingredients at the same time. Based on hyper-spectral imaging technology, we can quickly obtain soil properties and its spatial distribution characteristics. In this paper, we design a UAV hyper-spectral imager based on the demand of farmland soil monitoring. The Offner convex grating spectral imaging system was selected to achieve non-spectral line bending and colorless distortion design results. The diffraction efficiency is 15% ~ 30% in the range of 400 ~ 1 000 nm wavelength. The ground imaging results are clear, it can obtain hyper-spectral images of ground target of covering a width of 0.6 km and ground resolution of 0.6 m at 3 km altitude. It provides 120 spectral bands of hyper-spectral images at the wavelength range of 0.4 ~ 1.0 μm . The spectral data are accurate and stable. The results show that this hyper-spectral imager meets the design requirements and can quickly obtain the high-precision imaging spectra of the agricultural soils, thus achieving the monitoring of farmland soil.

Key words: hyperspectral imager; farmland soil; monitor

收稿日期: 2013-03-02; 修订日期: 2012-04-13

基金项目: 国家“863”高技术发展研究计划(2008AA121803)资助项目

作者简介: 金辉(1979-), 女, 吉林长春人, 主要从事航空航天光机系统设计、检测方面的研究。

E-mail: jjhh0118@hotmail.com

1 引 言

土壤不仅是农业生产的基础,而且是人类生存环境的重要组成部分。人类利用反射光谱研究土壤含水量、有机质含量、粒径及土壤组分的历史可以追溯到 19 世纪 20~30 年代。之后特别是 20 世纪 60 年代以来,许多学者对土壤光谱特性及其影响做了大量的研究。这些研究表明:土壤光谱虽然很复杂,但其中包含很多的定量信息,可以通过光谱分析技术来提取土壤属性。1993 年,便携式野外光谱仪成为高光谱遥感重要的研究工具,使得科学家可以方便地对土壤光谱性质进行分析^[1]。过去几十年的大量研究表明,土壤光谱特征可以用于反演土壤有机质、质地、营养元素、铁氧化物等物质的含量。

基于成像光谱技术的成像光谱仪是获得成像光谱的重要仪器。成像光谱仪由前置成像光学系统和光谱仪系统组成。光谱仪系统是成像光谱仪的关键部分,常见的分光模式有色散棱镜、干涉滤光片、平面闪耀光栅等^[2]。进行土壤研究常用的高光谱成像仪主要有 AVIRIS^[3]、HyMap^[4] 和 Hyperion^[5] 等。凸面光栅成像光谱仪则是采用凸面光栅为分光元件的 Offner 同心分光系统,该系统具有无象散、谱线弯曲小、色畸变小、结构简单等优点,易于实现小型化^[6-8]。

本文选择 Offner 凸光栅光谱成像系统设计了一种无人机载高光谱成像仪,实现了对农田土壤的快速、无损监测。通过对无人机载高光谱成像光谱仪进行的飞行实验得到了实际工作参数,满足设计要求。

2 高光谱成像光谱仪光学系统的选定与设计

图 1 所示为高光谱成像光谱仪系统原理图。

所选定的美国 Sarnoff 公司的 CCD180-1M-SFT 面阵 CCD 探测器的工作方式为背照式、分帧传输,像元尺寸为 $18\ \mu\text{m} \times 18\ \mu\text{m}$,像元数为 $1\ 024 \times 1\ 024$,输出路数为 16 路,帧速率为 500 frame/s。

根据探测器的性质,确定光学系统的参数如下:焦距 $f=90\ \text{mm}$,口径 $D=30\ \text{mm}$, F 数为 3,瞬时视场为 $0.2\ \text{mrad}$,光谱范围为 $0.40 \sim 1.0\ \mu\text{m}$,总视场为 11.5° ,光谱分辨率为 $5\ \text{nm}$,几何分辨率为 $1.0\ \text{m}$ ($5\ \text{km}$ 高度),通道数为 120,覆盖宽度为

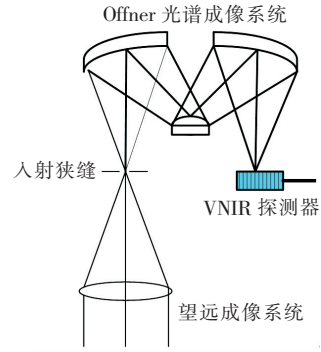


图 1 高光谱成像光谱仪系统原理图

Fig. 1 Principle of hyperspectral imaging

$1.0\ \text{km}$ ($5\ \text{km}$ 高度)。

由于高光谱相机的的光谱范围较宽,所以望远成像系统采用复消色差的设计思路,选择适当的玻璃材料,在 $0.4 \sim 1.0\ \mu\text{m}$ 波长范围内实现复消色差设计。光学系统的设计结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,系统光学传递函数已经接近衍射极限,球差曲线显示在入射狭缝处的轴向色差得到了校正,实现了复消色差的设计要求。

Offner 凸光栅光谱成像系统具有无谱线弯曲和无色畸变的特点,且体积和重量均很小,仅由两块球面反射镜和一块凸球面光栅即可组成。设计结果如图 3 所示。系统的狭缝长度为 $20\ \text{mm}$,工作波段为 $0.4 \sim 1.0\ \mu\text{m}$,像面尺寸为 $20\ \text{mm}$ (空间) $\times 2.3\ \text{mm}$ (光谱),谱线弯曲 $< 0.1\%$,色畸变 $< 0.1\%$,体积为 $200\ \text{mm} \times 150\ \text{mm} \times 150\ \text{mm}$ 。

从设计结果可以看出系统的色球差得到了较好的校正,畸变和象散得到了有效的控制。从光学传递函数曲线可以看出,系统设计已经达到衍射极限,设计结果能够满足指标要求。

Offner 分光光学系统由两块球面反射镜和一块凸球面光栅组成,望远镜系统成像在后端光谱仪的入射狭缝上,经过凸光栅光谱分光系统将入射狭缝进行色散,然后按波长不同成像在面阵探测器的不同位置,实现 120 通道的高光谱图像。无人机载高光谱成像光谱仪的光学系统结构如图 4 所示。

设计结果表明:Offner 凸光栅光谱成像系统可以实现无谱线弯曲和无色畸变的设计结果,在 $400 \sim 1\ 000\ \text{nm}$ 波长范围内的衍射效率为 $15\% \sim 30\%$,通过增大系统的相对孔径可以相应弥补光能利用率的不足。

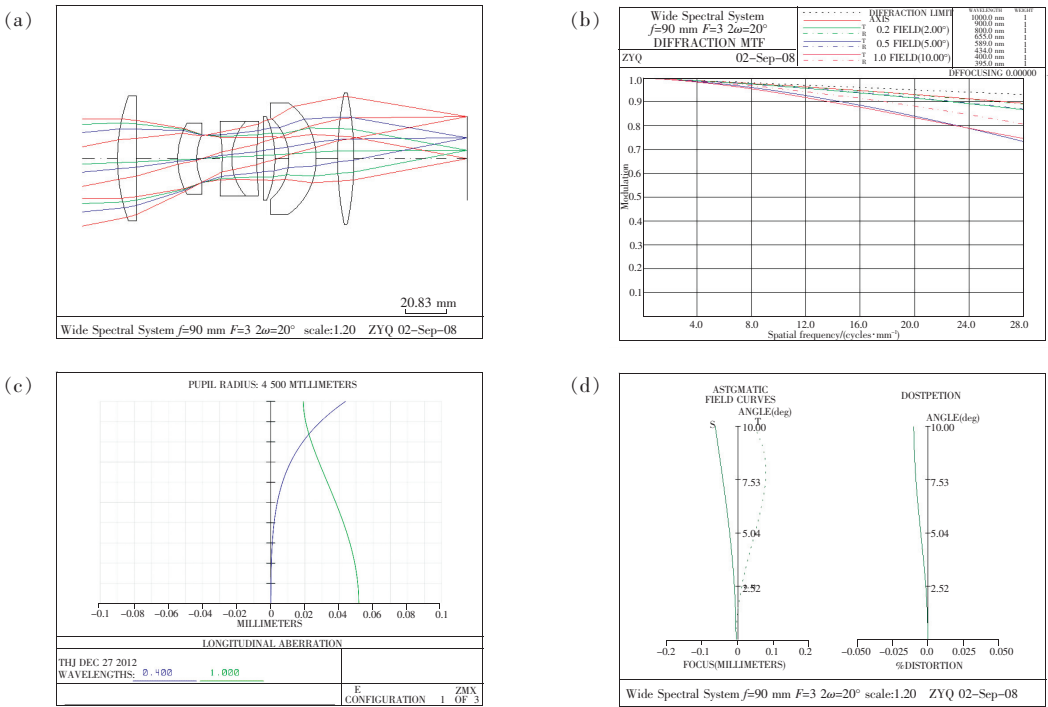


图 2 望远光学系统设计结果。(a) 望远光学系统结构图; (b) 望远光学系统 MTF; (c) 望远光学系统球差曲线; (d) 望远光学系统像差曲线。

Fig. 2 Design results of the telescope. (a) Telephoto optical system structure. (b) Telephoto optical system MTF. (c) Telephoto optical system spherical aberration curve. (d) Telephoto optical system aberration curve.

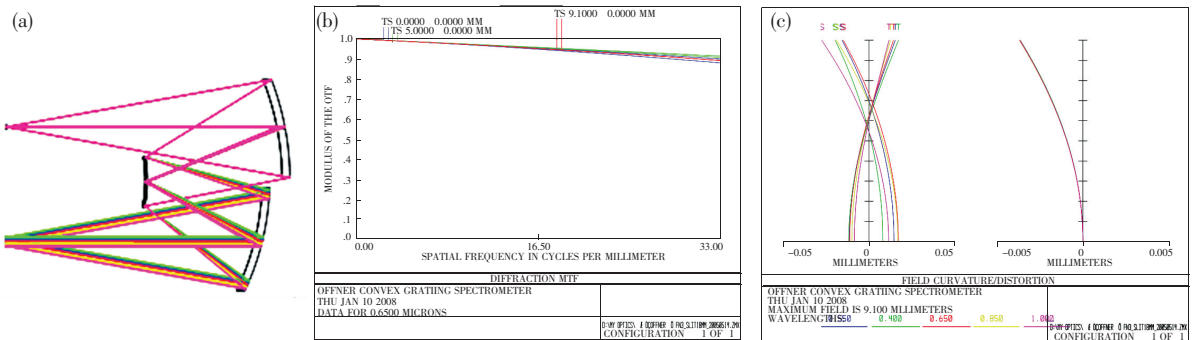


图 3 光谱成像系统设计结果。(a) 光谱成像系统结构图; (b) 光谱成像系统 MTF; (c) 光谱成像系统像差曲线。
Fig. 3 Design results of spectral imaging system. (a) Spectral imaging system structure. (b) spectral imaging system MTF. (c) spectral imaging system aberration curve.

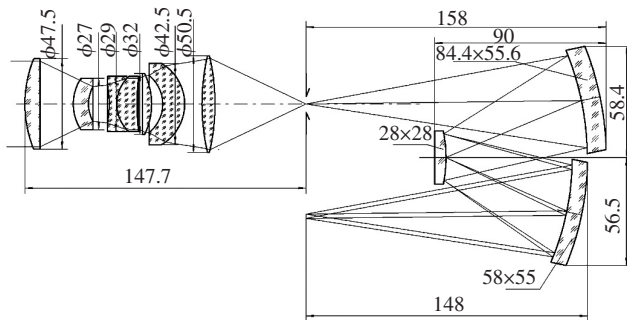


图 4 机载高光谱相机光学系统

Fig. 4 Optical construction for hyperspectral imaging

3 外场航拍实验

为了验证系统性能,我们将高光谱相机搭载在无人机平台上。飞行试验验证结果表明:所研制的高光谱相机的系统性能及工作状态良好,对

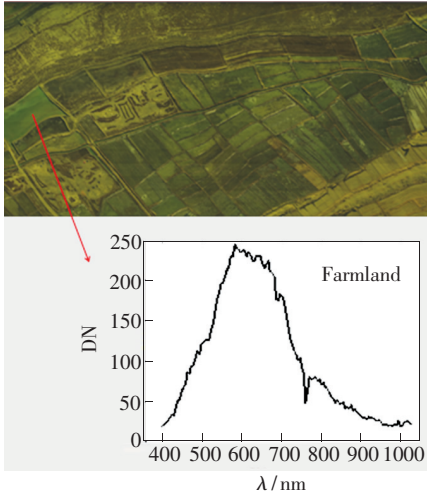


图 5 飞行试验获取的图像数据

Fig. 5 Image data obtained in the flight test

地成像效果清晰,在 3 km 飞行高度可以获得覆盖宽度为 0.6 km、地面分辨率为 0.6 m 的地物目标高光谱图像,可提供 0.4 ~ 1.0 μm 波长范围内 120 个波段的高光谱图像,光谱数据准确、稳定。通过农田土壤数据立方可以提取农田土壤的多光谱伪彩成像图以及农田土壤的反射太阳光谱曲线。

4 结 论

针对用于农田土壤监测用无人机载高光谱成像光谱仪高分辨率和小型化的要求,进行了光学系统的设计,并分别对其光学性能进行了详细分析。通过对无人机载高光谱成像光谱仪进行飞行实验,得到了实际应用的工作参数。实验结果表明:所研制的高光谱相机的系统性能及工作状态良好,对地成像效果清晰,在 3 km 飞行高度可以获得覆盖宽度为 0.6 km、地面分辨率为 0.6 m 的地物目标高光谱图像,可提供 0.4 ~ 1.0 μm 波长范围内 120 个波段的高光谱图像,光谱数据准确、稳定。

参 考 文 献:

- [1] O'neal A M. The effect of moisture on the color of certain Iowa soils [J]. *American Soil Survey Association Bulletin*, 1927(B8):158-174.
- [2] Zheng Y Q, Yu B X. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers [J]. *J. Remote Sensing* (遥感学报), 2002, 6(1):75-80 (in Chinese).
- [3] Galvo L S, Formaggio A R, Couto E G, *et al.* Relationships between the mineralogical and chemical composition of tropical soils and topography from hyperspectral remote sensing data [J]. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 63(2):259-271.
- [4] Selige T, Böhner J, Schmidhalter U. High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures [J]. *Geoderma*, 2006, 136(1/2):235-244.
- [5] Gomez C, Rossel R A V, McBratney A B. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field Vis-NIR spectroscopy: An Australian case study [J]. *Geoderma*, 2008, 146(3/4):403-411.
- [6] Qi X D, Han P P, Pan M Z, *et al.* Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2011, 19(12):2870-2876 (in Chinese).
- [7] Zheng Y Q. Precise spectral calibration for hyperspectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2010, 18(11):2347-2354 (in Chinese).
- [8] Zheng Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2005, 13(3):650-657 (in Chinese).