

# 机载扫描成像系统的技术发展

薛永祺

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要:** 叙述了机载扫描成像系统的发展, 基本结构, 特点及其应用。

**关键词:** 扫描仪, 遥感, 成像光谱仪。

## 引言

二十世纪六十年代, 我国在红外成像技术方面首先取得研究成果的是机载红外行扫描仪。它工作在  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  大气窗口, 接收常温物体的热辐射, 在夜间全黑条件下可以取得高分辨率热图象 (见图 1)。早期的红外行扫描仪均采用光机扫描方式, 用光学望远镜扫描物场, 可以达到  $100^\circ$  以上的扫描视场, 其工作原理如图 2 所示。扫描仪的望远镜视场 ( $\beta$ ) 通过物方反射镜旋转扫描, 并使地面的行扫描方向垂直于飞机的飞行轨迹, 当飞机向前飞行时, 一条条顺序平行的扫描线便构成对地面景物的扫描图象。单波段热红外行扫描仪常采用高扫描效率的肯尼迪式扫描器, 当追求高空间分辨率图象时, 用机械同步的显微镜光源扫描胶片记录的方式 (见图 3)。



图 1 热红外图象

Fig. 1 Thermal infrared image

七十年代以后, 随着空间遥感技术的发展, 行扫描仪的潜在用途远远超出军事上的夜间摄影和热目标的探测。作为一个典型, 中国科学院上海技术物理研究所 (SITP) 以行扫描成像技术为基础, 进一步开发了下列几种机载光电遥感系统: (1) 由单波段向多波段自

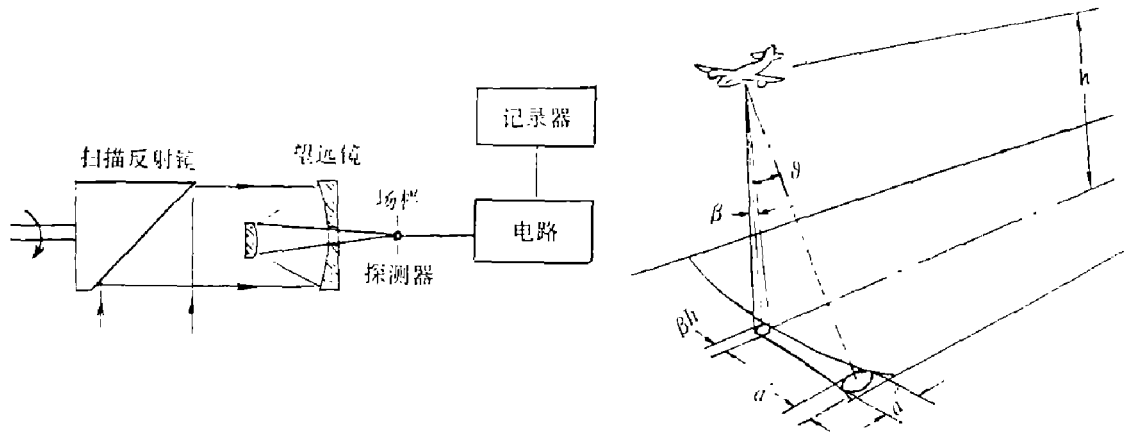


图2 光机行扫描原理图  
Fig. 2 Schematic diagram of line scanner

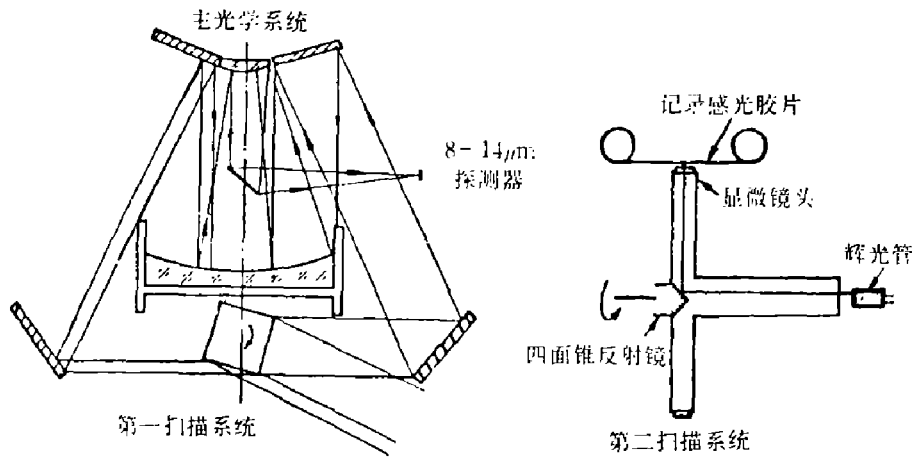


图3 行扫描仪的胶片记录方式  
Fig. 3 Film record method of line scanner

然发展的通用性的扫描仪，其光谱范围包括了从紫外到热红外的各个大气窗口，光谱分辨率不断提高，研制成功的扫描仪有：DGS型8波段航空多光谱扫描仪，AMS型19波段多光谱扫描仪，FIMS型短波红外细分光谱扫描仪，ATIMS型7波段热红外多光谱扫描仪，以及MAIS型组件式64波段可见光/短波红外成像光谱仪。(2) 专题应用的扫描仪：如海洋油污染监测用的红外/紫外扫描仪，林火监测用的 $0.45\sim 0.90\ \mu\text{m}/3\sim 5\ \mu\text{m}/8\sim 12\ \mu\text{m}$  3通道扫描仪。(3) 机载扫描仪配套系统：如多通道图象数据采集器，导航数据采集器，实时移动窗显示器，磁带或光盘记录系统。(4) 地面配套系统：如CCT格式器，图象预处理系统等。表1为这些机载扫描成像系统一览表。

表 1 机载扫描成像系统一览表

Table 1 Airborne scan imaging systems

扫描仪	航丁-41	航丁-42	双波段 红外扫描仪	三波段 扫描仪	IR/UV 扫描仪	红外细分光 谱扫描仪	DGS	AMS	ATMIS 热红外 多光谱扫描仪	MAIS
用途	高空红外遥感	低空红外遥感	森林探火	森林探火	海洋污染监测	地质遥感	综合遥感试验	综合遥感试验	地质遥感	综合遥感试验
扫描视场 (°)	104	100	100	100	100	100	100	90	90	90
瞬时视场 (mrad)	0.65	0.65	0.52	2.5	3	3~6	3	3	3	3, 4.5
扫描率 (1/s)	100	107	100	50	60	4~8	25~100	25~100	10~20	2~10
通光面积 (cm <sup>2</sup> )	78	125	78	52	90	64.3	52	52	180	180
焦距 (mm)	1000	923	230	666, 230	800	230	666	666, 230	180	180
扫描方式	四方棱镜	四方棱镜	四方棱镜	四方棱镜	双面 45° 光劈	四方棱镜	四方棱镜	四方棱镜	45° 反射镜	45° 反射镜
工作波段 (μm)	8~14	8~14	3~5 8~12.5	0.4~0.8 3~5 8~12.5	0.28~0.38 8~12.5	2.087 2.035 2.143 2.200 2.300 2.370 $\Delta\lambda=0.1$	0.40~0.43 0.43~0.48 0.48~0.54 0.53~0.62 0.61~0.70 0.68~0.90 3.0~5.0 8.0~12.5	0.45~1.10 ×16 波段 $\Delta\lambda=40$ nm 1.55~1.75 2.08~2.35 8.0~12.5	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	0.45~1.10×32 波段 $\Delta\lambda=20$ nm 1.4~2.5×32 波段 $\Delta\lambda=30$ nm
探测器及工 作温度 (K)	Ge(Hg) 38	10×2 多元 Ge(Hg) 30	InSb HgCdTe 77	Si HgCdTe 77	PMT 和 HgCdTe 77	PbS 线列 (常温)	PMT InSb }77 HgCdTe	Si HgCdTe 77	线列 HgCdTe 77	Si 线列 PbS 线列
致冷方式	斯特令 致冷机	LN <sub>2</sub> +氟节 流致冷机	LN <sub>2</sub> 杜瓦瓶	LN <sub>2</sub> 杜瓦瓶	LN <sub>2</sub> 杜瓦瓶		LN <sub>2</sub> 杜瓦瓶	LN <sub>2</sub> 杜瓦瓶	LN <sub>2</sub> 杜瓦瓶	
NEΔT 及 NEΔρ	<1 K (273 K)	<1 K (273 K)	<2.25 8~14 μm <0.1 (600 K)	彩色移动窗显 示电视格式机 —地实时传输	NEΔT ≤ 0.1 NEΔρ ≤ 0.1%	$\frac{S}{N} > 500$	<0.2 K (273K) NEΔρ < 0.2	<0.2 K (273K) NEΔρ < 0.2	<0.5K	$\frac{S}{N} > 100$
记录及显示 方式	90mm 黑白 航空胶片	160mm 黑白 航空胶片	90mm 彩色 胶片记录	彩色移动窗显 示电视格式机 —地实时传输	移动窗显示磁 带记录飞点管 回放	CCT 带	多路模拟磁带 HDDT 实时监视	多路模拟磁带 HDDT 实时监视	多路模拟磁带 HDDT 实时监视	多路模拟磁带 HDDT 实时监视

# 1 扫描仪主要技术性能

## 1.1 扫描图象的空间特性

机载扫描仪采用恒定角速度旋转的  $45^\circ$  镜 (见图 2) 和四方棱镜 (见图 3) 实现望远镜视场的物方扫描, 后者具有二倍角关系, 其扫描效率比前者高一倍. 以  $45^\circ$  扫描镜为例, 设飞行高度为  $h$ , 速度为  $v$ , 由望远镜场栏决定的瞬时视场  $\beta$  在飞机正下方的地面分辨率为  $\beta h$ . 当扫描角为  $\theta$  时, 扫描方向的地面分辨率  $a'$  为

$$a' = \beta h \sec^2 \theta, \quad (1)$$

飞行方向的地面分辨率  $a''$  为

$$a'' = \beta h \sec \theta, \quad (2)$$

扫描角为  $\theta$  时的地面象元与机下点的距离  $x$  为

$$x = h \tan \theta, \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{h}{\cos^2 \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}, \quad (4)$$

即扫描速度在地面的投影反比于  $\theta$  的余弦平方, 是非线性的. 因此, 以恒定的象点扫描速度回放图象时, 将产生缩小航带边缘图象的比例 (见图 4).

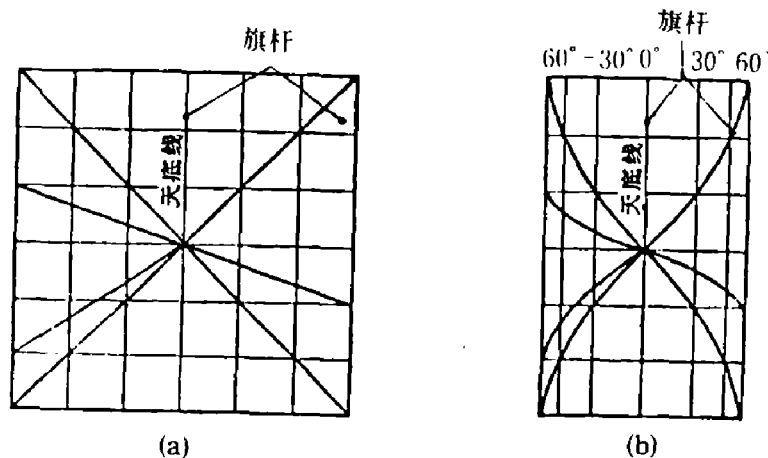


图 4 扫描航带上的图象失真 (a) 原始场景; (b) 扫描图象

Fig. 4 Image distortion (a) original scene; (b) scan image

扫描镜每秒旋转  $S$  周, 飞机以速度  $v$  飞行, 正下方扫描地带不产生漏带的条件为

$$\frac{v}{h} \leq S\beta, \quad (5)$$

扫描重迭率  $\rho$  定义为

$$\rho = 1 - \frac{1}{S\beta} \left( \frac{v}{h} \right), \quad (6)$$

当  $\rho = 0$  时的  $\frac{v}{h}$  为不发生漏带的最大速高比,

$$\left(\frac{v}{h}\right)_{\max} = S\beta, \tag{7}$$

当  $\rho > 0$  时的扫描图象, 逐行回放时将产生飞行方向的图象畸变; 另外, 飞行姿态的不规则变化, 如速度、高度、偏航、滚动等引起的图象畸变更为复杂. 不论是扫描方向或者飞行方向的图象畸变都可以在图象预处理时用象元重采样方法进行纠正.

### 1.2 系统灵敏度, $NE\Delta\rho$ 和 $NE\Delta T$

机载扫描仪主要以俯视方式获取地球环境的辐射图象, 图 5 为太阳辐射、地球辐射和地球漫反射太阳辐射的光谱分布. 由于地球与太阳相距很远, 太阳对地球所张的立体角很小, 在波长大于  $3.5 \mu\text{m}$  的地球漫反射的太阳辐射远小于地球自身的热辐射. 因此在小于  $3 \mu\text{m}$  的光谱范围, 扫描仪接收的主要是地物目标反射的太阳辐射. 对于  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  窗口, 地物目标反射的太阳辐射远小于地球自身的热辐射. 不论白天或夜间, 扫描仪接收的主要是地物自身的热辐射, 太阳的反射影响可以忽略. 对于  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  范围太阳和地球的辐射都较低, 所以这区间背景辐射较低是探测较高温度目标的良好窗口.

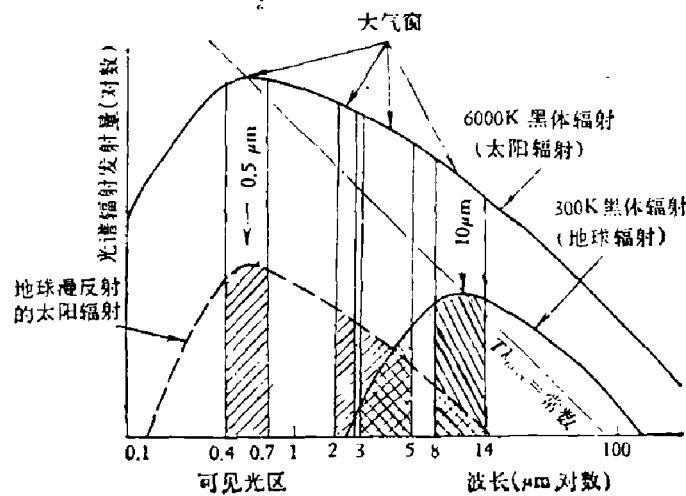


图 5 太阳和地球辐射随波长的相对分布

Fig. 5 Relative distribution of the sun's and the earth's radiance with wavelength

扫描仪接收的景物辐射往往是充满瞬时视场的面辐射源, 并假设为朗伯辐射体. 在扫描视场中, 目标和背景是相互的, 对辐射图象起作用的是景物象元的温度  $T$ , 比辐射率  $\epsilon$ , 反射率  $\rho$  和相邻象元的温度差  $\Delta T$ , 比辐射率差  $\Delta\epsilon$  和反射率差  $\Delta\rho$ . 因此, 相邻象元的分谱辐射功率差为:

$$\Delta P_\lambda = \frac{1}{4} D_0^2 \omega \tau_{a\lambda} \tau_{o\lambda} \left( \epsilon_\lambda \frac{\partial L_{\lambda T}}{\partial T} \Delta T + L_{\lambda T} \Delta\epsilon_\lambda + E_\lambda \Delta\rho_\lambda \right), \tag{8}$$

式(8)中,  $D_0$  为扫描仪光学系统的有效口径,  $\omega$  为系统的瞬时视场立体角,  $\tau_{a\lambda}$  为大气的单色透过率,  $\tau_{o\lambda}$  为光学系统的单色透过率,  $L_{\lambda T}$  为景物的谱辐射率,  $E_\lambda$  为太阳在地面的

谱辐射照度.

将式(8)给定的各个工作波段积分,就可得到入射到探测器上的辐射率变化.探测器的单色响应率  $R_\lambda$  为

$$R_\lambda = \frac{V_N D_\lambda^*}{\sqrt{A_D \Delta f}}, \quad (9)$$

式(9)中  $V_N$  为探测器的噪声电压,  $D_\lambda^*$  为探测率,  $A_D$  为探测器的光敏面,  $\Delta f$  为系统的电子学噪声带宽.

在  $\lambda_1$  至  $\lambda_2$  波段内系统的输出信号电压  $V_S$  为

$$V_S = \frac{D \delta \omega}{4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{a\lambda} \tau_{o\lambda} R_\lambda \left( \varepsilon_\lambda \frac{\partial L_{\lambda T}}{\partial T} \Delta T + L_{\lambda T} \Delta \varepsilon_\lambda + E_\lambda \Delta \rho_\lambda \right) d\lambda, \quad (10)$$

在式(10)中括号内的前二项对热红外扫描仪有贡献,后一项对可见光、短波红外扫描仪有贡献.因此,在可见光、短波红外 ( $0.4 \sim 3.0 \mu\text{m}$ ) 光谱范围工作的扫描仪的信噪比  $V_S / V_N$  为:

$$\frac{V_S}{V_N} = \frac{D \delta \omega \eta_e}{4 \sqrt{A_D \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{a\lambda} \tau_{o\lambda} D_\lambda^* \sin \theta E_\lambda \Delta \rho_\lambda d\lambda, \quad (11)$$

式(11)中  $\eta_e$  为信号过程因子,  $\theta$  为太阳高度角.对于多光谱扫描仪,在  $\lambda_1$  至  $\lambda_2$  的窄波段内,  $\tau_{a\lambda}$ 、 $\tau_{o\lambda}$ 、 $D_\lambda^*$  取其平均值  $\tau_a$ 、 $\tau_o$ 、 $D_\lambda^*$ .在评价系统性能时,取  $\Delta \rho_\lambda$  为 100%,则系统的噪声等效反射率差  $NE\Delta\rho$  为

$$NE\Delta\rho = \frac{4 \sqrt{A_D \Delta f}}{D \delta \omega \eta_e \tau_a \tau_o D_\lambda^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sin \theta E_\lambda d\lambda}. \quad (12)$$

在热红外 ( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ) 窗口工作的红外扫描仪的  $V_S / V_N$  为

$$\frac{V_S}{V_N} = \frac{D \delta \omega \eta_e}{4 \sqrt{A_D \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{a\lambda} \tau_{o\lambda} D_\lambda^* \left( \varepsilon_\lambda \frac{\partial L_{\lambda T}}{\partial T} \Delta T + L_{\lambda T} \Delta \varepsilon_\lambda \right) d\lambda, \quad (13)$$

将  $\tau_{a\lambda}$ 、 $\tau_{o\lambda}$ 、 $D_\lambda^*$ 、 $\varepsilon_\lambda$ 、 $\Delta \varepsilon_\lambda$  分别取平均值为  $\tau_a$ 、 $\tau_o$ 、 $D_\lambda^*$ 、 $\varepsilon$ 、 $\Delta \varepsilon$ .式(13)可改为

$$\frac{V_S}{V_N} = \frac{D \delta \omega \eta_e}{4 \sqrt{A_D \Delta f}} (\varepsilon X_T \Delta T + Y_T \Delta \varepsilon), \quad (14)$$

式(14)中

$$X_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial L_{\lambda T}}{\partial T} d\lambda,$$

$$Y_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda T} d\lambda.$$

在实验室里以黑体为辐射源评价系统性能时,当  $\varepsilon = 1$ 、 $\Delta \varepsilon = 0$ 、 $V_S = V_N$  时的  $\Delta T$ ,即为系统的噪声等效温差  $NE\Delta T$ ,

$$NE\Delta T = \frac{4 \sqrt{A_D \Delta f}}{D \delta \omega \eta_e \tau_a \tau_o D_\lambda^* X_T}. \quad (15)$$

### 1.3 电子学系统的噪声等效带宽

扫描仪的瞬时视场  $\omega = \beta^2$ , 若在理想空间分辨时, 探测器输出的信号为三角波. 假如, 放大电路类似于一个具有特征频率  $f_{3db}$  的单个  $RC$  低通电路, 其

$$MTF = \left[ 1 + \left( \frac{f}{f_{3db}} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

则信号过程因子  $\eta_e$  为

$$\eta_e = \frac{V_P}{V_S} = \frac{\tau - RC}{\tau}, \quad (16)$$

式中  $\tau = \beta / \Omega$ , 为行扫描方向扫过一个瞬时视场  $\beta$  的时间;  $\Omega = 2\pi S$ , 为扫描角速度; 噪声等效带宽  $\Delta f$  为

$$\Delta f = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{2\tau}. \quad (17)$$

这时  $\eta_e = 0.7$ .

## 2 机载扫描仪技术的发展

### 2.1 红外/紫外 (IR/UV) 扫描仪 (见本期彩色插页图 a)

IR/UV 扫描仪是为海洋环境航空遥感监测业务系统而研制的专用扫描仪, 用于监测海洋或河口海岸的油污染. 它同时记录、显示污染目标在热红外 ( $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$ ) 和紫外 ( $0.28 \sim 0.38 \mu\text{m}$ ) 2 个波段的扫描图象 (见图 6). 移动窗显示器的下方为飞行日期、时间、位置、高度等.

在热红外波段 ( $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$ ), 海水的比辐射率  $\varepsilon$  为 0.988, 而大多数油的比辐射率为  $0.964 \sim 0.971$ , 因此油膜的热红外图象显示出比周围的水“冷”一些, 呈黑色调. 对于紫外波段, 油膜比水的反射率高, 油膜在紫外图象上为亮色调.

图 7 为 IR/UV 扫描仪的光路图, 它采用双  $45^\circ$  扫描镜, 在光学系统的次镜与探测器之间设置一块分色片, 透过  $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$  的红外光, 反射  $0.28 \sim 0.38 \mu\text{m}$  的紫外光.

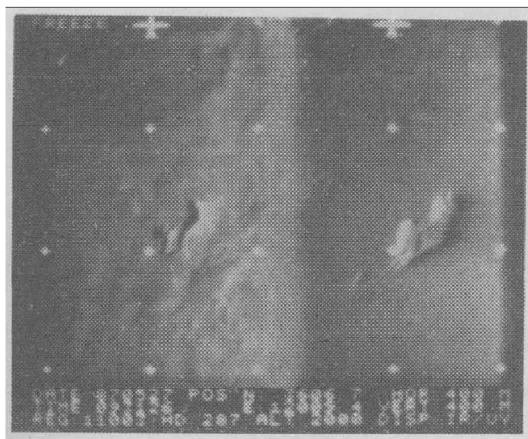


图 6 IR/UV 扫描仪的移动窗显示  
Fig. 6 Moving window display of the IR/UV scanner

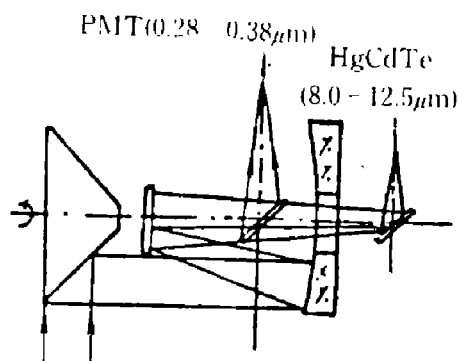


图 7 IR/UV 扫描仪的光学系统  
Fig. 7 The optical system of the IR/UV scanner

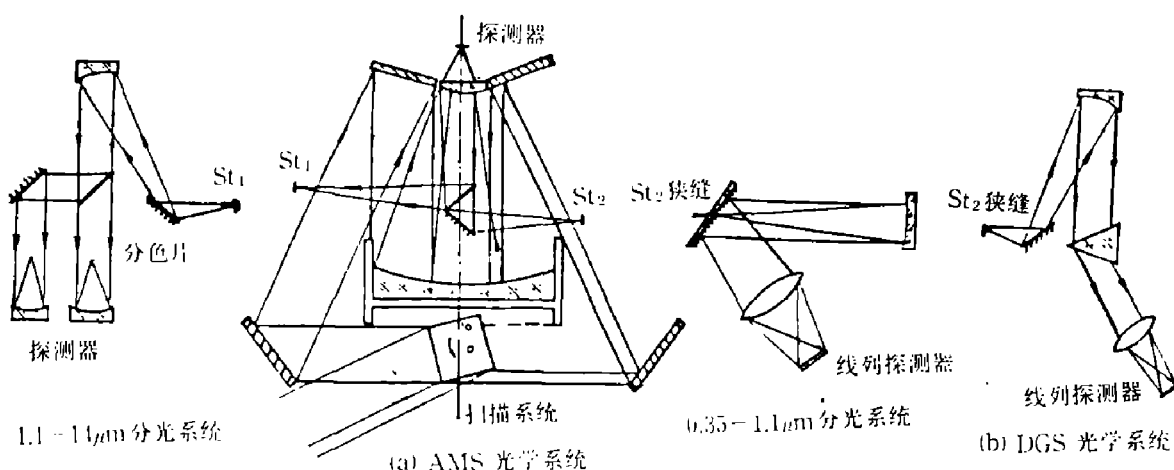


图 8 安装在“海监”飞机上的 IR/UV 扫描仪

Fig. 8 The IR/UV scanner mounted in an aircraft for “Marine Surveillance”

## 2.2 AMS 型多光谱扫描仪 (见本期彩色插页图 b 和 c)

AMS 系统是 8 通道 DGS 多光谱扫描仪的改进型, 采用多视场光学系统和模块式结构, AMS 与 DGS 光学系统的异同示于图 9. 仪器顶部出射的热红外组件是改进后增加的, 它的焦距短于其它两个分光组件, 并且由探测器的光敏面尺寸决定该波段的瞬时视场. 另一方面的改进是可见光近红外分光组件应用了高性能紫外增强的硅探测器线列阵, 所以 AMS 采用光栅分光, 在  $0.45 \sim 1.05 \mu\text{m}$  范围线性分割为 16 个波段, 波段带宽为 40 nm.

图 9 AMS 甚多光谱扫描仪光学系统及 DGS 扫描仪的分光组件 ( $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ )Fig. 9 The optical system of Model AMS multispectral scanner and the beam splitting module ( $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ) of Model DGS scanner



### 2.3 FIMS 型红外细分光谱扫描仪 (见本期彩色插页图 d)

以遥感地质为目标的实验室和野外光谱研究，发现粘土类矿物在  $2.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$  具有特征光谱。这是矿物中的 OH、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_4$ 、 $\text{CO}_3$  等分子团和金属离子在晶格中的振动吸收所造成。如果在空间能够探测到这些光谱特征，这就可以运用遥感技术来区分矿物或者岩性的类型。1982 年美国 GER 公司和 SITP 合作研制红外细分光谱扫描仪，在  $2.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$  光谱范围分割为 6 个光谱段，扫描仪部分由 SITP 设计研制。采用四方棱镜扫描机构，单块抛物面会聚镜，在焦平面上放置 6 元探测器线阵，每个探测元前覆盖窄带滤光片，多元线阵的排列与扫描方向一致，呈串扫描方式。图 10 为 FIMS 的光学系统及探测器组件。各波段图象的空间错位只发生在一条扫描行之中，相邻波段均错位 2 个象元，在图象处理时进行波段配准。

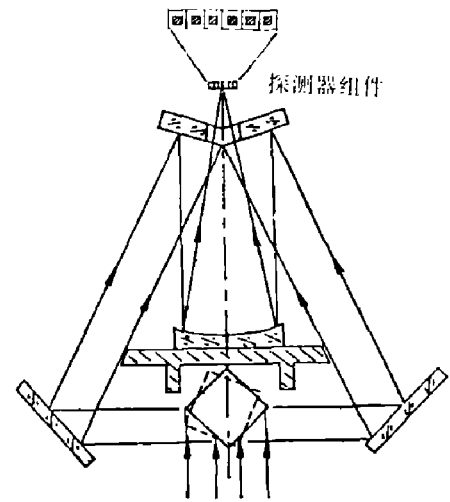


图 10 FIMS 光学系统和探测器组件  
Fig. 10 The optical system and detector module of Model FIMS scanner

该仪器于 1985 年初在美国西部地区进行航空遥感试验，所获图象数据运用主成分方法，达到了区别岩性 (如高岭石、绢云母等) 的预期目的。

### 2.4 ATIMS 型热红外多光谱扫描仪 (见本期彩色插页图 e)

从图 5 可见，在  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  的热红外大气窗口工作的被动遥感器对地观察时接收的主要是地物自身的热辐射。ATIMS 数据的主要特点在于能获取物体的比辐射率与波长的变化，这对探测硅酸盐岩石类矿物的热辐射光谱特征是有效的。

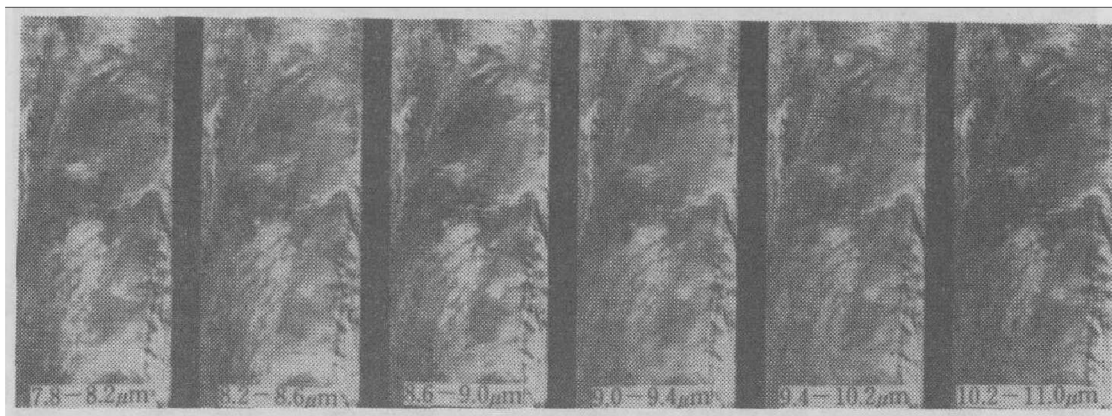


图 11 河北省金厂峪地区的热红外多光谱图象  
Fig. 11 Thermal infrared multispectral images in Jinchangyu area of Hebei Province

### 2.5 MAIS 型成像光谱仪 (见本期彩色插页图 f)

二十世纪八十年代遥感仪器最主要的发展之一就是成像光谱技术的兴起。在空间对地

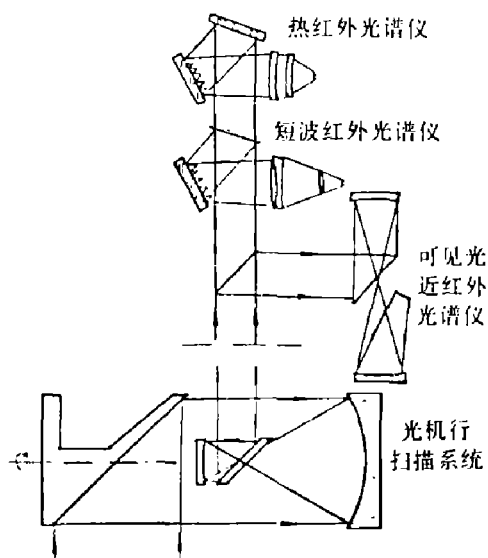


图 12 MAIS(ATIMS) 光学系统图  
Fig. 12 The optical system of Model MAIS (ATIMS)

观察, 能同时获取数十至数百个连续波段的地物光谱图象, 达到从空间直接识别地球表面物质的目的. MAIS的光机结构是 ATIMS 的发展, 为保证各波段之间的象元配准, 采用全部光谱波段共用一个视场光栏的结构. 在平行光路中设置分色片, 使光谱仪以级联方式组合, 各个光谱仪内部的所有探测器单元都聚焦于共同的视场光栏上. 图 12 是 MAIS 和 ATIMS 的光学原理图, 主要由四部分组成: 一个光机扫描成像系统, 三个光谱仪组件(可见光近红外光谱仪, 短波红外光谱仪, 热红外光谱仪). 如果成像系统与热红外光谱仪组合, 即为 ATIMS 系统.

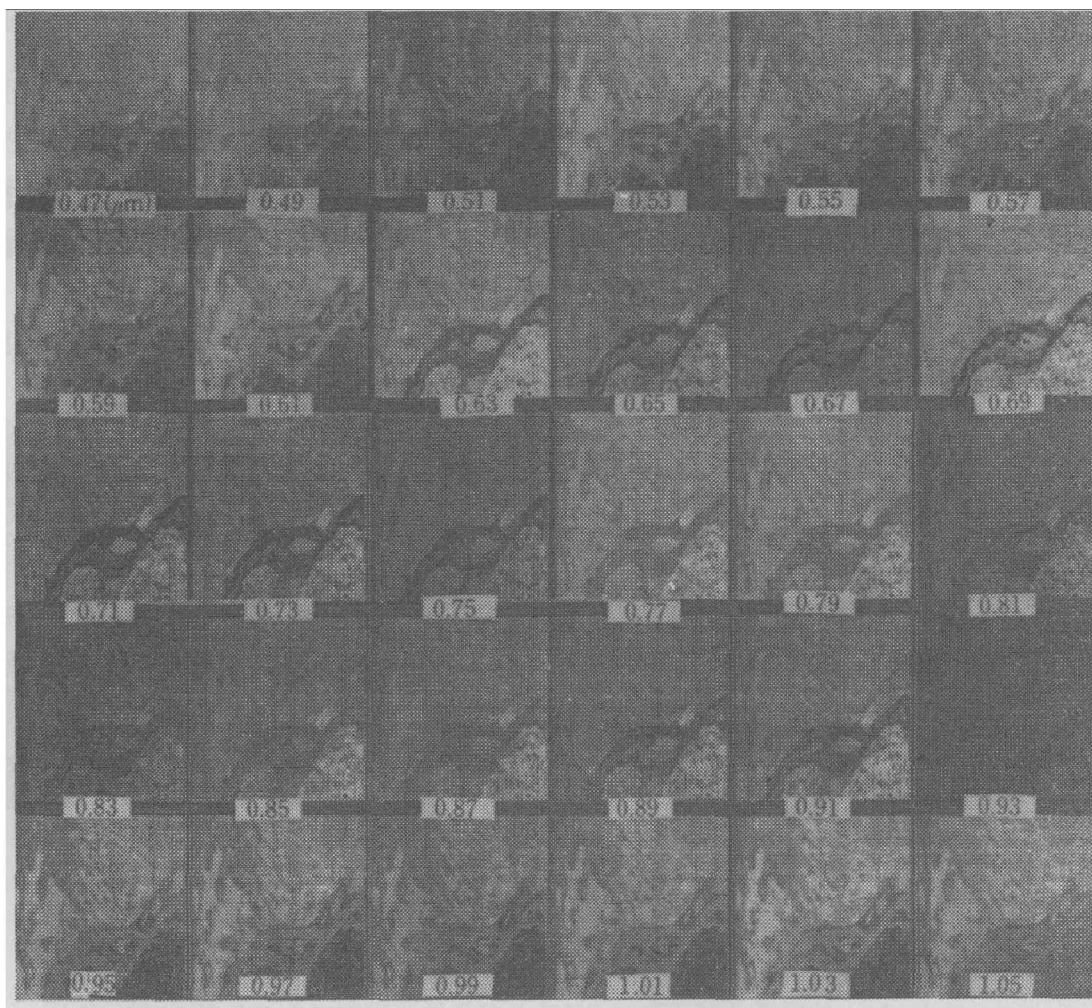


图 13 MAIS 的可见光近红外 (0.47~1.05  $\mu\text{m}$ ) 成像光谱  
Fig. 13 Model MAIS Vis/Nir spectral images

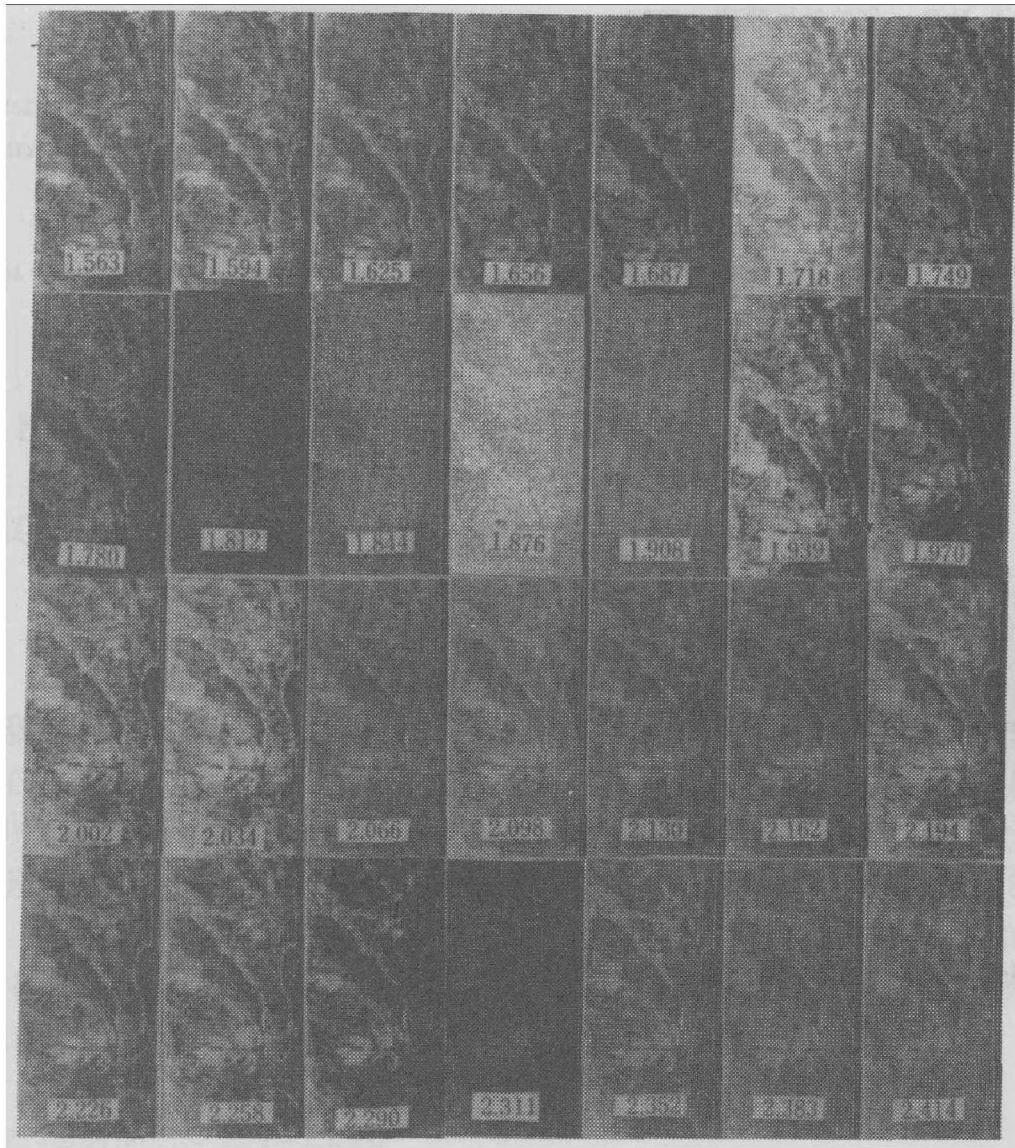


图 14 MAIS 的短波红外 (1.4~2.5 μm) 成像光谱

Fig. 14 Model MAIS SWIR spectral images

### 3 结语

机载扫描仪现已形成系列，从紫外至热红外各个大气窗口都有多波段成像系统。地面配套设备可进行机载数据的快速回放，信息转换，处理服务，提供规格化的产品——计算机兼容磁带。在国际遥感合作研究中，DGS、FIMS 扫描仪为日本 JERS-1 的 OPS 进行波段模拟实验，MAIS 成像光谱仪在澳大利亚北领地进行探矿和环境遥感研究。

## 参 考 文 献

- 1 小哈得逊 R D. 红外系统原理, 1975.
- 2 Lloyd J M. *Thermal imaging systems*, 1975.
- 3 Robert N Colwell et al. *Manual of remote sensing*, American Society of Photogrammetry, 1983
- 4 Stanich C G, Osterwisch F G et al. *Design study for thermal infrared multi-spectral scanner (TIMS)*, March 27, 1981
- 5 张幼文. 物理学报, 1980, 29(7): 813-828
- 6 Xue Yongqi, Gu Yonghua et al. *Airborne scanners and application, Proceedings of the second ASIAN conference on remote sensing*, Oct. 29~Nov. 4, 1981
- 7 王铁铭. 红外研究, 1984, 3(3): 199-208

## THE TECHNICAL DEVELOPMENT OF AIRBORNE SCAN IMAGING SYSTEMS

Xue Yongqi

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

**Abstract:** The development, construction, characteristics and applications of airborne scan imaging systems are described.

**Key words:** scanners, remote sensing, imaging spectrometers.