

64 波段机载成象光谱仪

王建宇 薛永祺

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要: 讨论了 64 波段机载光机扫描式成象光谱仪的原理和设计, 并给出仪器的主要技术指标和初步试验结果。

关键词: 遥感仪器、成象光谱技术。

引言

成象光谱仪把传统的二维成象遥感技术和光谱仪技术有机地结合在一起而成为新一代的三维遥感仪器, 它把地球表面反射的太阳能量经过光谱仪色散形成几十个甚至几百个光谱波段, 其光谱取样间隔为 10~20 nm, 记录下来的几十到几百个波段的反射光谱图象, 经计算机处理及分析图象中的光谱特征就可以用来区分地物的类别。成象光谱仪集中了光学、探测器、电子学、计算机科学等领域的先进技术, 在遥感、天文、军事目标的搜索与跟踪等方面有广阔的应用前景。目前国外已取得了许多显著的成果^[1~3]。本文系统地介绍 64 波段机载成象光谱仪的性能指标、系统设计以及初步飞行试验结果。

1 工作原理和性能指标分析

1.1 成象光谱仪的工作原理

成象光谱仪既能记录空间信息, 又能记录光谱信息, 由完成二维空间成象的前光学系统和完成光谱第三维扫描的光谱仪组成。两者通过视场光栏完成连接。前光学系统把相应地物象元的光能量会聚到视场光栏上, 并和视场光栏一起决定系统的空间分辨率。空间成象的一维扫描由飞行平台的运动完成, 另一维则由仪器的光机扫描或面阵探测器的固体自扫描完成。光谱仪把进入视场光栏的光能量按需要的波长色散, 安装在焦平面上的 N 元探测器各自接收不同波长的光信号, 得到 N 个光谱波段, 完成地物光谱的第三维扫描。

1.2 成象光谱仪的性能指标分析

成象光谱仪是高光谱分辨率的遥感仪器, 因此, 高光谱分辨率或窄的光谱取样间隔是仪器的主要技术指标, 此外, 辐射灵敏度、瞬时视场、总视场等参数也是决定仪器性能的重要技术指标。这些技术指标的确定主要是以遥感应应用中的科学要求为依据, 同时也受到

技术发展以及其它条件的限制,而且这些指标之间也是相互制约的,它们之间的关系如下:

系统的辐射灵敏度可由系统的信噪比来反映,而信噪比由式(1)决定.

$$\frac{S}{N} = \frac{\tau_0 \tau_a \sin \Theta E(\lambda) D_0 \rho(\lambda) D^* \beta^2 \Delta \lambda \delta}{4 \sqrt{d^2 \Delta f}} \quad (1)$$

式(1)中 τ_0 为系统的光学效率, τ_a 为大气透过率, Θ 为太阳角, $E(\lambda)$ 是太阳的辐照度, D_0 为系统有效通光面积的等效直径, $\rho(\lambda)$ 为地物的反射率, D^* 为探测器的探测率, β 为系统的瞬时视场, $\Delta \lambda$ 为光谱取样间隔, d 为探测器线度, δ 为电路过程因子, Δf 为系统噪声等效带宽,

$$\Delta f = \frac{\pi}{2} \frac{1}{2 \tau_p} \quad (2)$$

式(2)中 τ_p 是系统对单个象元的凝视时间,一般随系统总视场的增加而减少,并和系统的扫描效率成正比.

从式(1)和式(2)可知,系统的信噪比和光谱取样间隔、瞬时视场的平方及凝视时间的 $1/2$ 次方成正比,因此在光谱分辨率、空间分辨率、信噪比、总视场等参数中,要提高某一指标,往往要牺牲其它指标.

根据对地物光谱数据的统计和分析,要很好地识别地物目标,成像光谱仪必须具有 $10 \sim 20$ nm的光谱取样间隔.如果探测高岭土的吸收双峰,系统在 $2.0 \sim 2.4$ μm 的波段中至少要有50倍的信噪比,如要探测到植被在 0.7 μm 附近的“红端蓝移”现象,系统在这附近的波段应有100倍左右的信噪比.以上信噪比的估算是在23 km能见度、标准LOWTRAN大气条件下对反射率为0.5的地物进行的.对于大多数遥感应用,合适的空间分辨率为 $10 \sim 30$ m左右,这就要求用于10 km左右高度的航空遥感成像光谱仪的瞬时视场为 $1 \sim 3$ mrad.为了提高航空遥感的飞行效率,仪器的总视场应在 60° 以上.

2 成像光谱仪的系统设计

系统选择了线列探测器加光机扫描的设计方案,工作波段为64,其中可见、近红外($0.46 \sim 1.1$ μm)32个波段,光谱取样间隔为20 nm;短波红外($1.4 \sim 2.4$ μm)32个波段,光谱取样间隔为25 nm.波段的选择是基于以下的分析.

首先是考虑到成像光谱仪的实用性.由于地球表面物质在 $0.4 \sim 2.4$ μm 内具有 $10 \sim 40$ nm带宽的光谱特征,这就要求成像光谱仪在波段选择上既要有较窄的光谱取样间隔,又要有较大的光谱覆盖范围.尽管最佳的光谱取样间隔为10 nm,但作为原理性样机, $20 \sim 25$ nm的光谱取样间隔已经比以前的仪器大有提高,且已能满足大多数使用的需要.根据文献[3]的分析,光谱取样间隔为 $\Delta \lambda$ 的仪器在一定条件下也能探测到吸收带宽小于 $\Delta \lambda$ 的吸收峰.

其次是考虑到探测器的选择.可见、近红外波段选用了32元硅线列探测器.短波红外选择了我所研制的16元碲镉汞探测器.系统还采用了光栅步进技术,通过改变光栅的角度,使16元的探测器完成32个波段红外光谱波段的扫描.32个波段分为2段,在

1.42~1.82 μm 和 1.98~2.40 μm 各取 16 个波段, 去掉 1.9 μm 附近的水汽强吸收峰, 以进一步提高仪器的光谱分辨率. 仪器可选择两种模式工作. 模式 1 为每条航线飞行两次, 每次光栅固定在一个位置上, 两次得到 32 个波段. 模式 2 为飞行中每隔一条扫描线改变一次光栅的位置, 两组波段的信息交叉记录. 这种模式的两组图象空间配准精度比模式 1 大有提高, 可达 0.5 象元, 根据地物的相关性, 经过简单的图象处理, 配准精度还可提高, 但此时光栅是在动态下工作, 技术难度高. 这两种工作模式可根据需要选择.

由于成像光谱仪的光谱取样间隔窄, 瞬时视场小, 因此落到探测器上的光能量一般都很弱, 这就希望通过增加光学口径来提高系统灵敏度, 同时航空遥感要求仪器的总视场尽量大, 因此光机扫描一般在物方完成. 常用扫描方式有四方棱镜、多面转镜、斜 45 度镜、三角镜摆扫、平面摆镜等 (见图 1), 各种扫描方式的特性系数见表 1.

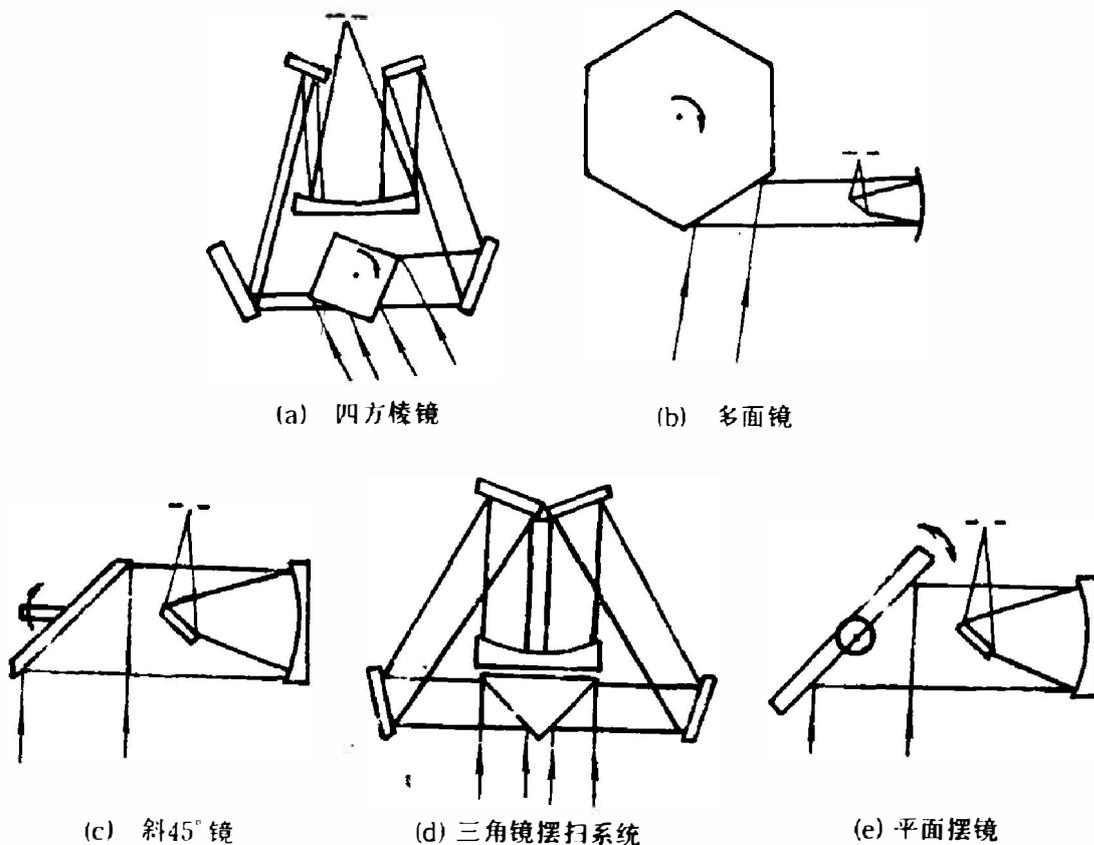


图 1 各种扫描系统的结构

Fig. 1 The architectures of different scanner systems

表 1 各种扫描方式的特性

Table 1 The characteristics for different scanning manners

扫描方式	总视场 ($^{\circ}$)	效率 (%)	口径利用率 (%)	旋转面线度	扫描控制	扫描速率
四方棱镜	> 90	50	< 50	$< D$	易	高
多面镜	$\text{约 } 2\pi / n$	50	约 90	$2\sqrt{2} D / \sin(\pi / D)$	一般	高
斜 45 度镜	> 90	25	约 90	D	一般	较高
三角镜摆扫系统	约 30	70	< 50	$< D$	难	低
平面摆镜	约 10	70	约 90	$\sqrt{2} D$	难	低

注: n 为多镜面数; D 为光学口径的直径.

分析表 1 中的参数和图 1 中的结构可知,四方棱镜虽然总视场大、扫描效率高、扫描镜线度小,但光学口径的利用率低,且由于双光束结构使得光学系统的稳定性差,容易引入象差,所以没被采用.三角镜扫描系统尽管集中了平面摆镜和四方棱镜的优点,扫描效率又高,但总视场不够宽;而且机械控制难度很高,由于时间和经费等原因未被采用.斜 45 度转镜尽管扫描效率偏低,但总视场大,光学口径利用率高,光学稳定性好,综合指标能满足系统设计的要求,因此,系统最终选择了斜 45 度镜的扫描方式.

成像光谱仪的光谱分辨率、空间分辨率、总视场、信号的信噪比是评价系统的主要参数,这些参数既有各自的特定含义,又是相互制约的,系统的总体设计就是对这些参数及其它一些参数(如光学口径、光学系统的 F 数、探测器的线度等)进行综合选择.以上这些参数除式 (1) 中的关系外,还存在如下的制约关系:

$$\Delta f = \frac{\pi}{2} \frac{q\Omega}{2\eta\beta}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{d}{f} \quad \text{或} \quad \beta D = \frac{d}{F}, \quad (4)$$

$$\omega = \frac{n(d+b)}{f'}, \quad (5)$$

$$kD^2 = D_0^2; \quad (6)$$

这里 q 是系统的扫描率, Ω 是总视场, η 是扫描效率, F 是光学系统的 F 数, ω 是光谱仪中会聚镜承担的总视场, f 是系统的主焦距, f' 是光谱仪中会聚镜的焦距, k 为系统光学口径的利用率, D 为实际光学口径, D_0 为系统有效通光面积的等效口径.

把式 (1)、(2)、(3)、(4)、(6) 合并可得

$$\frac{S}{N} = \frac{\tau_0 \tau_a E(\lambda) \sin \Theta k D^2 D_0^2 \Delta \lambda \rho(\lambda) d \sqrt{\beta 2 \eta \delta}}{4 F^2 \sqrt{\Omega q}} \quad (7)$$

根据式 (7) 可以得到在不同瞬时视场的情况下系统信噪比 S/N 与光学系统的 F 数和探测器线度 d 之间的关系曲线,以及不同 β 时 S/N 与光学口径 D 的关系如图 2 所示.

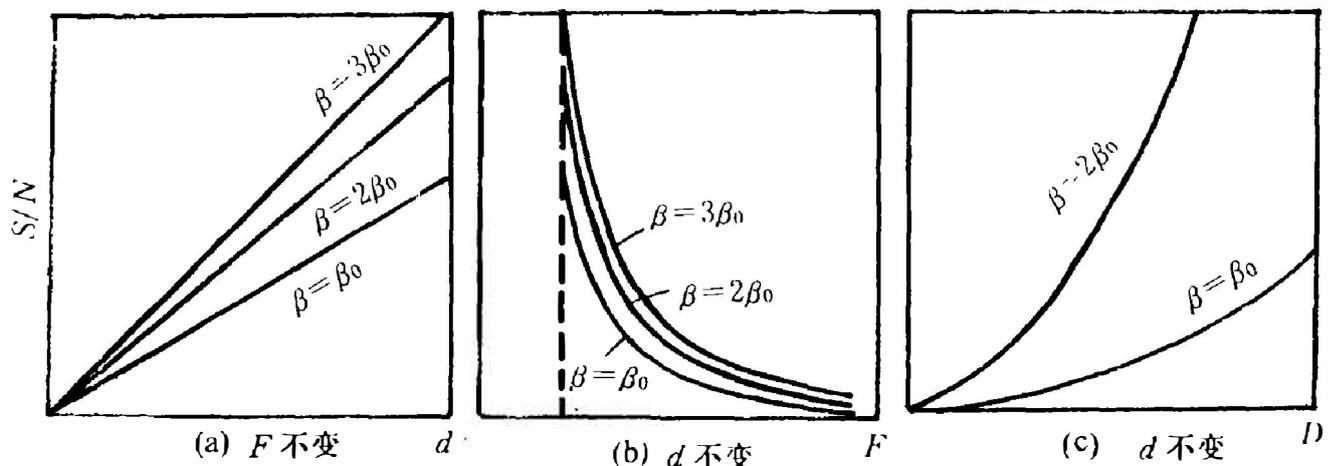


图 2 不同的 d 、 F 、 D 对 S/N 的影响

Fig. 2 Variation of S/N with different d , F , D

如果把式 (7) 中的 F 用 D 来表示, 可得

$$\frac{S}{N} = \frac{\tau_0 \tau_a E(\lambda) \sin \Theta k D^2 D^* \Delta \lambda \rho(\lambda) \beta^{5/2} \sqrt{\beta 2 \eta} \delta}{4 \sqrt{\Omega} q d} \quad (8)$$

根据以上参数之间的关系, 可以看到:

(1) 系统信噪比 S/N 与瞬时视场 β 的 $5/2$ 次方成正比, 与波段宽度 $\Delta \lambda$ 成线性关系, 与总视场 Ω 的 $1/2$ 次方成反比, 与扫描效率的 $1/2$ 次方成正比。

(2) 在探测器的线度 d 被选定之后, 在光学系统成像质量允许的情况下, F 数应尽量小, 系统信噪比随 F 数减小的平方而增加, 根据式 (4), 在相同的 β 情况下, F 数的减小, 实际上就是光学口径的增大。

(3) 适当增大探测器的线度将有利于系统信噪比提高, 但过大的 d 会使光谱仪的体积变得过大, 光谱仪的体积随 d 的增加呈三次方增加, 另外过大的 d 也会使探测器的 D^* 下降。

为了合理选择这些参数, 通过计算机对各种不同结构、不同参数、不同探测器的系统的模拟, 对系统进行了优化设计。表 2 给出了在 $2.2 \mu\text{m}$ 附近波段在不同参数的系统中的部分模拟结果。

表 2 取不同参数的成像光谱仪性能计算机模拟结果^[1]

Table 2 The computer simulation results for the imaging spectrometers with different parameters^[1]

方案	探测器	$\beta^{[2]}$ (mrad)	扫描方式	η (%)	Ω ($^\circ$)	$D^{[3]}$ (mm)	$A^{[3]}$ ($\text{cm}^{[2]}$)	d (mm)	D^* ($\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$)	$S/N^{[4]}$
1	HgCdTe	1.5	45 $^\circ$ 转镜	25	90	180	220	0.3	5×10^{11}	163
2	HgCdTe	1.5	45 $^\circ$ 转镜	25	90	120	95	0.2	5×10^{11}	105
3	HgCdTe	1.5	四方棱镜	50	90	168	60	0.2	5×10^{11}	96
4	HgCdTe	1.5	摇 扫	70	30	168	60	0.2	5×10^{11}	192
5	HgCdTe	2	四方棱镜	50	0	168	60	0.4	5×10^{11}	104
6	HgCdTe	2	摇 扫	70	30	168	60	0.4	5×10^{11}	209
7	HgCdTe	3	45 $^\circ$ 转镜	25	90	90	55	0.3	5×10^{11}	230
8	HgCdTe	3	45 $^\circ$ 转镜	25	90	60	25	0.2	5×10^{11}	160
9	PbS	5	45 $^\circ$ 转镜	25	90	180	220	1.0	5×10^{10}	101
10	PbS	5	四方棱镜	50	90	168	60	1.0	5×10^{10}	39
11	PbS	5	摇 扫	70	30	168	60	1.0	5×10^{10}	78

[1] 中心波长均为 $2.2 \mu\text{m}$, 波段带宽为 25 nm。

[2] 地面分辨率 $L = H \cdot \beta$, H : 飞行高度。

[3] D 为实际光学口径, A 为有效通光面积。

[4] S/N 按反射率 $\rho = 1$, 扫描速率 $q = 10 \text{ 1/s}$ 时计算。

从表 2 的结果可以看到, 如果使用硫化铅探测器, 由于器件的响应速度低 (一般为 2 kHz 以下), 只有通过增加瞬时视场或降低扫描速率来达到要求, 这使得系统的综合指标不高。四方棱镜的扫描效率比 45 度转镜高一倍, 但由于其光学口径利用率比 45 度转镜低一倍左右, 由于系统信噪比与扫描率的 $1/2$ 次方成正比而和光学口径利用率成线性关系, 因此根据综合指标分析和计算机模拟结果, 在目前的条件下选用斜 45 度转镜是比较

合适的, 最终根据仪器的实用性、仪器选用的可能性以及在遥感飞机上安装的空间, 选择表 2 中方案 1 的基本参数。

仪器采用了模块化设计方案, 将扫描转镜、主光学系统、可见近红外光谱仪、短波红外光谱仪分为四个独立的模块, 这样既能使仪器体积变小, 又使得各个模块可以独立装校、测试, 两个光谱仪可以一起使用, 也可以独立使用。

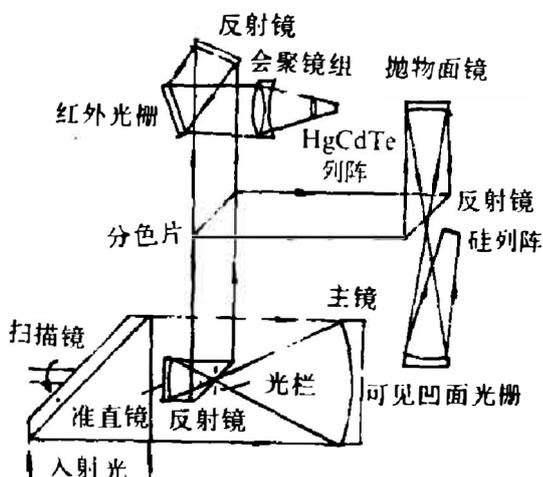


图 3 系统的光学结构

Fig. 3 The optical architecture of the system

光谱仪采用在平行光束中进行分光, 使得两个光谱仪之间的连接变得容易。可见近红外光谱仪采用反射式凹面光栅作为色散元件, 具有结构简单, 调整方便等特点, 凹面光栅的曲率半径为 144.7 mm, 每毫米 210 条刻线 32 元硅探测器的相邻光敏面中心距为 0.635 mm。短波红外光谱仪采用反射式平面光栅, 光栅每毫米 200 条刻线, 16 元碲镉汞的单元线度为 0.3 mm, 中心距为 0.4 mm。另外, 光栅安装角度可以变化 $3^{\circ}33'$, 以达到 16 元探测器完成 32 个光谱波段扫描的功能, 并为此设计一套高精度、高速度光栅摆动装置。

光机系统的结构如图 3 所示, 主要技术指标见表 3。

表 3 系统的主要技术指标

Table 3 Main technical parameters of the system

波段数	64	光学口径	180 (mm)
光谱取样间隔	20~25 (nm)	数据编码	8 (bit)
瞬时视场	1.5~3 (mrad)	数据记录	HDDT
总视场	90°	致冷方式	灌液式杜瓦瓶 (对碲镉汞器件)
扫描速率	10~20 (1/s)		

根据式 (1) 可以计算系统的噪声等效反射率差 $NE\Delta\rho$

$$NE\Delta\rho = \frac{1}{\left(\frac{S}{N}\right)_{\rho=1}}, \quad (9)$$

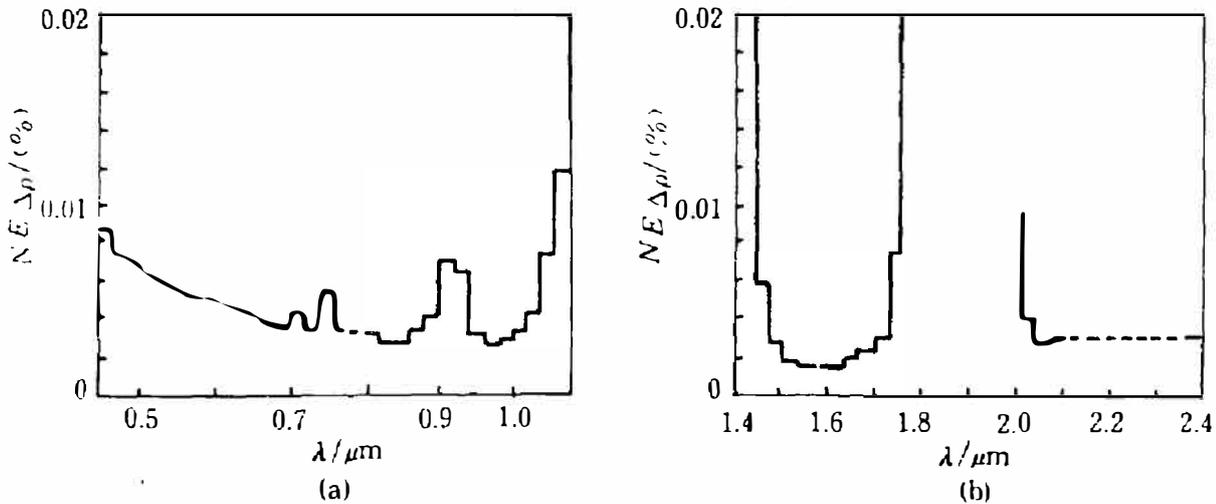
即

$$NE\Delta\rho = \frac{4\sqrt{d^2\Delta f}}{\tau_0\tau_a\sin\Theta E(\lambda)D\beta^2\Delta\lambda}, \quad (10)$$

计算得可见近红外波段和短波红外波段的噪声等效反射率差如图 4 所示。

3 结果

仪器的实验性样机于 1990 年完成, 并于同年 11 月在唐山附近某山区进行了首次飞行

图 4 系统的噪声等效反射率差 $NE\Delta\rho$ Fig. 4 The noise equivalent reflectivity $NE\Delta\rho$ of the system

试验. 结果在可见/近红外波段得到了比较满意的图象, 但在短波红外波段没有得到满意的图象. 系统经过改进, 1991 年 8 月在银川贺兰山、山西的五台山地区再次进行飞行试验, 这次在各个波段均取得了满意的结果. 1991 年 9~10 月该仪器还在澳大利亚参加了中澳联合遥感试验, 在澳大利亚达尔文地区的港口、海湾、矿区和西澳典型的遥感场蒙布巴地区进行了 20 多小时的飞行试验, 取得了一大批很有价值的遥感图象数据, 数据经初步分析结果表明该仪器对地质异常分析、植被叶绿素分析、海湾泥沙分析等方面具有很好的效果. 山西五台山矿区的遥感图象见本期彩色插页图 g, h, 彩图 g 为可见/近红外 5、9、14 波段的伪彩色合成, 彩图 h 为短波红外 20、23、28 波段的伪彩色合成. 澳大利亚达尔文市附近海湾可见/近红外 2、10、15 波段的伪彩色合成图象见本期彩色插页图 i. 在上述图象中, 具有信噪比高, 空间分辨率高, 层次清楚等特点, 对图象中的山区的地质走向、海水的流向、海湾中植被的生长状况都得到了充分的反映.

仪器多次飞行实验结果表明各项指标都符合设计要求, 并达到国际上同类仪器先进水平.

参 考 文 献

- 1 Wellmen JB et al. *Proceedings 1983 IEEE National Telesystem Conference*, 83CH2975-2, 1983, p.286-292
- 2 Vane G et al. *Proceedings of the 1984 Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1984, p.27-30
- 3 王建宇. *红外研究*, 1990, 4: 277-286

64-BAND AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER

Wang Jianyu, Xue Yongqi

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

Abstract: This paper discusses the concept and the design of the 64-Band Airborne Scanning Imaging Spectrometer. The main technical parameters and the primary experiment results are given.

Key words: remote sensing instruments, imaging spectrometer technique.