

文章编号: 1672-8785(2010)01-0001-07

便携式地面成像光谱辐射计的设计

潘明忠 亓洪兴 肖功海 舒 嵘

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 设计了一种基于棱镜-光栅-棱镜 (PGP) 的便携式地面成像光谱辐射计。系统的波段范围为可见-近红外, 共有 344 个波段, 光谱分辨率优于 10nm, 空间分辨率优于 1mrad。本文以混合像元分解研究为应用背景, 阐述了地面成像光谱辐射计的基本原理, 分析了系统的主要技术指标, 详细论述了系统设计, 并对系统进行了相关测试。结果表明, 系统具有较高的光谱、空间分辨率及良好的便携性, 工作稳定可靠, 非常适合在野外环境中应用, 从而验证了便携式地面成像光谱辐射计用于混合像元分解研究的可行性。

关键词: 高光谱成像; 混合像元; 可见-近红外; 分光计; PGP; USB2.0

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.01.001

Design of Compact Field Hyperspectral Imaging Spectrometer

PAN Ming-zhong, QI Hong-xing, XIAO Gong-hai, SHU Rong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A compact field hyperspectral imaging spectrometer based on a prism-grating-prism structure is presented. The system is designed for the wavelength range from visible light to near infrared. It has 344 spectral bands with the spatial resolution higher than 10 nm and the spectral resolution higher than 1 mrad. To study the unmixing of mixed pixels, the basic principle of the field hyperspectral imaging spectrometer is described, the main specifications of the system is analyzed, the design of the system is discussed in detail and related tests are conducted. The test results show that the system has both higher spatial resolution and higher spectral resolution. Because of its compactness and reliable operation, it is very suitable for field applications. Thus, the feasibility of the use of a compact field hyperspectral imaging spectrometer in the research on the unmixing of mixed pixels is verified.

Key words: hyperspectral imaging; mixed pixel; VIS-NIR; spectrometer; PGP; USB2.0

1 引言

地面光谱辐射计能够在太阳反射谱段内获取地物的连续光谱曲线, 是建立地物标准反射光谱数据库的重要手段。此外, 地面光谱辐射计也可用于航空/航天遥感仪器定标、遥感仪器性能指标分析、图像反射率转换以及地面地质填

图等应用。由此可见, 地面光谱辐射计在高光谱遥感中发挥着十分重要的作用^[1]。

随着高光谱遥感的飞速发展, 研究者在获取地物辐射参数时, 希望能同时获取地物的影像信息, 因此, 地面光谱辐射计从传统的点测量型、点测量加面阵相机型逐步发展至航空/地面两用型成像光谱辐射计, 即从地面光谱辐射计

收稿日期: 2009-08-18

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2009CB724005)

作者简介: 潘明忠 (1982-), 男, 吉林辽源人, 博士研究生, 主要从事成像光谱技术研究工作。E-mail: mzpan@foxmail.com

发展至地面成像光谱辐射计。近年来,国外还出现了专门用于地面成像光谱测量的新型设备,如 CRi 公司的 Nuance、OKSI 公司的 HyperScan 以及 HySpex 公司的 VNIR-640、VNIR-1600 等仪器。地面成像光谱辐射计相对于地面光谱辐射计,其应用领域得到了进一步拓展,可用于农作物检测、食品质量监控、污染物检测、赝品识别、伪装探测以及混合像元分解研究等,在科研、农业、工业、军事等领域具有十分广泛的应用前景。

鉴于目前国内还没有自行研制的地面成像光谱辐射计,本文以混合像元分解研究为应用背景,设计了一种基于棱镜-光栅-棱镜 (PGP) 的便携式地面成像光谱辐射计,填补了国内空白。本文首先阐述了地面成像光谱辐射计的基本原理,之后在分析系统主要技术指标的基础上,详细论述了系统设计,最后对系统进行了相关测试,论证了便携式地面成像光谱辐射计用于混合像元分解的可行性。

2 地面成像光谱辐射计原理

便携式地面成像光谱辐射计基于推帚式成像光谱辐射计的原理,如图 1 所示。系统瞬时视场内的地物在太阳光或其它光源照射下,经扫描镜、物镜成像于分光计的入射狭缝处,再经分光计的前光学系统准直后色散,由分光计的后光学系统会聚并成像于面阵 CCD 相机上,获取的数据通过 USB2.0 接口传输至笔记本电脑。系统在扫描机构的配合下,对地物进行一维扫

描,便可以得到地物的二维图像信息及光谱信息,即数据立方体,如图 2 所示。

3 主要技术指标

系统技术指标的确定需要综合考虑应用背景、系统的总体性能及各个参数间的制约关系。

3.1 波长范围

本系统的应用背景是进行混合像元分解的基础研究工作,应用目标是野外可见光光谱测量。综合考虑分光器件透射波长及 CCD 的光谱响应等参数后,确定系统的波长范围为 400nm ~ 900nm。

3.2 空间分辨率

为了建立混合像元分解的反演模型,要求地面成像光谱辐射计测量到的单位像素点为纯像元,由于地物的复杂性和多样性,通常必须达到毫米级的空间分辨率才不会产生混合像元。按照仪器的架设高度 1m ~ 2m 计算,1mrad 的空间分辨率可以满足设计要求,基本不会产生混合像元。

3.3 光谱分辨率

区分各种地物类型,需要一定的光谱分辨率。对于色散型成像光谱辐射计,光谱分辨率主要受限于分光器件的狭缝宽度。狭缝越窄,则光谱分辨率越高。然而,光谱分辨率与空间分辨率是相互制约的,提高系统的光谱分辨率将导致入射到 CCD 单位像素上的能量减小。为了达到一定的信噪比,必须增大 CCD 单位像素的有效面积,以使空间分辨率降低。通过综合考虑,在

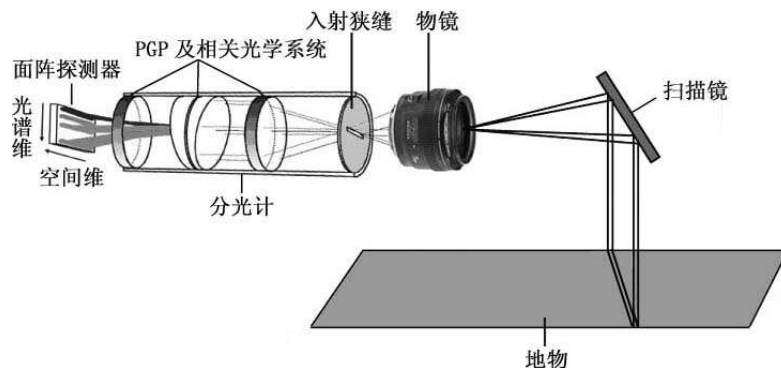


图 1 地面成像光谱仪的原理图

满足 1mrad 空间分辨率的条件下, 确定系统的光谱分辨率为 10nm。

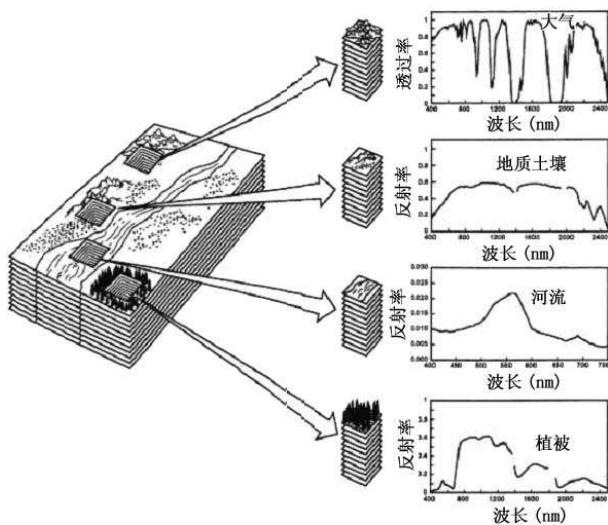


图 2 典型的数据立方体

3.4 波段数

可见光高光谱成像系统通常具有几十到数百个波段, 波段数与 CCD 在光谱维的像元数有关, 一般没有严格的选择标准。本系统采用的 CCD 的光谱维像元合并后, 像元数为 344, 即波段数为 344。

3.5 视场

系统的视场分为瞬时视场、狭缝方向的总视场及扫描方向的总视场, 其中, 扫描方向与狭缝方向垂直。瞬时视场即系统的空间分辨率, 取决于 CCD 的像元尺寸及光学系统的焦距; 狭缝方向的总视场取决于分光器件, 本系统采用的分光器件的最大视场为 21° ; 扫描方向的总视场由扫描机构确定, 在测量时可以由软件设置。

表 1 列出了系统的主要技术指标。

表 1 系统的主要技术指标

光谱范围	可见 - 近红外 (400nm ~ 900nm)
波段数	344
总视场	扫描方向的总视场可配置, 狭缝方向的总视场为 21°
瞬时视场	1mrad
光谱分辨率	10nm

4 系统设计

4.1 总体结构设计

总体结构设计不仅要考虑系统的功能, 同时也要考虑野外测量应用的便携性要求, 即小型化、轻量化、快速安装及拆卸等特性, 因此我们采用模块化设计思想, 将系统分为头部、控制器及笔记本计算机三个模块, 各个模块架构在多功能平台上, 如图 3 所示。多功能平台可以折叠收纳, 上方为可以俯仰及 360° 旋转的悬臂, 悬臂前端放置头部模块, 头部模块中的成像光谱辐射计在扫描机构的配合下, 对地物进行扫描成像; 悬臂中部放置控制器模块; 为了保持平台稳定, 在悬臂后方放置了配重块; 平台下方的载物台用来放置笔记本计算机。系统易于携带, 可以快速架设及拆卸, 很好地体现了便携性的要求。另外, 它可以旋转, 能进行多角度测量, 非常适合于野外应用。

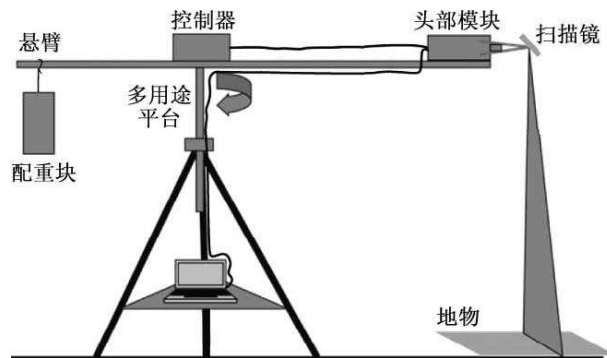


图 3 系统总体结构示意图

4.2 光学设计

目前, 用于成像光谱辐射计的分光技术主要有: 傅里叶变换、棱镜光栅色散、渐变滤光片、可调谐滤光片、层析成像等^[5], 相比较而言, 棱镜光栅色散技术出现得较早, 技术最为成熟。因此, 本系统基于棱镜光栅色散技术进行设计, 分光部件选用 Specim 公司的 Inspector, Inspector 是一种基于棱镜 - 光栅 - 棱镜 (PGP) 的分光器件, 这种结构便于设计小型化低成本的光谱仪器, 适用于工业及科研应用。采用 PGP 部件设计成像光谱辐射计具有以下优势^[6]:

• 一般的直视色散棱镜仅能提供小的非线性色散, PGP 采用了衍射光栅, 因此能提供大的线性色散。

• 通过改变 PGP 中两个棱镜的顶角、棱镜材料及光栅周期, 可以灵活地改变透射波长范围, 而色散棱镜则会受到很大的限制。

• PGP 中的光栅是全息的光学部件, 衍射效率能达到 70% 以上, 并且与偏振无关。

• PGP 的直视特性使得基于 PGP 的光谱仪具有独特的管状光机结构, 不仅便于仪器的小型化, 而且具有更高的可靠性。

根据系统的设计指标, 选择的 Inspector 技术参数如下:

波长范围: 400nm ~ 900nm

输出图像尺寸: 6.6mm (光谱维) × 8.8mm (空间维), (标准 2/3 英寸图像)

入射狭缝宽度: 60μm

入射狭缝长度: 8.8mm

数值孔径: F/2.8

机械接口: 标准 C 型固定件

根据系统狭缝方向总视场的要求, 有

$$\tan \frac{FOV}{2} = \frac{x/2}{f}$$

式中, FOV 为狭缝方向的总视场, $FOV = 21^\circ$, x 为图像空间维的尺寸, $x = 8.8\text{mm}$, f 为光学系统焦距。则有, $f = 23.74\text{mm}$ 。

根据计算出的物镜焦距, 采用覆盖该焦距的变焦镜头, 使得系统可以在一定范围内改变视场, 具有较高的灵活性, 数值孔径与分光计一致, 为 F/2.8。

4.3 机械结构设计

机械结构设计分为多用途平台设计及头部设计。多用途平台由三角架、悬臂、配重块及载物台组成; 头部包括 CCD 相机、分光计、物镜、扫描镜、步进电机及零位检测开关。零位检测开关用于扫描镜初始定位及故障报警。头部的结构图如图 4 所示。

机载及星载成像光谱仪通常是利用自身与目标的相对运动来实现沿轨方向的扫描的。在

这种方式下, 目标在探测器积分过程中的运动会导致“拖尾”现象, 从而降低成像质量。这种情况虽然可以通过减小积分时间或采用像移补偿等手段加以改善, 但前者具有很大的局限性, 后者会极大地增加系统设计的复杂性。本系统对地物的扫描是通过步进电机带动扫描镜以“摆扫”的方式来实现的, 采用“摆-停-摆-停”的运动方式, 即 CCD 相机在扫描镜“停”的时刻进行积分, 在“摆”的时刻进行数据读出, 此方式可以有效地减少扫描过程中造成的像元“拖尾”现象, 从而提高成像的清晰度。

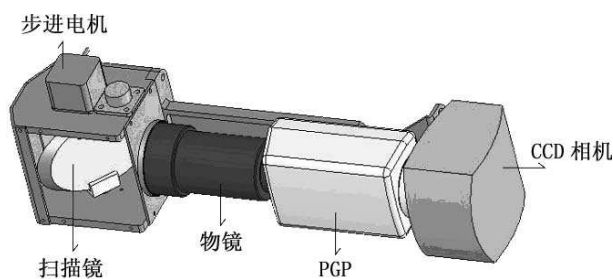


图 4 头部的机械结构图

4.4 电子学设计

电子学系统由 CCD 相机、扫描机构控制电路及电源管理电路组成。

CCD 相机用于获取被分光系统色散之后的光谱数据, 是系统的核心部件之一, 设计时考虑的因素有:

• 便携性的要求。系统采用笔记本电脑作为数据采集终端, 因此要求 CCD 相机采用数字接口, 常见的高速数字接口有 USB2.0 及 IEEE1394。由于 IEEE1394 并没有完全普及, 许多计算机中没有此端口, 而 USB2.0 则是计算机的标配接口, 所以确定 CCD 相机采用 USB2.0 接口。

• 为了降低相机的暗电流, 提高系统的信噪比, 并保证在不同温度环境下测量的一致性, 要求 CCD 相机带有制冷功能。

• 分光器件的图像输出为 2/3 英寸, 因此相机的 CCD 尺寸也必须为 2/3 英寸。

• 根据系统的空间分辨率要求, 有:

$$IFOV = \frac{d}{f} \leq 1\text{mrad}$$

式中, d 为 CCD 的像元尺寸, f 为系统焦距, 可以算出 CCD 的像元尺寸 $d \leq 23.74\mu\text{m}$ 。

• 分光计机械接口的要求。分光计采用 C 型固定件接口。为了便于安装, CCD 相机需采用 C 型固定件接口。

根据上述选用标准, 选择 Lumenera 公司的 INFINITY3-1 型相机。该相机设计紧凑, 为全色制冷型, 数据传输采用高速 USB2.0 接口, 机械接口为标准的 C 型固定件, 有效像元数为 1392×1040 , 像元尺寸为 $6.45\mu\text{m} \times 6.45\mu\text{m}$, 采用 3×3 合并方式, 合并后的像元尺寸为 $19.35\mu\text{m} \times 19.35\mu\text{m}$, 可以算出系统的瞬时视场为

$$IFOV = \frac{d}{f} = \frac{19.35\mu\text{m}}{23.74\mu\text{m}} = 0.815\text{mrad}$$

CCD 相机采用 3×3 合并方式, 在满足系统空间分辨率指标的前提下, 可以提高系统的灵敏度。

扫描机构控制电路由步进电机驱动器及控制电路组成, 通过电缆与头部的扫描机构相连接。扫描机构控制电路亦采用 USB2.0 接口, 接口芯片采用 Cypress 公司的 CY7C68013A, 该器件集成了 USB2.0 控制器及增强型 8051 内核, 不仅简化了系统设计, 提高了集成度, 而且也使得设计及运行变得更为可靠。

为了便于野外应用, 系统采用了大容量的锂电池。通过电源管理电路, 该电池可产生系统所需的各种电压。经测试, 系统在单次充电的情况下, 有效工作时间在 8h 以上。

4.5 软件设计

便携式地面成像光谱辐射计的管理软件具有系统相关参数设置、光谱图像预览、采集及监视等功能。程序由图形化的编程语言 LabVIEW 设计, 程序的界面如图 5 所示。

5 系统测试及结果

5.1 光谱定标

系统装配、光校完成后, 需要进行光谱定标。方法是: 利用标定好的单色仪, 通过平行光管照亮地面成像光谱辐射计, 令单色仪以一定步

长输出单色光, 同时记录 CCD 所测得的光谱信号。通过分析测得的光谱信号与单色仪输出的关系曲线, 便可以确定各个波段的中心波长及带宽。表 2 为若干波段的光谱定标结果。这些光谱定标结果表明, 系统的光谱分辨率完全满足优于 10nm 的要求。

5.2 空间分辨率测试

系统空间分辨率的测试方法为: 将系统放置在焦距为 4m 的平行光管的前端, 将两条相距 4mm、被光源照亮的狭缝放置在平行光管的焦点处, 观察 CCD 所成的像。图 6 上半部分为 CCD 相面上的原始图像, 下半部分为 CCD 第 150 行的强度曲线。可以看出, 系统能将狭缝很好地分开, 因此系统的空间分辨率可以达到 1mrad。

5.3 外场测试

图 7 和图 8 为 2008 年 11 月在苏州太湖附近的水稻田获取的成像光谱数据及反射率曲线。图 7 中从左至右分别为 RGB 合成图像、第 100 波段的单色图像、第 200 波段的单色图像及第 300 波段的单色图像; 图 8 示出了水稻稻穗及叶子的反射率曲线。测试结果表明, 系统获取的图像清晰, 层次清楚, 测得的反射率曲线的光谱特征与实际相符。

5.4 地面成像光谱辐射计用于混合像元分解研究

对于星载、机载遥感, 仪器空间分辨率的限制以及探测目标的多样性必然会导致混合像元的产生, 从而严重影响遥感影像的分析精度并阻碍遥感技术的定量化发展。目前, 国内外在混合像元分解方面已经做了大量研究工作, 但是研究重点大多集中于混合像元分解模型的建立及应用上, 很少有人开展混合像元分解模型的验证及评价工作。然而, 对于没有经过科学验证及评价的模型, 其实际应用的准确性及可靠性具有很大的局限性。对混合像元分解模型进行科学验证及评价, 需要获取混合像元及该混合像元内各端元的高精度光谱数据。然而在以往的工作中, 研究者可以利用的数据基本上都是星载或机载遥感数据, 此类数据的空间分辨率低, 从中很难提取出端元的精细光谱数据, 因而无法用于验证和评价混合像元分解模型的科学性和有效性, 这样便限制了混合像元分解技术的发展。

利用本文设计的便携式地面成像光谱辐射计, 可以直接获取混合像元内端元的高精度光谱数据, 能够很好地解决混合像元分解模型验证及评价的难题, 从而推动该技术的进一步发展。

利用本文设计的便携式地面成像光谱辐射

计进行混合像元分解研究, 具有以下优势:

首先, 端元提取精度更高。整个系统的架设高度为米级, 1mrad 的瞬时视场对应的空间分辨率为毫米量级, 此时瞬时视场内的地物基本为纯像元, 因此测得的光谱数据, 相对于星载及

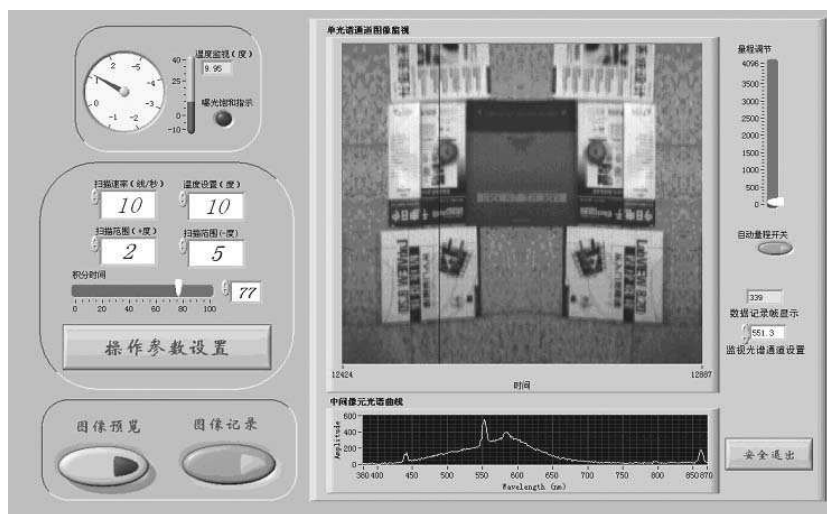


图 5 管理软件界面

表 2 光谱定标结果 (部分)

波段	中心波长 (nm)	FWHM*(nm)	波段	中心波长 (nm)	FWHM(nm)	波段	中心波长 (nm)	FWHM(nm)
54	450.1	6.7	178	624.5	5.7	310	818.8	5.7
58	455.1	6.7	181	628.9	5.8	313	823.3	5.6
61	459.2	6.7	185	634.7	5.6	317	829.2	5.6
65	464.7	6.9	188	639.1	5.8	320	833.7	5.5

* FWHM: full width at half maximum, 全波半高宽 (带宽)

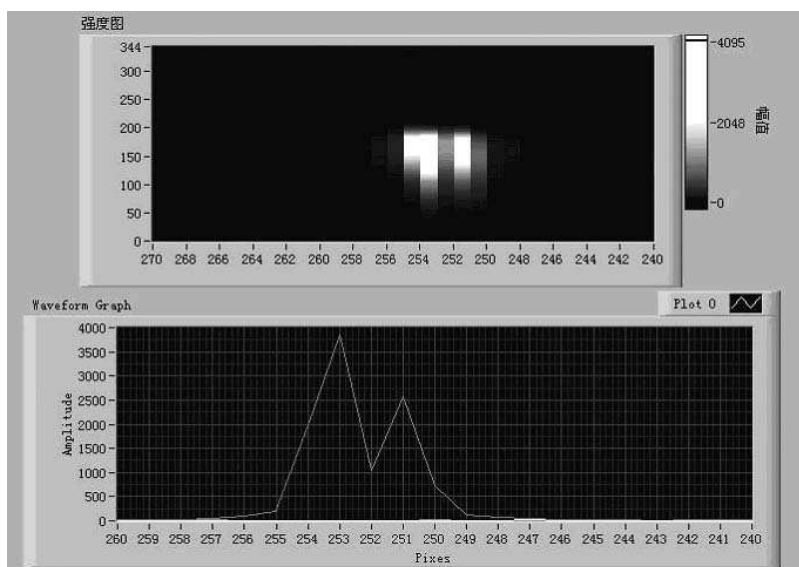


图 6 空间分辨率测试结果

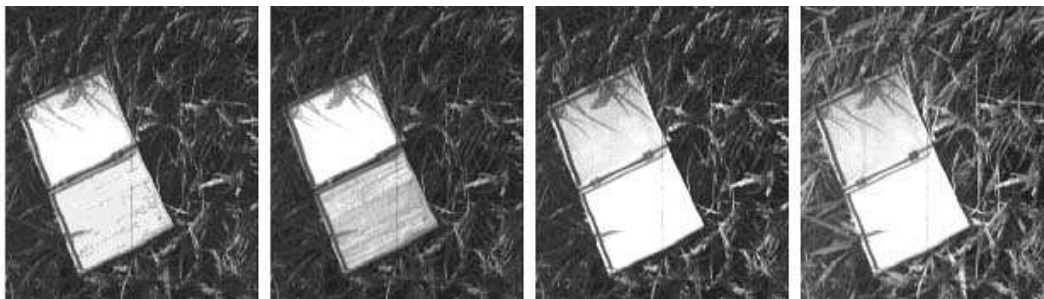


图 7

机载遥感数据来讲, 在端元的精度上具有巨大的优势, 更适用于混合像元分解的基础研究。

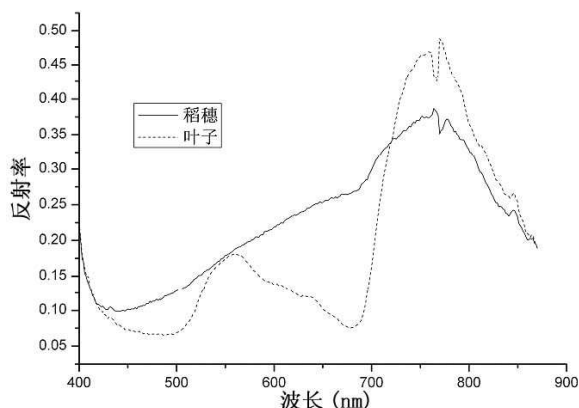


图 8 成像光谱数据及光谱曲线

其次, 易于开展仿真及验证实验。利用地面成像光谱实验系统, 可以方便地对特定目标进行探测, 且可以对目标进行多角度、重复性测量, 相对于星载及机载遥感, 具有极高的灵活性及自主选择性。

此外, 该地面成像光谱实验系统可以实现快速测量, 单次测量成本低, 是混合像元分解研究的重要工具。

6 结束语

本文所设计的便携式地面成像光谱辐射计, 具有较高的光谱分辨率及空间分辨率, 能够很好地适应野外作业环境, 为下一步开展混合像元分解研究奠定了技术基础。

成像光谱技术是基于地物谱学发展起来的遥感技术。在成像光谱遥感技术及应用研究领

域, 地物光谱的研究是基础。因此, 成像光谱仪的小型化、便携化以及在地物光谱研究领域的应用, 具有极其深远的理论及现实意义。

参考文献

- [1] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感—原理、技术与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006, 6: 29–30.
- [2] 汪骏发, 高晓萍, 陈志峰, 等. 多角度遥感及其航空成像仪 [J]. 红外与毫米波学报, 2001, 20(5): 329–334.
- [3] 李洪波, 舒嵘, 薛永祺, 等. PHI 超光谱成像系统及其海洋遥感应用前景分析 [J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(6): 429–433.
- [4] 肖功海, 舒嵘, 薛永祺. 显微高光谱成像系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 367–372.
- [5] 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): 75–79.
- [6] Mauri Aikio. Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph [M]. Finland: Technical Research Center of Finland, 2001.
- [7] 杨宜. 成像光谱仪光谱定标技术 [J]. 红外, 2006, 27(8): 24–26.
- [8] Specim. ImSpector user manual [EB/OL]. <http://www.specim.fi>, 2001.
- [9] Landgrebe D. Hyperspectral image data analysis [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(1): 17–28.
- [10] Schultz RA, Nielsen T, Zavaleta IR, et al. Hyperspectral imaging: A novel approach for microscopic analysis [J]. Cytometry, 2001, 43(4): 239–247.
- [11] 何海波, 谢惜惜, 王跃明, 等. 基于 USB 的超光谱成像仪数据采集系统的设计 [J]. 红外, 2008, 29(5): 18–23.
- [12] Williams GM. Direct sight imaging spectrograph: a unique add-on component brings spectral imaging to industrial applications [C]. San Jose: SPIE-INT SOC Optical Engineering, 1998: 165–175.