

热红外多光谱扫描仪

沈鸣明 杨存武

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要: 描述了一种新型地质应用专题遥感仪器航空热红外多光谱扫描仪的系统设计, 主要性能参数的测试与结果, 以及仪器飞行试验结果. 该仪器在 $8.2 \sim 12.2 \mu\text{m}$ 范围内细分为 7 个光谱段.

关键词: 扫描仪, 热红外, 多光谱.

引言

1970 年以来, 我们研制了多种类型的通用及专用航空扫描仪. 工作波段自紫外、可见至红外. 在资源、环境、海洋、灾害等领域的航空遥感应用中获得了大量有用的地物光谱信息. 随着光谱研究的深入和技术的发展, 要求传感器的宽波段探测通道向窄波段或细分波段技术发展. 20 世纪 80 年代中发展的红外细分光谱扫描仪, 以岩矿的红外光谱特征为依据, 在 $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 范围内细分若干窄波段, 获得了更多的岩矿特征光谱信息. 为了测绘构成岩矿的主要物质如石英和长石, 还必须获得 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 区域的岩矿特征光谱数据. 因此, 我们研制了地质遥感专题用热红外多光谱扫描仪 (ATIMS).

1 ATIMS 系统设计

1.1 设计考虑

ATIMS 的设计技术要求: 光谱范围为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$, 7 个通道, 扫描视场大于 60° , 瞬时视场为 3 mrad , $NE\Delta T < 0.5 \text{ K}$, 工作平台是 Citation S/II 高空遥感飞机.

传感器的系统设计必须兼顾 Citation S/II 飞机提出的环境制约和对该仪器的技术要求. 作为扫描仪飞行平台的 Citation S/II 遥感飞机是一种高性能轻型高空飞机. 最大升限为 13000 m , 飞行速度从低速至巡航速度为 746 km/h . 前舱是密封舱, 扫描窗口设在后舱, 传感器的光机扫描头必须适应后舱狭小空间的安装要求. 头部的所有信号电缆和控制电缆均通过密封电缆与安装在前舱的电子系统连接. 扫描仪的扫描速率根据飞机速高比范围, 即满足不同飞行高度和地面分辨的航空作业要求设置.

根据对岩石波谱特征的研究, 岩石的红外辐射特征与其矿物质含量有关. 对不同的岩

体因表面特征和内部热学性质的不同,其波谱特性曲线具有不同的特征.在遥感技术中光谱吸收峰的存在是识别地物的重要理论依据.例如含硅量高的酸性岩石在 $8.6\sim 9.3\mu\text{m}$,中性岩的吸收峰在 $9.2\sim 10.0\mu\text{m}$,而含硅量低的超基性岩光谱吸收峰位置在 $10.1\sim 11.3\mu\text{m}$.因此,检测岩石的光谱识别特征是扫描仪系统设计中划分波段的主要依据.

1.2 工作波段和辐射探测器

在对岩体热辐射特性进行大量统计分析基础上,获得地质目标的辐射光谱特征,并综合考虑红外探测器性能和系统设计的要求后确定了ATIMS的工作波段(见表1).

表1 ATIMS光谱波段
Table 1 Spectral-band specifications of ATIMS

通道	1	2	3	4	5	6	7
光谱范围(μm)	8.2~8.6	8.6~9.0	9.0~9.4	9.4~9.8	9.8~10.6	10.6~11.4	11.4~12.2
波段带宽(μm)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	0.8	0.8

扫描仪使用的辐射探测器是我所研制的多元线列光导型HgCdTe探测器.多元探测器光敏面总长为4.8mm,各单元尺寸及光谱响应范围见图1.探测器的参数见表2.

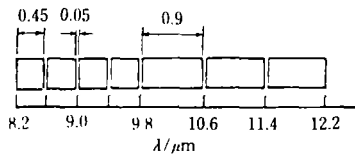


图1 探测器尺寸及光谱响应范围
Fig. 1 Size and spectral response range of detector-array

表2 探测器参数
Table 2 Detector-array specifications

光谱响应	8~12.2(μm)
元数	7(元)
排列	线列, 相邻元间隔0.05mm
单元尺寸	0.45×0.45, 0.45×0.90(mm)
D_s^*	$5 \times 10^9 (\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W})$
工作温度	77(K)
制冷方式	贮液式金属柱瓦瓶

1.3 辐射灵敏度

ATIMS红外波段的探测灵敏度通常由噪声等效温差 $NE\Delta T$ 来衡量,计算公式为

$$NE\Delta T = \frac{4\sqrt{A_D \Delta f}}{D^* D_0 \beta^2 \eta_e \tau_a \tau_o X_T}, \quad (1)$$

式(1)中 A_D 是探测器光敏面积, Δf 是系统噪声等效带宽, D^* 为探测器的探测率, D_0 为有效通光口径, β 为瞬时视场, η_e 为电路系统信号传递因子, τ_a 为大气透过率, τ_o 为光学系统透过率, X_T 是工作波段内温度为300K的目标的微分辐射出射度.

扫描仪电子学带宽与仪器性能有密切关系.对于视频信号而言,电路的信号传递因子与带宽成正比.同时,系统噪声亦随带宽的增加而增加.噪声大将最终限制系统的探测灵敏度.为适应飞行平台不同的速高比,本机设置了10、15、20、301/s四档扫描率.相应的电子学带宽分别为10.2kHz、15.4kHz、20.5kHz、30.7kHz.由系统程控滤波器限定.

据系统设计参数及查表,式(1)中各参量取值为: $D^* = 5 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, $D_0 = 17.1 \text{ cm}$, $\beta = 3 \text{ mrad}$, $\eta_e = 0.80$, $\tau_a = 0.9$, $\tau_o = 0.4$, $A_D = 0.002 \text{ cm}^2$ (1~4通道)、 0.004 cm^2 (5~7通道).计算结果列于表3.表3中 $NE\Delta T_1$ 是扫描速率为30Hz时

的计算值, $NE\Delta T_{II}$ 是扫描速率为 15Hz 时的计算值. 由表 3 可见, 在满足扫描重叠率要求的条件下, 选取较低的扫描速率可提高系统探测灵敏度.

表 3 ATIMS 通道灵敏度估算
Table 3 Sensitivity calculation of ATIMS

通道	工作波段 (μm)	X_T ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \times 10^{-5}$)	$NE\Delta T_I$ (K)	$NE\Delta T_{II}$ (K)
1	8.2~8.6	2.2861	0.45	0.32
2	8.6~9.0	2.2456	0.46	0.33
3	9.0~9.4	2.1837	0.47	0.34
4	9.4~9.8	2.1074	0.49	0.35
5	9.8~10.6	3.9449	0.37	0.26
6	10.6~11.4	3.5603	0.41	0.29
7	11.4~12.2	3.1630	0.46	0.33

1.4 光学系统

图 2 是 ATIMS 的光学系统示意图.

ATIMS 光学系统由扫描镜、主光学系统及分光组件构成. 根据系统总体对空间分辨率、辐射灵敏度和光谱通道的要求确定主光学系统入瞳口径为 180mm. 我们设计的主光学系统中, 入射辐射经主镜(抛物面)会聚, 通过视场光阑投向准直镜(抛物面). 两个抛物面的焦点都位于视场光阑处, 结构紧凑, 能满足 Citation S/II 遥感飞机苛刻的安装尺寸限制. 准直后的光束通过反射镜进入分光组件, 既便于分光组件的装校和光谱定标, 又能方便地置换不同波段的光分组件, 使仪器可扩展其探测光谱范围. 设计中已考虑了两块抛物面镜的实际加工精度, 保证由主光学系统决定的空间分辨率的要求. 并对准直光束直径作合理的选择, 既使分光组件的设计难度不至太大, 又有一个合适的中心挡光比.

分光组件把 8.2~12.2 μm 的远红外波段分为 7 个光谱段, 并成象在 HgCdTe 多元线列探测器上. 分光元件采用衍射效率高, 谱区线性良好的红外闪耀光栅. 为消除短波的二级光谱, 探测器窗口镀有前截止型滤光膜. 由两片球面锗透镜组合而成的会聚透镜组相对孔径小, 视场角大, 并具有良好的像质. 光学系统的主要部件及参数见表 4.

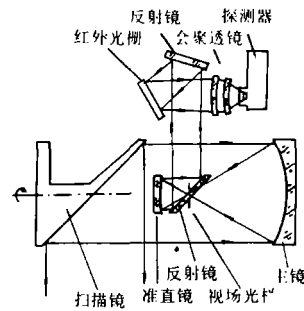


图 2 ATIMS 的光学系统示意图
Fig. 2 Optical configuration of ATIMS

表 4 ATIMS 光学系统主要部件及参数

Table 4 Main technical parameters of the ATIMS optical components

部件名称	参 数	部件名称	参 数
扫描镜	45° 旋转平面反射镜, 椭圆形 180 × 255 mm ²	视场光阑	圆孔, $\Phi 0.45$ mm
主 镜	抛物面反射镜, $f = 180$ mm, $F/1$	红外光栅	闪耀型, 201/mm, 闪耀波长 10.2 μm , 闪耀角 5.8°
准直镜	抛物面反射镜, $f = 56$ mm, $F/1$	会聚透镜组	双分离锗透镜, $f = 56$ mm, $F/0.78$, 视场 4.91°

2 主要性能及测试结果

2.1 光谱特性

扫描仪多元探测器在焦面上所对应的波段位置必须在光谱定标系统上准确标定. 该系统使用单色仪, 通过微机系统采集通道光谱响应数据. 消除光源和单色仪的影响后得到的 ATIMS 各波段的光谱特性曲线见图 3.

考虑到在现有条件下, 探测器和光学系统总效率在长波段有明显下降, 故将 7 个通道光谱特性向短波方向偏移了 $0.4\mu\text{m}$.

2.2 空间分辨率

扫描仪空间分辨率的测试方法之一是扫描光栅法(图 4). 改变栅状目标的线度可得到一系列空间频率的测试结果. 扫描仪对栅状目标的分辨率 $P = (V_2 - V_1) / V_2$. 在仪器能量会聚系统无象差, 电子线路无频率传递下降的理想情况下, 光栅的分辨率 $P = 100\%$. 通常, 对实际系统以 70% 分辨率作为是否达到所需空间分辨率的数据. 本仪器测试结果分辨率为 85%, 空间分辨率达到 3mrad 设计指标.

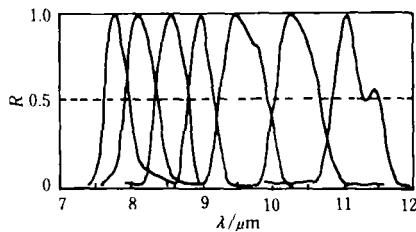


图 3 ATIMS 光谱特性

Fig. 3 Relative spectral response of ATIMS

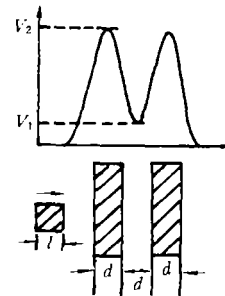


图 4 扫描光栅法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the scan grating method

2.3 辐射灵敏度

ATIMS 的辐射灵敏度通常用噪声等效温差 $NE\Delta T$ 来衡量. 根据定义

$$NE\Delta T = \frac{\Delta T}{V_s / V_n}, \quad (2)$$

式(2)中 ΔT 为充满口径的两个已知目标(我们用扫描仪的黑体参考源 BB_1 和 BB_2) 的温差. 两块黑体板的温差值用经过标定的数字温度计 WMY-01 测量, V_s 为 BB_1 , BB_2 信号电压的峰-峰值, V_n 为均方根噪声电压. 实测结果见表 5.

表 5 ATIMS 各通道 $NE\Delta T$ 测量结果
Table 5 Measured $NE\Delta T$ data of ATIMS

CH	V_s (mV)	V_n (mV)	$NE\Delta T$
1	1240	5.4	0.10
2	640	3.5	0.13
3	800	4.3	0.13
4	400	2.9	0.15
5	190	1.5	0.18
6	80	1.3	0.38
7	30	1.2	0.93

3 飞行试验

1990 年 11 月, ATIMS 安装在中国科学院 Citation S/II 型遥感飞机上在唐山进行首次飞行试验, 扫描面积为 1056km^2 , 航线总长为 144km , 航高为 5700m , 飞机地速为 450km/h , 试验获得满意结果, 图 5 是 CH1 至 CH7 拼接成的一帧原始地物景象. 图 5 中, 长波段的 CH6, 7 信噪比较低, 这与仪器性能检测结果相符. 图 6 是三个波段的合成图象. 对所获数据的初步研究结果表明, 扫描仪获取的物体热红外波段光谱信息比原有 $8\sim 12\mu\text{m}$ 单一宽波段传感器要丰富得多. 对区分试验区碳酸岩带的成岩地质世代和显示地质构造等方面显示出明显的优越性.

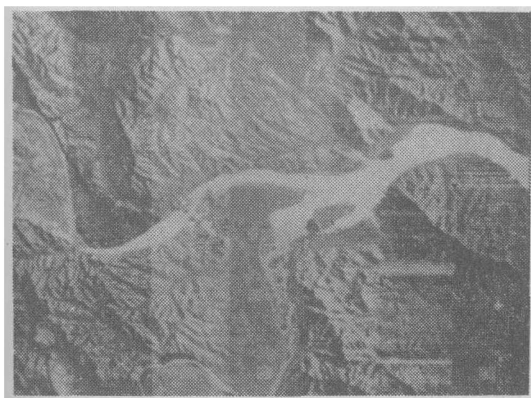


图 5 CH1~CH7 拼幅图象

Fig. 5 Assorted image with CH1~CH7



图 6 三波段彩色合成图象

Fig. 6 Pseudocolor composite image for 3 bands

1991 年 9 月 ATIMS 在澳大利亚北领地达尔文市和西澳省大理石坝 (Marble Bar) 试验区进行航空遥感试验, 再次获得成功. 通过对热红外多光谱图象的处理和专题信息提取, 清楚地显示出了达尔文市的交通网络, 和几处冷 (低温) 建筑的信息 (提示了建筑物绝热不良), 以及西澳省大理石坝试验区的地质地貌特征. 图 7 是大理石坝试验区热红外 CH1、CH2、CH3 的合成图象.

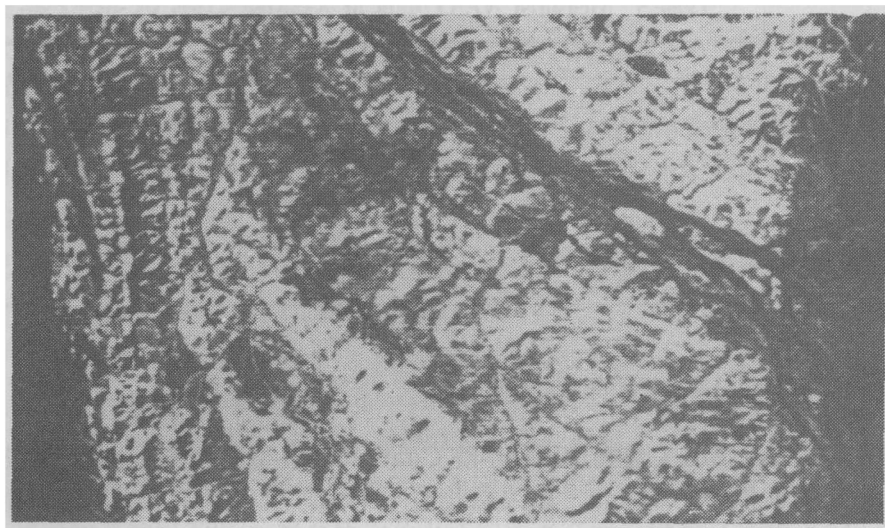


图7 澳大利亚大理石坝试验区
Fig. 7 Marble Bar district in Australia

致谢: 本项工作在课题组全体同志通力协作下完成, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- 1 Alexander FH Goetz, John B Wellman, William L Barnes. *Optical Remote Sensing of the Earth, Proceedings of the IEEE*, Vol. 73, No. 6, June 1985
- 2 Xue Yongqi, Shen Mingming, Yang Cunwu, Wang Jianyu, Guo Yiping. *New Progress of Airborne Scanners at SITP from 1986 to 1990, Proceedings of the 11th Asian Conference on Remote Sensing*

THERMO-INFRARED MULTISPECTRAL SCANNER

Shen Mingming, Yang Cunwu

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

Abstract: The thermo-Infrared Multispectral Scanner as a new special topic remote sensing instrument for geology applications, has been developed in China. It has 7 bands in the range of 8.2~12.2 μm . This paper describes its system design, the methods and results of performance measurements and the situation in the first airborne test.

Key words: scanner, thermo-infrared, multispectral.