

机载成像光谱仪的光学设计

· 杨存武 余伟国

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要: 描述了模块式机载成像光谱仪的光学系统及其主光路、分光组件和会聚单元的设计, 分析了基本光学参数之间的制约关系, 讨论了衍射光栅、扩展光谱覆盖及光谱定标辅助光路等实际问题.

关键词: 多光谱, 遥感仪器, 光学设计.

引言

随着光谱波段的增多和密集, 成像光谱仪光学系统涉及精细分光、结构布局和大相对口径透镜的研制等问题^[1]. 本文描述了我所研制的模块式机载成像光谱仪 (MAIS) 的光学系统及各组件的设计, 分析讨论了光学工程中的一些实际问题. 由光谱定标结果及成像光谱仪成功的航空实验表明, 我们的光学设计和分析是符合实用要求的.

仪器光学系统的主要参数见表 1.

表 1 光学系统主要参数
Table 1 Primary parameters of the optical system

扫描方式	45° 转镜光机扫描		
光学口径 (mm)	φ180		
主系统焦距 (mm)	180		
扫描视场 (°)	90		
分光组件	1	2	3
光谱范围 (μm)	0.46~1.1	1.40~1.82 1.98~2.40	8.2~12.2
波段数	32	32	7
瞬时视场 (mrad)	1.5	1.5	3
分光元件	凹面光栅	平面光栅 (转动)	平面光栅
探测器	32 元硅线阵	16 元 MTC 线阵	7 元 MCT 线阵

1 主光学系统

本系统选择光机扫描方式, 探测器线列方向为光谱分布方向, 视场光阑呈单个圆形.

本文 1991 年 5 月 24 日收到, 修改稿 1992 年 3 月 10 日收到.

其主要特点是扫描视场大, 可满足航空遥感应用的需要. 为获取大的入射口径及高稳定性, 用 45° 旋转反射镜作为扫描镜, 其反射面用复制工艺制成. 该镜的结构设计和工艺满足动平衡要求, 高速转动时变形小, 重量轻.

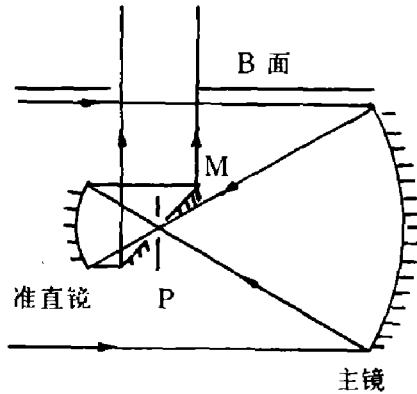


图1 主光学系统
Fig. 1 Primary optics

仪器以中国科学院遥感飞机 (CITATION S/II) 为工作平台, 主光学系统的光路长度受到飞机仪器舱空间的限制, 同时还要求通光口径大. 为了同时满足这两个要求, 我们采用图1所示的主光路. 其中, 由 $F/N_0 = 1$ 的抛物面镜会聚地物辐射, 焦点处放置视场光阑P, 准直镜与主镜同轴, 共焦点. 准直光束经斜反射镜M垂直于基准面B射出, 此平面亦作为与分光组件的耦合面及角度的基准. 此光路的优点是, 主镜 F/N_0 小, 可缩短纵向的尺寸; 准直镜在主光路中为各波段共用, 使分光组件结构简单; 分光组件在平行光路中与主系统耦合, 便于不同分光组件的置换.

对主镜作光线追踪, 求得视场角为 β 时的最大弥散盘直径 R . 设弥散盘内能量分布均匀, 视场光阑 d 内的能量集中度 ρ 计算值见表2.

表2 主镜象质

Table 2 Image quality of the primary mirror

视场 β (mrad)	R (mm)	d (mm)	ρ (%)
1.5	0.024	0.27	97
3	0.049	0.54	96

因弥散盘内能量近于高斯分布, 实际的能量集中度应该更高. 对仪器作了空间分辨率检测, 在 1.5mrad 及 3mrad 瞬时视场下相邻象元的分辨率均优于 85%, 这表明使用 $F/N_0 = 1$ 的主镜是可行的.

2 分光组件的设计

分光组件包括准直镜、分光元件、会聚单元及线阵探测器几部分. 仪器在热红外范围及可见/短波红外范围各用一个分光组件 (见图2). 对热红外及短波红外, 分光元件为平面闪耀光栅, 使用正一级衍射, 会聚单元为透镜组. 对可见—近红外波段, 采用凹面光栅, 同时起分光和会聚作用.

由各参数确定热红外分光组件会聚单元的 $F/N_0 = 0.78$, 视场角 $\theta = 4.91^\circ$. 这样的相对孔径和视场角只能用透镜组来完成, 其设计难度甚大. 我们先设计了类似 P.J. Rogers^[2]描述的三组元锗透镜组, 象质是好的. 但因波段细分, 能量问题突出, 需要减少镜片数目以提高光学效率. 最后改用两片锗镜 (最小球差镜加齐明镜^[3]) 组成透镜组. 它的全色、全口径、全视场最大弥散盘直径为 0.13mm (器件线度为 0.45mm), 而实际上, 每个器件单元只占很小波长间隔和一部分口径, 所以这是一个很好的结果. 我们确定了短波

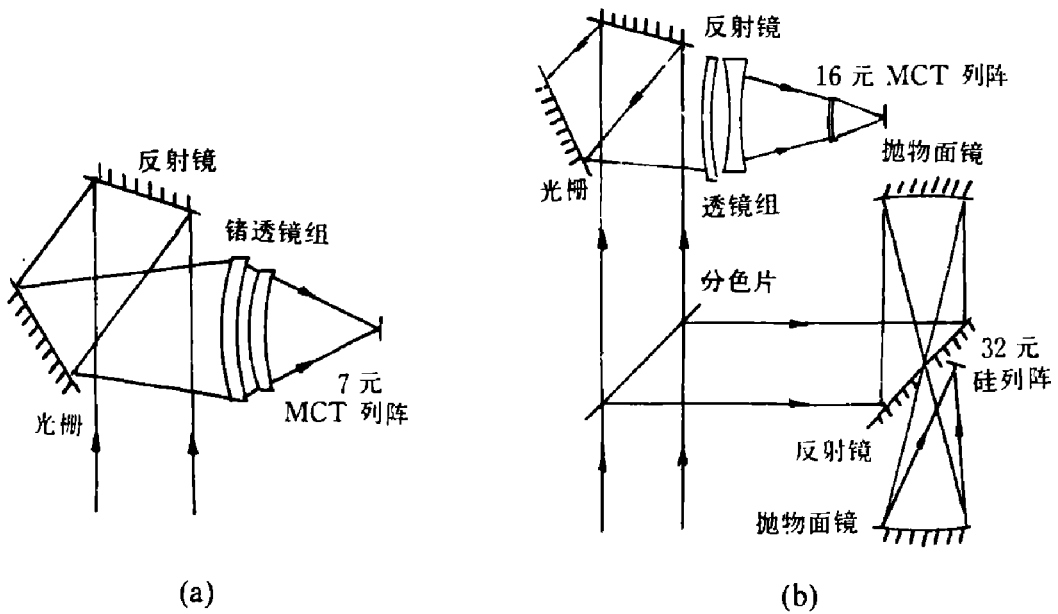


图2 分光组件
 (a) 热红外分光组件; (b) 可见/短波红外分光组件
 Fig. 2 Dispersion assembly
 (a) For thermal infrared; (b) For visible/shortwave infrared

红外分光组件的会聚单元的 $F/N_0 = 0.91$, 视场角 $\theta = 4.98^\circ$. 在 $1.40 \sim 2.4 \mu\text{m}$ 范围, 光学材料色散较大, 选择搭配恰当的镜片材料相当重要, 我们从几种可得优良象质的材料中选用硅-熔融石英-硒化锌组合材料, 以正-负-正光焦度构成. 象质为: 全色、全口径、全视场的最大弥散盘直径为 0.072mm . 同理, 因每个单元只用一部分波段及口径, 所以实际象质应优于上述值.

在 Mark II 2000 型传函测量仪上, 测试了制作的热红外透镜组和短波红外透镜组的点扩散函数, 其结果与计算值相近. 在整机光谱定标中, 相邻探测器单元的混色比为 $50 \sim 60\%$. 这表明两个透镜组能满足会聚单元的要求.

3 基本光学参数之间的制约关系

成像光谱仪每一通道的带宽及对应的辐射能很小, 所以仪器设计应尽可能获得更多的辐射能. 就光学参数而言, 这在于恰当选择通光口径 D_1 和瞬时视场 β . 在图 3 所示的基本结构中, $f_1, D_1, f_2, D_2, f_3, D_3$ 分别为主系统 L_1 、准直镜 L_2 、会聚单元 L_3 的焦距和口径. 共焦于视场光栏 (线度 $f_1\beta$) 的 L_1 和 L_2 具有相同会聚角, 则 $f_1/f_2 = D_1/D_2$. 设线阵探测器 A 包含 N 个单元, 每单元线度为 δ , 通过 L_2, L_3 与视场光栏 P 成物象共

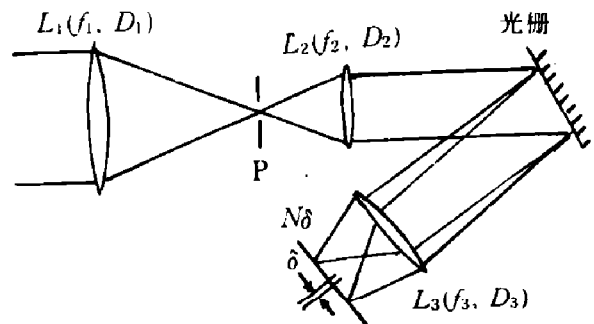


图3 基本光学结构
 Fig. 3 Basic optical structure

辄, 则 $f_2/f_3 = f_1\beta/\delta$. 于是 L_3 须承担的视场角为:

$$\theta = 2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{N\beta D_1}{2D_2} \quad (1)$$

经色散后到达 L_3 的全波段光束宽度变为 $D_3 = kD_2$, 其中扩张系数 k 由色散方式决定. L_3 的 F/N_0 为

$$F_3 = \frac{\delta}{k\beta D_1} \quad (2)$$

式 (1)、(2) 表述了仪器基本光学参数间的制约关系. 由式 (1)、(2) 可见: (1) 仪器的瞬时视场和通光口径不能同时很大, 否则会聚单元参数 (由 θ 及 F_3 表征) 会苛刻的难以接受. (2) 较大的准直镜面口径有助于减小会聚单元的视场角, 但过分大的 D_2 值会导致甚大的色散元件及会聚单元的尺寸. (3) 在可接受的技术条件下应采用恰当的分光方式以使 k 值较小. 上述制约关系在确定仪器总体参数时应予以全面考虑.

4 几个实际光学工程问题

4.1 衍射光栅对成像质量的影响

因仪器有一定的瞬时视场, 经光栅前后的辐射将不是完善平面波或球面波, 这必然对会聚过程的象差有所影响. 光栅可视为由二波束形成的全息图, 当光学系统性能是以光线追迹结果来表示时, 则可以用下面全息图追光方程来描述光栅的作用^[4].

$$\begin{cases} L_d - L_c = m \frac{\lambda'}{\lambda} (L_o - L_r), \\ M_d - M_c = m \frac{\lambda'}{\lambda} (M_o - M_r), \\ N_d = -\sqrt{1 - L_d^2 - M_d^2}, \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中, λ 、 λ' 分别为建立全息图的光波波长和再现全息图的光波波长. L 、 M 、 N 分别为光线的三个方向余弦, 下标 o 、 r 、 c 、 d 分别表示物光、参考光、入射光和衍射光. 因子 $(L_o - L_r)/\lambda$ 、 $(M_o - M_r)/\lambda$ 可在选定坐标后改写成光栅常数表示的形式. 于是, 可由入射光线参数求得衍射光线参数. 光线追迹从主系统开始, 包括光栅在内, 直至到达谱面.

4.2 光谱覆盖范围的扩展

仪器预定在短波红外范围包含 32 个波段. 我们采用由 16 元器件配合光栅转动的方式. 让光栅绕一根过表面的轴线往复摆动, 摆动动程的两个端点位置为光栅的工作状态, 分别完成一次地物扫描, 并分别得到 16 个波段的信息. 为了不漏扫, 工作平台的速高比应使地物扫描重叠率至少为 50%. 本仪器中, 光栅转动角为 $3^\circ 33'$, 角度重复误差小于 $2'$ (相当于器件单元的 $1/7$), 驻留/回转时间比近似等于 1. 这种方式也可用于多次扩展光谱的覆盖范围, 即光栅有多个驻留位置, 一组器件对应多段光谱^[5].

4.3 光谱定标用辅助光路

为确定仪器各波段的实际光谱范围须进行光谱定标. 采用适当光源, 由一台光栅单色

仪产生单色辐射, 经过一个辅助准直光路射入被测系统. 令单色仪的出射波长连续变化, 相当于对某一探测器单元作光谱扫描而得到该单元的光谱响应. 所用的辅助准直光路应满足两个要求: (1) 准直光束充满被测系统口径; (2) 单色仪出射狭缝在被测系统主焦面上的象能覆盖视场光栏. 绝大多数单色仪的出射孔径角都较小, 如果被测系统的 F/N_0 很小, 会导致同时满足以上两个要求所需的出射狭缝很宽, 往往超出开启宽度的最大值, 并使出射光束有严重混色而不适于作光谱扫描. 由于受单色仪的这种限制, 当上述两个要求有矛盾时, 我们认为: 宁可让准直光束口径小于被测系统口径, 而保证出射狭缝象大于视场光栏. 因为, 在决定光谱响应中视场光栏的尺寸比会聚单元象差是更为重要的因素.

致谢: 在本仪器光学系统研制中, 机械设计主要由薛魁武同志完成, 沈鸣明、王建宇、叶家福、钱鸿麟、杨一德、王宪民等同志给予许多有益的建议和帮助, 作者对他们表示衷心感谢.

参 考 文 献

- 1 *Airborne Visible/Infrared Image Spectrometer, Spectrometer Design and Performance*, N88-14327
- 2 Rogers P.J. *Optical Engineering*, 1975, 14(2): 141
- 3 Varughese K O G. *Applied Optics*, 1983, 22(2): 347
- 4 Holloway H W. *Applied Optics*, 1981, 20(12): 2081
- 5 Vane G. *IEEE Trans. on Remote Sensing*, 1984, GE-22(6): 546

OPTICAL DESIGN OF THE AIRBORNE IMAGE SPECTROMETER

Yang Cunwu, Yu Weiguo

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

Abstract: This paper describes the optical system of the module airborne image spectrometer (MAIS), including the essentials of optical design for primary optics, dispersion assembly and converging lens. The restriction among the primary optical parameters is analyzed. Some practical problems such as diffraction grating, expansion of spectral covering range and the collimator for spectral calibration are also discussed.

Key words: multispectral, remote sensing instrument, optical design.

彩图说明

彩图 a IR/UV 扫描仪

Fig. a IR/UV scanner

彩图 b DGS 型多光谱扫描仪

Fig. b Multispectral scanner (DGS)

彩图 c AMS 型多光谱扫描仪

Fig. c Multispectral scanner (AMS)

彩图 d FIMS 型短波红外细分光谱扫描仪

Fig. d Multichannel narrow-band shortwave infrared scanner (FIMS)

彩图 e ATIMS 型热红外多光谱扫描仪

Fig. e Thermo-infrared multispectral scanner (ATIMS)

彩图 f MAIS 型成像光谱仪

Fig. f Imaging spectrometer (MAIS)

彩图 g 可见/近红外波段五台山矿区遥感图象

红色—14 波段 ($0.71 \mu\text{m}$)

绿色—9 波段 ($0.61 \mu\text{m}$)

蓝色—5 波段 ($0.53 \mu\text{m}$)

Fig. g Visible/near IR remote sensing image in the Wu Tai Shan mineral area

R—band 14 ($0.71 \mu\text{m}$)

G—band 9 ($0.61 \mu\text{m}$)

B—band 5 ($0.53 \mu\text{m}$)

彩图 h 短波红外波段五台山矿区遥感图象

红色—20 波段 ($2.10 \mu\text{m}$)

绿色—23 波段 ($2.20 \mu\text{m}$)

蓝色—28 波段 ($2.35 \mu\text{m}$)

Fig. h Shortwave IR remote sensing image in the Wu Tai Shan mineral area

R—band 20 ($2.10 \mu\text{m}$)

G—band 23 ($2.20 \mu\text{m}$)

B—band 28 ($2.35 \mu\text{m}$)

彩图 i 可见/近红外伪彩色合成图象

红色—15 波段 ($0.73 \mu\text{m}$)

绿色—10 波段 ($0.63 \mu\text{m}$)

蓝色—2 波段 ($0.47 \mu\text{m}$)

Fig. i Pseudo-color remote sensing image in the visible/near-infrared bands

R—band 15 ($0.73 \mu\text{m}$)

G—band 10 ($0.63 \mu\text{m}$)

B—band 2 ($0.47 \mu\text{m}$)

彩图 j 金厂峪地区相关 TIMS 图象 1, 3, 5 波段合成图 (A 为硅化和粘土化, B 为采矿场的尾矿, C 为废矿石堆, D 为主断层, E 为花岗岩, F 为环形构造, G 为金矿化带)

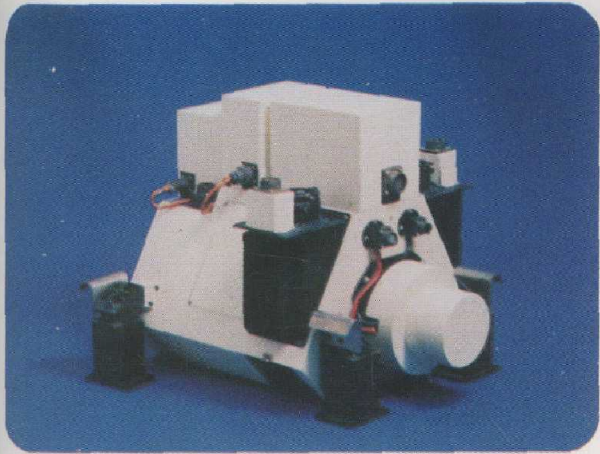
Fig. j Color-composite image of Jinchangyu region based on decorrelative transformation of TIMS data. A = silicification, clay grouting; B = mining tailing and ponds; C = waste ore; D = main faults; E = granit; F = ring-like fault; G = gold mineralized zones;

彩图 k 格式 1, 单幅, 三波段合成

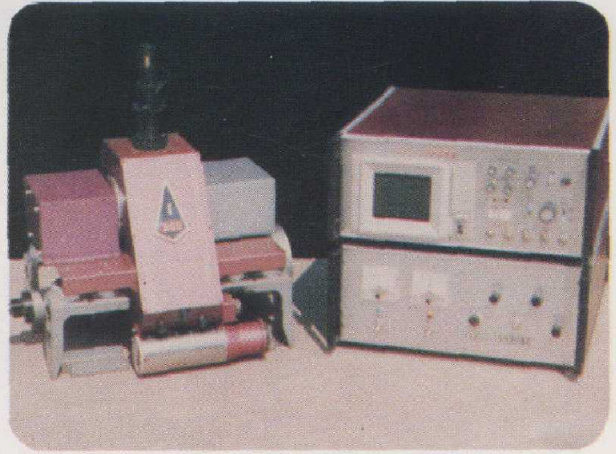
Fig. k Form 1, single-picture, triband-combined

彩图 l 格式 2, 双幅, 三波段合成

Fig. l Form 2, double-picture, triband-combined



彩图 a



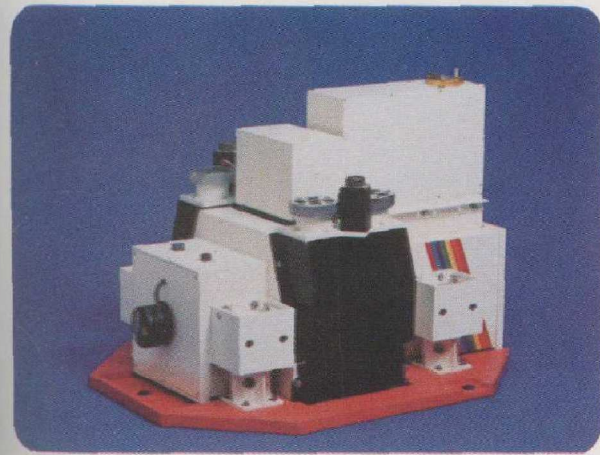
彩图 b



彩图 c



彩图 d



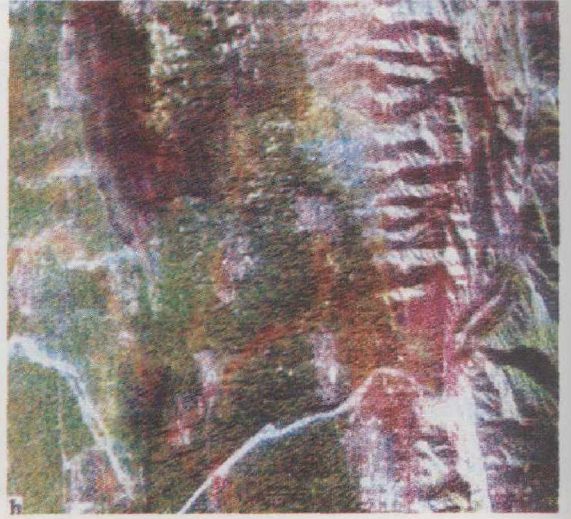
彩图 e



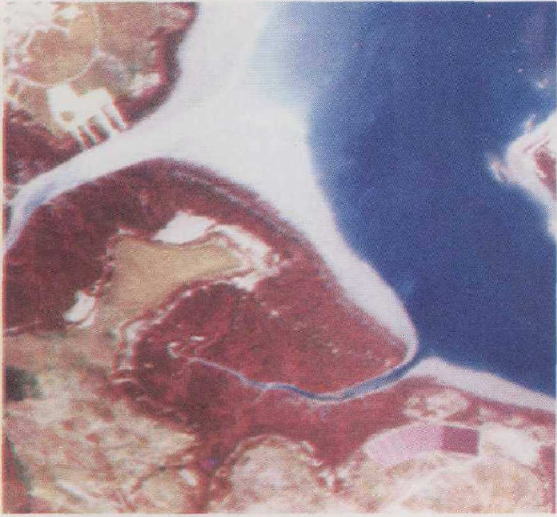
彩图 f



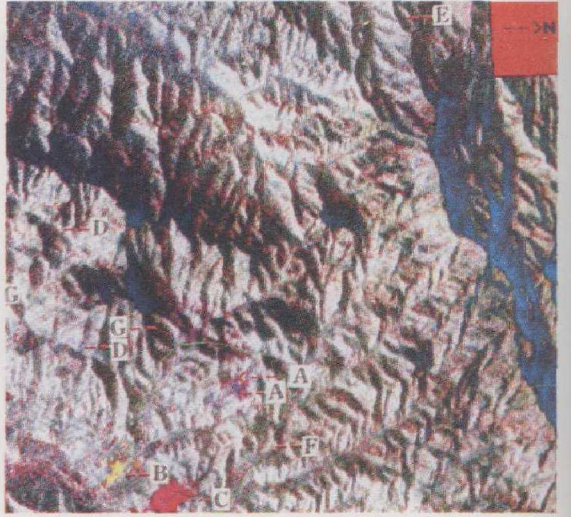
彩图 g



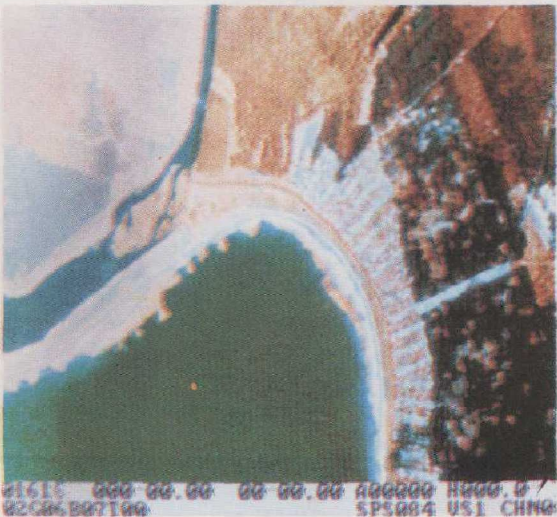
彩图 h



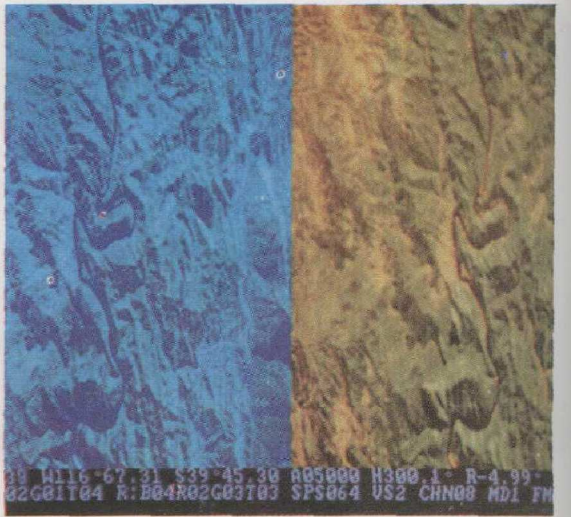
彩图 i



彩图 j



彩图 k



彩图 l

01615 000 00.00 00 00.00 000000 0000.0 /
0208.007100 5P5064 US1 CHNG

00 0116-67.31 539-45.30 005000 0300.1- R-4.99-
02081704 R:004R02G03703 SPS064 US2 CHNG MD1 TM