

② 1-14

# 实用机载成像光谱仪系统

沈鸣明 王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

V243.5  
TP73

**摘要** 叙述了经实用化设计定型的 MAIS 机载成像光谱仪的系统设计和遥感应用情况, 并给出了系统的主要技术参数。

**关键词** 成像光谱仪, 航空遥感。

机载 系统设计 遥感

## 引言

成像光谱技术是国际遥感前沿技术, 自 80 年代起步, 90 年代发展迅速。成像光谱仪的高光谱分辨率, 使仪器在记录探测对象的空间特征同时, 能在一个光谱区间内获得每个象元几十甚至几百个连续的窄波段信息。在获得的光谱图像数据中直接反映出物质的光谱特征, 使得从空间直接识别地球表面物质成为可能。中国科学院上海技术物理研究所在 1990 年研制出我国第一台机载成像光谱仪原理性实验样机并进行了首次航空试验。至今, 成像光谱仪传感器的实用化设计已定型, 高速大容量数据采集、记录、辐射定标等关键技术取得突破, 由上海技术物理所发展的机载成像光谱仪 MAIS 已走向实用。本文介绍了实用机载成像光谱仪的系统设计、主要性能参数和遥感应用情况。

## 1 系统设计

### 1.1 设计原则

宽扫描视场对于实用型遥感传感器是必要的。光机扫描成像方案与面阵推扫方案比较, 技术成熟并且可获得  $90^\circ$  扫描视场, 符合航空遥感实用要求。成像光谱仪的遥感对象将面向陆地及海洋资源环境等不同类型的物质的识别, 其波段选择要求覆盖大气所能透过的整个太阳反射光谱区, 考虑到地质应用对热红外波段的需求, 本系统以光谱仪置换的方式, 增加了热红外探测波段。在提高系统信噪比和更高的光谱分辨率之间选择了前者, 并立足国内现有的技术和工艺条件。为此, 将实验样机中可见近红外光谱仪的凹面光栅改为平面光栅, 短波红外光谱仪的透射系统改为反射系统, 短波红外探测器改用热电制冷的 32 元 PbS 线列探测器。

成像光谱仪的系统性能主要以下式(1)~(3)确定。在  $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$  可见光至短波红外光谱范围, 成像光谱仪的信噪比为

$$\frac{V_s}{V_N} = \frac{D_0^2 \omega \eta_s}{4 \sqrt{A_D \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_a \tau_m D_s^* \sin \theta E_s \Delta \rho_s d\lambda, \quad (1)$$

式(1)中  $D_0$  为光学系统的有效口径,  $\omega$  为系统瞬时视场立体角,  $\tau_m$  为光学系统的单色透过率,  $\tau_a$  为大气的单色透过率,  $\theta$  为太阳高度角,  $E_s(\lambda)$  为太阳在地面的光谱辐照度,  $D_s^*$  为探测器的探测率,  $A_D$  为探测器的光敏面,  $\eta_s$  为信号过程因子,  $\Delta f$  是系统的电子学噪声等效带宽,  $\Delta \rho_s$  为相邻象元的单色反射率差。

评价成像光谱仪系统性能时, 取  $\Delta \rho_s$  为 100%,  $\tau_m$ 、 $\tau_a$ 、 $D_s^*$  在  $\lambda_1$  至  $\lambda_2$  的窄波段内取平均值  $\tau_s$ 、 $\tau_a$ 、 $D_s^*$ , 则系统的噪声等效反射率  $NE\Delta\rho$  为

$$NE\Delta\rho = \frac{4 \sqrt{A_D \Delta f}}{D_0^2 \omega \eta_s \tau_s \tau_a D_s^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sin \theta E_s d\lambda} \quad (2)$$

系统的电子学噪声等效带宽为

$$\Delta f = \frac{\pi}{2} \frac{1}{2\tau}, \quad (3)$$

$\tau$  为系统对单个象元的凝视时间。

对决定成像光谱仪性能的主要技术指标(如光谱分辨率、辐射灵敏度、瞬时视场、总视场等参数)的确定原则和制约因素, 文献[1]已作了详细的分析和讨论, 本文不再赘述。

## 1.2 总体方案

实用机载成像光谱仪系统的总体方案为线列探测器加光机扫描。成像光谱仪的窄光谱间隔使每一通道的入射辐射能量很小, 为确保足够的探测灵敏度, 系统设计了 180mm 的通光口径。成像光谱仪的高光谱分辨率由可见/近红外、短波红外和热红外 3 个独立的光谱仪系统实现。成像光谱仪的光机系统设计成模块化结构, 主要由 1 个光机扫描成像系统和 3 个光谱仪组件组成。为保证各波段的像元配准, 采用全部光谱波段共用一个视场光阑的结构。光谱仪均采用光栅分光, 在色散谱面上由线列探测器接受不同波段光信号。

## 1.3 主光学系统及光谱仪设计参数

成像光谱仪光学系统原理图见图 1。主光学系统由一块  $F/No=1$  的抛物面镜将地物辐射会聚到视场光阑, 经准直后以平行光出射。准直镜与主镜共焦, 视场光阑设置在焦点处。光谱仪包括二次会聚(扩束)和准直镜、分光元件、会聚单元及线阵探测器。光谱仪在平行光路中与主光学系统耦合, 可见/近红外光谱仪和短波红外光谱仪在平行光路中以级联方式组合, 3 个光谱仪也都能单独应用, 这样, 该成像光谱仪可以组成 4 种工作模式。

## 2 系统配置

实用成像光谱仪系统由机载和地面两大部分组成。机载部分包括: 传感器光机扫描头、机上辐射定标系统、电源控制系统、数据采集系统、记录及显示系统。地面部分包括: 数据回放系统、性能检测及光谱定标系统。系统功能框图见图 2。

### 2.1 数据采集系统

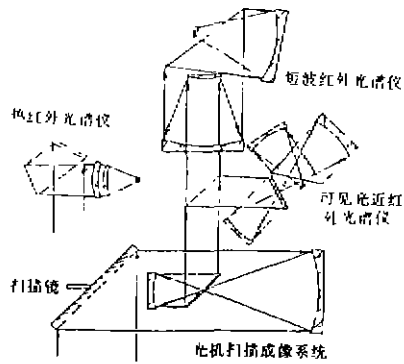


图1 系统的光学结构

Fig. 1 Optical configuration of the system

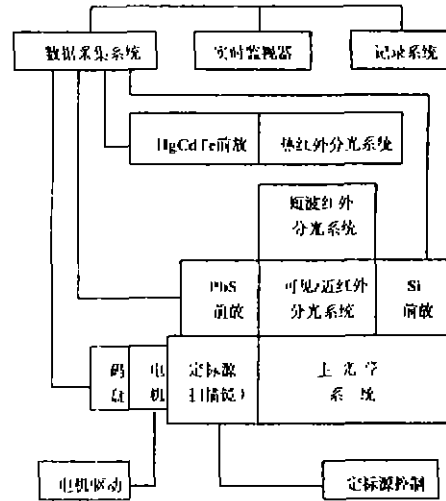


图2 成像光谱仪机载系统功能框图

Fig. 2 Block diagram of the MAIS airborne system

数据采集系统对前置放大器输出的多路信号进行放大、滤波、电平变换和 A/D 转换,并具有光谱编程和通道编程功能,产生行计数、通道号、日期、时间等辅助数据,通过数据格式器将多路视频信号、辐射定标信号、飞机姿态信号、辅助数据等形成规定格式输出,送数据记录器记录,通道数为 64,12bit 数字量化,输出瞬时数据率 20.5Mbps,输出平均数据率为 5.12Mbps (以每象元 16bit 量化计算)。

表 1 光学系统主要参数:(长度单位为 mm)

Table 1 Primary parameters of the optical system (length: mm)

扫描镜上系统	扫描镜长轴 254.5, 短轴 180 主镜(抛物面), $f=130, D=180$ ; 准直镜(抛物面), $f=56, F=56$ ; 视场光栏 $\Phi 0.51(3\text{mrad})$ , $\Phi 0.81(4.5\text{mrad})$		
	可见/近红外光谱仪	短波红外光谱仪	热红外光谱仪
使用波长:	0.44~1.08 $\mu\text{m}$	1.5~2.5 $\mu\text{m}$	8.0~11.6 $\mu\text{m}$
反投数:	32	32	7
瞬时视场:	3mrad	4.5mrad	3mrad
扫描光栅:	刻划密度 180 l/mm 闪耀波长 0.62 $\mu\text{m}$ 衍射级次 -1 级 尺寸 101 × 114	刻划密度 131.25 l/mm 闪耀波长 1.875 $\mu\text{m}$ 衍射级次 -1 级 尺寸 170 × 182	刻划密度 20 l/mm 闪耀波长 10.6 $\mu\text{m}$ 衍射级次 -1 级 尺寸 76 × 65
次会聚镜:	$f=130, D=60$	$f=56, D=58$ (扩束)	
二次准直镜:	$f=220, F=100$	$f=165, D=176$	
成像会聚镜:	$f=148.62, R56 \times 102$	$f=226, D=175$	双分离透镜组 $f=48.61$
探测器:	32 元 Si 阵列 单元尺寸 0.5 × 0.5 间距 0.05, 总长 23.27	32 元 PbS 阵列 单元尺寸 1.0 × 1.0 间距 0.2, 总长 38.20	8 元 HgCdTe 单元尺寸 0.5 × 0.5 间距 0.02, 总长 4.14

## 2.2 数据记录显示系统

本系统提供3种数字记录方法:使用B-VLDS数字磁带机的超大容量数字记录系统,1盒T120录象带记录数据容量为10.2GBytes,数据平均速率可达4MBytes/S. EXB-8505 8mm数字磁带机,采用非压缩方法,记录速度500KBytes/s,112m磁带容量为5GB. 计算机硬盘记录系统使用1G以上的大容量硬盘,通过专用数据接口存储缓冲,可接收瞬时速率4MBytes/S,块长64KBytes的数据.

实时显示采用硬件实现的多功能移动窗监视器和软件实现的计算机图象显示两种方式,前者配合磁带机记录系统,后者用于大容量硬盘记录系统.

## 2.3 机上定标源

可见-近红外和短波红外的反射定标源为直径140mm、出射孔径28mm的卤钨灯积分球. 卤钨灯由稳流源供电,辐射输出波动小于1.2%. 在热红外波段,定标源为两块 $\epsilon=0.98$ 充满通光口径的黑体板. 用反射定标源校正传感器响应函数变化的影响. 热红外定标用于测量目标的辐射温度.

## 2.4 数据回放系统

该系统可在飞行现场对所记录的光谱图象数据作快视检查,以确保遥感数据的可靠获取. 系统具备制作通用性光谱图象数据产品的能力. 按用户需要将记录数据转换到能输入用户图象处理系统的数据存储介质:可擦除光盘、大容量硬盘或8mm磁带. 图3、4分别为成像光谱仪系统的机上数据流程图和地面回放数据流程图.

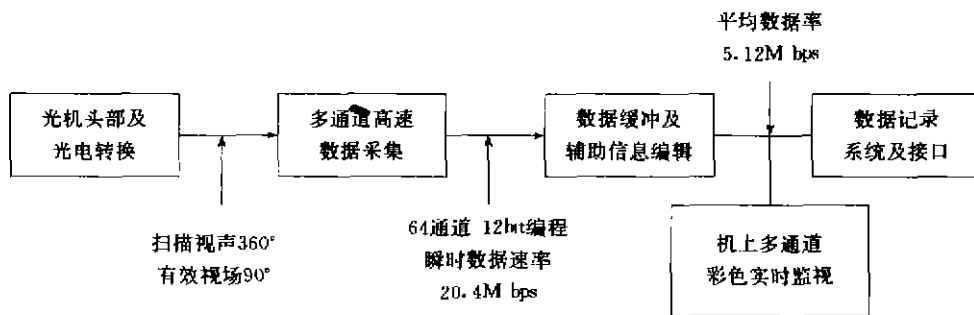


图3 机上数据流程图

Fig. 3 The flow chart of data acquisition onboard

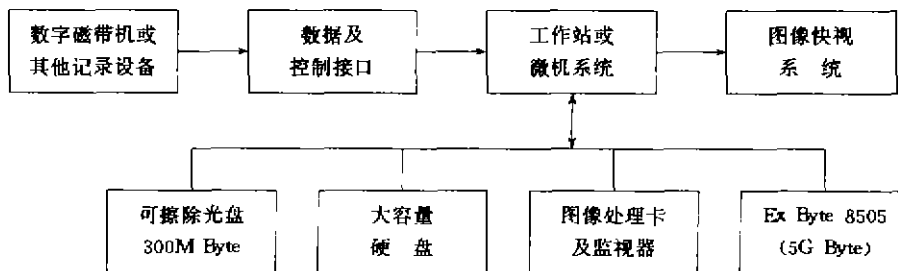


图4 地面回放数据流程图

Fig. 4 The flow chart of ground data playback

### 3 系统灵敏度和主要技术参数

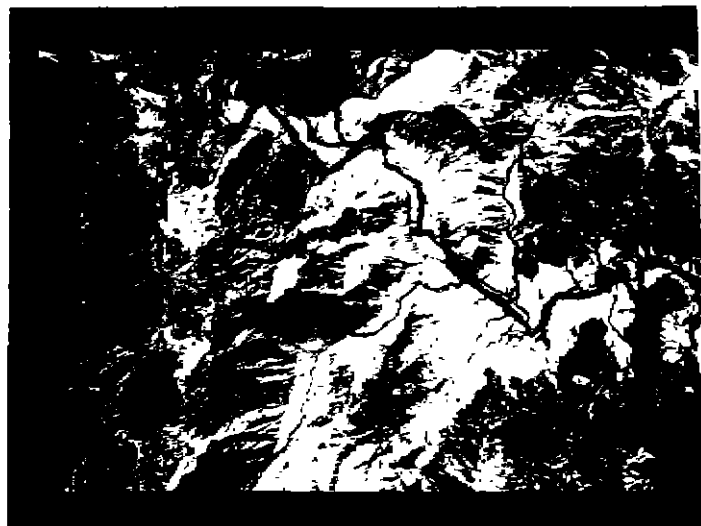
系统在反射光谱区的探测灵敏度通常用噪声等效反射率差  $NE\Delta\rho$  来衡量. 根据定义,  $NE\Delta\rho \leq (V_N/V_s)\rho$ . 在晴天和高太阳情况下, 以标准参考板为目标, 测量系统前放输出. 热红外波段用等效噪声温差  $NE\Delta T$  衡量,  $NE\Delta T = (V_N/V_s)\Delta T$ . 以已知温差的两块黑体板为目标测量. 得到系统的  $NE\Delta\rho$  在可见/近红外波段为 0.2~0.4%, 短波红外波段为 0.5~1.0%, 热红外波段  $NE\Delta T < 0.5K$ . 表 2 所列为 MAIS 实用机载成像光谱仪系统主要技术参数.

表 2 MAIS 主要技术参数  
Table 2 Main technical Parameters of the MAIS

波段数	72	行象元数	512
波段范围	0.44~1.08 $\mu\text{m}$	数据编码	12bit
	1.5~2.5 $\mu\text{m}$	数据率	5.12Mbps
	8.0~11.6 $\mu\text{m}$	数据记录速率	1.58~15.8Mbit/S
光谱分辨率	20nm (0.44~1.08 $\mu\text{m}$ )	信噪比	200~500:1 (0.44~1.08 $\mu\text{m}$ )
	30nm (1.5~2.5 $\mu\text{m}$ )		50~200:1 (1.5~2.5 $\mu\text{m}$ )
	450nm (8.0~11.6 $\mu\text{m}$ )	温度灵敏度	$\leq 0.5K$ (8.0~11.6 $\mu\text{m}$ )
瞬时视场	3mrad (0.44~1.08 $\mu\text{m}$ )	探测器	32 元 Si 线列
	3mrad (1.5~2.5 $\mu\text{m}$ )		32 元 PbS 线列
	4.5mrad (8.0~11.6 $\mu\text{m}$ )		8 元 HgCdTe 线列
总视场	90°	体积	639 × 480 × 690(mm) <sup>3</sup>
扫描速率	10 l/s		
光学口径	180mm		

### 4 遥感应用

机载成像光谱仪在完成实用系统研制过程中, 参与了国内外多项成像光谱遥感试验和应用研究. 在地质找矿、油气勘查、海洋及海岸带、生态环境等应用领域获取了一批高质量的成像光谱数据. 通过光谱信息的提取和分析研究得到很好的结果. 在 92 年 10 月中日合作“塔里木盆地柯坪地区油气资源勘探遥感应用试验”中, 利用成像光谱仪高光谱分辨率特性在 2.331、2.347、2.364 $\mu\text{m}$  成功地区分出碳酸钙和碳酸



SITE NO.15 34°05'30"N, 104°26'00"E PLACE: QILIAN MOUNT, CHINA

图 5 MAIS 遥感图像(祁连山)

Fig. 5 Remote sensing image of MAIS (QILIAN Mount)

镁吸收谱带的微小差异. 1994年5月在胜利油田昌潍试验区, 利用遥感信息进行油气靶区预测试验研究, 分析结果表明成像光谱仪能敏感地收集烃类微渗漏地表异常信息. 与测区内已知地面化探资料的复合率达70%以上. 1994年11月和1996年10月该仪器还成功地为意大利AGIP石油公司和美国TAXCO等石油公司在中国塔里木盆地石油开发投标区进行了1万和3万平方公里的油气勘探遥感调查的商业应用. 从获得的数十GB可见光近红外、短波红外和热红外波段光谱图象数据的分析研究表明, 成像光谱仪所提供的高分辨率光谱信息具有广泛的实际应用前景.

**致谢:** 本项工作在课题组全体同志通力协作下完成, 文中遥感应用试验的数据处理及应用研究由中国科学院遥感应用所和华东师范大学河口海岸国家重点实验室参研人员共同承担. 胜利石油管理局勘探公司和北京科海高技术(集团)应用电子公司完成了胜利油田昌潍试验区利用遥感信息进行油气靶区预测的试验研究报告. 在此一并致谢.

#### REFERENCES

- 1 WANG J Y, *et al.* *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王建宇, 等. 红外与毫米波学报), 1992, 11(3): 181~187
- 2 XUE Y Q. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (薛永祺. 红外与毫米波学报), 1992, 11(3): 169~179

#### AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER SYSTEM

SHEN Ming-Ming WANG Jian-Yu

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

**Abstract** The design of the MAIS airborne imaging spectrometer system and its practical applications were described. The main technical parameters were given.

**Key words** imaging spectrometer, remote sensing.