

星载电子扫描式多光谱扫描仪 光学系统设计

孙 晶

摘要： 本文叙述了星载电子扫描式多光谱扫描仪的原理和特点。根据光学系统的总体方案，确定了星载全波段CCD光学系统的参数，光学系统结构的选择，以及讨论了各种分光方式。最后，介绍了折反射式长焦距物镜的设计。

一、前 言

多光谱扫描仪 (Multispectral scanner) 是地球资源卫星上的主要探测仪器之一。用于考察资源的多光谱扫描仪按其工作方式分两大类，机械扫描式和电子扫描式，见表1。

电子扫描式多光谱扫描仪采用电荷耦合 (CCD) 固态阵列代替胶片，尽管CCD器件的分辨率比胶片低，但对几千公里高空的卫星无需收回胶片，直接进行信息处理却是一大优点。

表1 国外地球资源卫星多光谱扫描仪部分参数比较

项 目 名 称	美国卫星	法国卫星	法国卫星	美国卫星
扫描方式	机械扫描	机械扫描	平面定位反射镜	电子扫描
飞行高度	917 km	809 km	809 km	705 km
扫描宽度	185 km	240 km	在240km范围任选 60 km	30 km
地面分辨尺寸	80 km	80 km	20 m	15 m
光谱范围	可见光 0.5—0.6 μm 0.6—0.7 0.7—0.8 红 外 0.8—1.1 热红外10.04—12.6	0.45—0.52 μm 0.52—0.60 0.60—0.70 0.8—1.05 10.5—12.5	0.48—0.53 μm 0.55—0.60 0.62—0.70 0.80—1.05	
接 收 器	可见光 (光电倍增管) 红 外 (光电二极管) 热红外 (碲化汞镉)	硅光电二极管 160 K碲化汞镉 80 K "	CCD	CCD

项 目 名 称	美国卫星	法国卫星	法国卫星	美国卫星
像面尺寸	4×6根光纤 每根70×70μm	12个元件 241×247μm	78 mm	30 mm
物镜参数	$f' = 826 \text{ mm}$ $f/3.6$ R-C系统	$f = 2500\text{mm}$ $f/9$ R-C系统	$f = 1082\text{mm}$ $f/3.5$ $2\omega = 4.2^\circ$	$f = 700\text{mm}$ $f/3.5$ $2\omega = 2.46^\circ$
分光方式	不同像面光纤 引出像 各波段不同时扫一个点		棱镜分光 平板分光	

二、电子扫描式多光谱扫描仪原理

1. 成像原理

地面景物被太阳照射后，其反射光谱经过光学系统成像在接收器 CCD 器件上。对同一景物，同时拍摄得到的一组多波段照片，可以揭示出不同地物目标在不同波段处反射特性的差异。从侦察目标的观点，合成像的颜色反映了物质的光谱特性，根据颜色的差别识别伪装，通过合成像的处理，把某些地物突出的更明显。航空摄影的多波段相机，从结构原理上分三大类：多镜头型、多相机型和单镜头分光束型。用线列 CCD 作为接收器，置于物镜焦平面上，按垂直于飞行方向作连续的行扫描。拍摄地面，由卫星（飞机）在轨道上的运动来完成飞行方向的扫描。这样，CCD 器件与航向正交，不断地摄影地面，形成一条条地面象带，其范围取决于 CCD 象元组成的尺寸、物镜焦距和飞行高度^[4]。如图1。

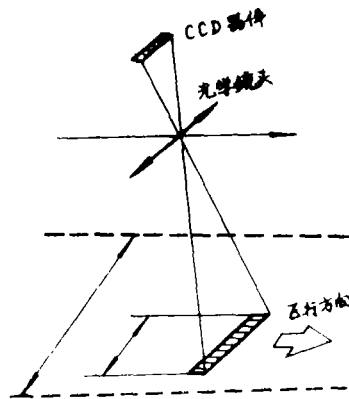


图 1

2. 接收器 CCD 器件的性能

CCD 为许多分立的微小半导体象元排列成行，组成一个光敏传感器，置于始终打开的物镜焦平面上接受光。各个敏感元件所接收的光能和曝光时间成正比，产生的电荷以规则的间距并行输入存储寄存器，再串行输出。对应每个象元和每段曝光时间(积分时间)，便得一个不连续的电压信号，信号高度反映物体的固有亮度。此原理适用于从可见光到热红外辐射测量。CCD 器件的光谱响应可从 $0.45 \sim 1.2\mu\text{m}$ 内变动，在光学系统内加进滤光片来选择需要的光谱通道。为减小 CCD 器件的暗电流，需采用致冷的措施。要求 CCD 器件的时间常数比系统扫过瞬时视场所需的时间小一个数量级以上时，对系统性能影响可忽略。

CCD器件的几何精度：成像面的几何尺寸，包括象元、线阵象面与配合面的尺寸精度，它直接影响成像的几何精度及成像的分辨率。几何分辨率由 CCD 象元的重心间距确定，称为“象素分辨率”。如果象元尺寸为 $13\mu\text{m}$ ，那么分辨率为 27.2 对线/ $\text{mm}^{[1]}$ 。

3. 用 CCD 器件作为接收器的扫描仪特点

- (1) 这种扫描仪也称航线型相机 (Strip camera) 机械结构简单。
- (2) 每个象点上有最大限度的曝光时间，而且可数字化，直接实现光电信号转化。
- (3) 可提供几何精度高的图象。光轴必须垂直地面，只要地面平坦，由扫描仪底座倾斜和飞行速度变化而产生影响的线条失真和比例尺变化，在卫星上拍摄时影响较小，但在飞机上需加俯仰和滚动电子式校正器。
- (4) 在良好的照像条件下 (太阳高角大于 30°)，可探测地面小于 0.5% 反射率变化^[6]。

三、光学系统参数的确定

1. 物镜焦距 f 的确定

如图 2 所示，根据卫星飞行高度 H ，地面扫描宽度 A ，和接收器线阵长 d 便可确定物镜的焦距 f 。 $f = \frac{H}{A} \cdot d$ 若 $H = 724 \times 10^3 \text{m}$ $A = 30.72 \text{m}$ $d = 30.72 \times 10^{-3} \text{m}$ 代入上式，得物镜焦距 f 为 724mm 。

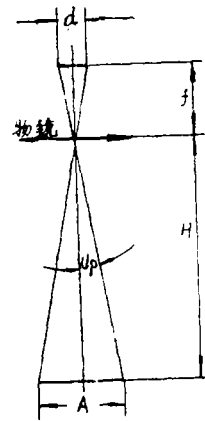


图 2

2. 物镜物方视场角 U_p 的确定

根据卫星飞行高度，地面扫描宽度 A ，物方视场角 U_p 为：

$$\text{tg}U_p = \frac{A}{2H}, \quad U_p = \text{tg}^{-1}\left(\frac{A}{2H}\right) \quad \text{或} \quad U_p = \text{tg}^{-1}\left(\frac{d}{2f}\right)。$$

若 CCD 象元尺寸为 0.015mm 。2048 个象元的线阵长为 30.72mm ，代入求 U_p 公式， U_p 约为 1.2154° 。为了扩大扫描范围，可在物镜前加一旋转反射镜。

3. 物镜相对孔径的确定

根据地面景物辐射 (反射) 的能量足以使接收器 CCD 器件敏感的最少能量，以及象素分辨率来确定物镜的相对孔径。

假设太阳辐照度为 W_λ ，CCD 的象元尺寸即象素分辨率为 C ，CCD 的最小探测能量为 P ， K 为系数。根据公式^[7] $P = \frac{W_\lambda \Delta\lambda}{4F^2} \cdot C^2 \cdot K$ 假设光谱范围 $\Delta\lambda$ 为 $0.61 - 0.69 \mu\text{m}$ ， C 为 $15 \mu\text{m}$ ， P 为 $5.05 \times 10^{-9} \text{W/m}^2$ ， K 为 0.4 代入上式求得 F 数为 3.5 ，那么物镜的相对孔径为 $1/3.5$ 。参看表 2。

表2 部分国外多光谱扫描仪光学系统参数

飞行方式	国名	焦距 (mm)	相对孔径	视场角 $2U_p$ (度)
机载	西德	24	$f/2.8$	50
	法国	55	$f/1.6$	43
	日本	157	$f/4$	10.9
星载	法国	1082	$f/3.5$	1.2
	美国	700	$f/3.5$	2.46

4. 物镜光谱波段的选择

为了选择合适的波段，要测量各种典型目标的反射光谱，测量反射光谱在不同太阳高度时的强度，光谱的变化，做出已知条件下的合成像，作为设计和判图的依据。要根据我国地物光谱特性，尽量使航天、航空、地面测试相结合，并依据已测定的我国大气条件，选择相应波段的光谱灵敏度的 CCD 器件。

依据分波段与全波段两种工作状态来考虑光学系统的设计。全波段的光谱范围为 $0.5-0.9\mu\text{m}$ 。物镜的焦平面上置一块 CCD 线阵接收光能。我国 CCD 器件线阵的光谱灵敏度如图 3 所示。

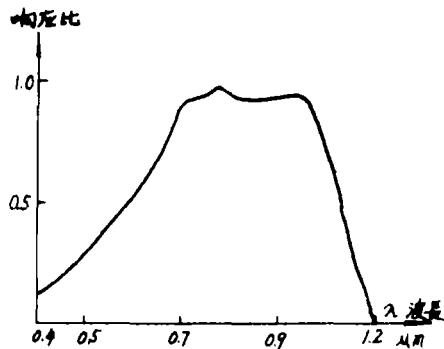


图3 国产CCD光谱灵敏度

四、分光方式的比较

1. 棱镜式

棱镜式分光方式具有结构紧凑、体积小特点，但它要求物镜的后工作距离要长，并且要求物镜像方远心。棱镜分色膜很难镀，分色光谱能量偏低，为了避免色渐变，分色膜的光束入射角应尽量小，而棱镜的尺寸往往会限制扩大视场。参看图 4。

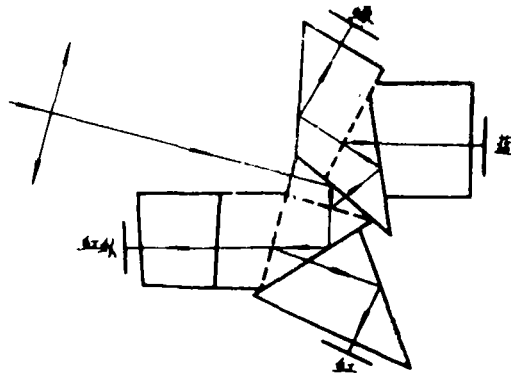


图4

2. 分色片式

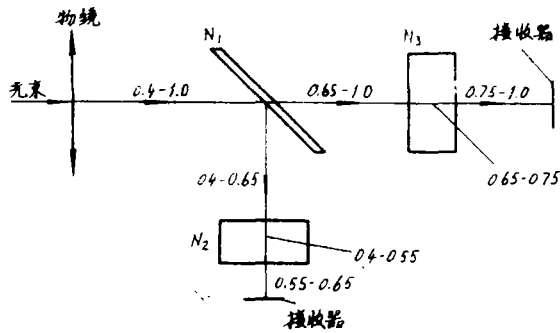


图 5

参看图 5， N_1 分色片反射 $0.4-0.65\mu\text{m}$ 的光谱波段；透射 $0.65-1.0\mu\text{m}$ 的光谱波段。 N_2 分色片反射 $0.4-0.55\mu\text{m}$ 的光谱波段；透射 $0.55-0.65\mu\text{m}$ 的光谱波段。 N_3 分色片反射 $0.65-0.75\mu\text{m}$ 的光谱波段；透射 $0.75-1.0\mu\text{m}$ 的光谱波段。这种分光方式除了物镜后工作距离要长而外，分色片以 45° 倾斜在光路中产生中心象散太严重，并且分色膜也不好镀。

3. 多镜头时采用滤色片分光方式

采用滤光片分光方式适用于透射式短焦距物镜的光学系统。滤色片可置于物镜前或焦面前。

4. 带有滤色片的CCD线阵的分光方式

这种分光方式美国的星载扫描仪采用了。参看图 6。

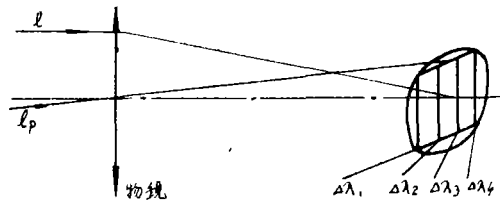


图 6

这种分光方式用一单镜头在其焦面上放置带有滤色片的 CCD 线阵进行分光，带有滤色片的 CCD 线阵需要在视场内排开，而物镜整个视场内成像质量是不一致的，将会引起测量误差。

五、全波段 CCD 扫描仪的技术参数和方案比较

1. 全波段 CCD 扫描仪的技术参数

- (1) 光谱波段范围 $0.5-0.7\mu\text{m}$
- (2) 地面瞬时扫描宽度 15m
- (3) 卫星飞行高度 724km

- (4) 地面扫描宽度 61.44km
- (5) 探测器尺寸 2×2048 CCD阵列, 象元尺寸15μm
- (6) 光学系统参数 焦距724mm; 相对孔径1/3.5;
线视场 φ61.44mm。

(7) 单镜头, 不分光。

2. 卫星多光谱扫描仪方案的比较

参看表 3。

表3 卫星多光谱扫描仪方案比较

项 目 \ 方案种类	1 方案 单镜头	2 方案 双镜头	3 方案 4 镜头	4 方案 三镜头	5 方案 单镜头	6 方案	7 方案
扫描方式	电子式	"	"	"	"	电子式加 平面反射镜	"
飞行高度	724km	"	"	"	"	"	"
扫描宽度	140km	"	"	"	"	40.96km	
地面分辨率	23m	"	"	"	40 m	20 m	15 m
光谱通道	可见光 0.45—0.52μm 0.52—0.60 0.60—0.70 0.8—1.05	"	"	"	"	"	"
接收器数目	CCD 2048×3	" 2048×3	" 2048×3	" 2048×3	" 1750×2	" 2048×1	" 2048×1
像面尺寸	φ92.16mm	φ92.16	"	"	φ52.5	φ30.72	φ30.72
物镜参数	f476.6 f/3.5 2U _p 为11°	可见, 红外 各一个	f476.6 f/5 2U _p 为11°	476.6 f/3.5 (一个) f/5(二个)	271.5 f/3.5 2U _p 为11°	543 f/5 2U _p 为3.2°	724 f/3.5 2U _p 为 2.42°
分光方式	棱镜分光	"	不分光	可见分两 波段 红外一个 镜头	棱镜分光	不分光	不分光
纯光学件 重 量	16.5kg	24.1	30.5	31.2	4.1	5.76	8.8

六、光学系统结构型式的选择

从分析上述光学系统参数看, 可采用透射式或折反射式结构型式。

1. 透射式结构

物镜采用透射式结构型式, 其视场范围能大些, 后工作距离可长些, 便于放置分光棱

镜。设计长焦距物镜要求校正二级光谱, 必须采用些特殊玻璃, 如 FK_1 、 CaF_2 等, 而这些玻璃对星载仪器而言, 并不理想。受温度、压力的影响, 其折射率和线度均有较大变化, 直接影响象面位置的变化, 以光学参数焦距为476mm, $f/3.6$, 全视场 11° 的物镜为例, 计算其像面移动量。经过计算, 压力变化 ΔP 要求控制在 ± 0.15 大气压内; 温度变化 ΔT 要求控制在 $\pm 1.5^\circ C$ 之内, 这说明, 透射式物镜对周围环境要求太苛刻了。也设计一个如图7的远摄型式的物镜, 其参数为焦距543mm, $f/5$, 全视场为 3.24° , 对光谱线 CF 消色差, 还剩余二级光谱的几何量为0.11mm。

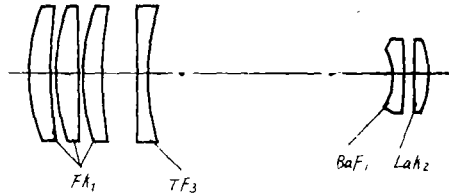


图 7

2. 折反射式结构

(1) 高斯光学计算

根据已确定的光学系统参数, 其焦距为724mm; 相对孔径 $1/3.5$; 全视场为 $\phi 61.44$ mm, 进行具体的折反射式物镜的设计。参看图8。首先计算主反射镜的外形尺寸, 由系统的焦距和相对孔径计算出主反射镜的通光口径为 $\phi 206.86$ mm, 设主反射镜的相对孔径为 $1/B_1$, $B_1 = \sqrt{B}$, B 为整个系统的相对孔径的倒数为3.5, 算出 B_1 为1.8783,

主反射镜的焦距: $f_1 = D \cdot B_1$ 计算得387mm,

主反射镜的曲率半径 R_1 为774mm。

次镜放大率 $\beta = l_2' / l_2 = U_2 / U_1'$ 计算得1.87083倍。

中心遮拦系数 $\alpha = D_2 / D_1$ 计算得 $1/2.465$

次反射镜曲率半径 R_2 计算得674.425mm。

主、次反射镜之间间距假设 d 为230mm, 计算主、次反射镜产生的 S_I 和 S_{II} , 参看图8。

(2) 解无光焦度校正板

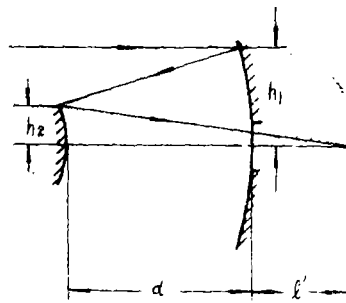


图 8



图 9

如图9所示, 设 $\varphi_1 = -\varphi_2 = \varphi$, $n_1 = n_2 = n_0$

$$\overline{Q}_1 - \overline{Q}_2 = S_{11} / j \frac{(n+1)}{n} h^2 \varphi^2$$

$$\overline{Q}_1 + \overline{Q}_2 = \left[\begin{array}{cc} S_{1j}(n+1) & 3 \\ S_{11}h^2\varphi n & n-1 \end{array} \right] \frac{n}{n+2}$$

主、次反射镜产生的 ΣS_I 和 ΣS_{II} ，用无光焦度校正板产生反号 S_I 和 S_{II} 来抵消。将反号 ΣS_I 和 ΣS_{II} 代入上述公式，求得 \overline{Q}_1 和 \overline{Q}_2 ，再用下面公式求出无光焦度校正板的曲率半径。

$$\begin{cases} C_2 = \overline{Q}_1 + 1 \\ C_1 = C_2 + \frac{1}{n-1} \end{cases} \begin{cases} r_2 = 1/C_2\varphi_1 \\ r_1 = 1/C_1\varphi_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_3 = -(\overline{Q}_2 + 1) \\ C_4 = C_3 - \frac{1}{n-1} \end{cases} \begin{cases} r_3 = 1/C_3\varphi_2 \\ r_4 = 1/C_4\varphi_2 \end{cases}$$

(3) 象差校正

得出如图10所示的初始结构型式，反复进行象差校正，用前无光焦度组校正 S_I 、 S_{II} ，用

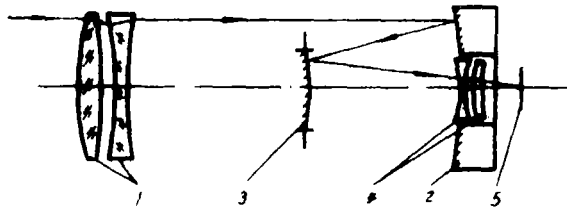


图10 1—大校正物镜 2—主镜 3—次镜
4—小校正物镜 5—CCD阵列

后无光焦度组校正 S_{II} ，用主、次反射镜之间间距校正 K_r ，设计出物镜成像质量较理想。由于机械结构要求光学后工作距大于80mm，这给光学设计带来较大困难，使得光学系统的中心遮拦较大，并且需要加杂光光栏，减少杂光。设计中没用调焦装置，所以光学设计在整个系统中只用一种玻璃材料，有利于与金属件的配合。镜筒金属材料加入殷钢，使其与 K_r 玻璃膨胀系数尽量一致。设计结果物镜口径238mm，机械筒长440mm，中心遮拦系数为1/2.33。纯玻璃重约为7.1kg。

七、光学系统的成像质量

光学系统弥散盘直径约在0.01mm以下，最大畸变小于万分之一；透过率为60%。

图11表示空间频率为30对线/mm，40对线/mm和50对线/mm时，对光谱波长 D 光计算出视场 U ，与传递函数关系曲线，从图11可见，轴上到0.71视场以内 $MTF > 0.5$ ，全视场 $MTF < 0.2$ 。装调后测试目视分辨率360对线/mm以上。用光谱干板拍摄照相分辨率轴上

50对线/mm, 轴外42对线/mm, 全视场4.2°。用杂光测定仪测得杂光系数为3.5%, 这对折反射系统是比较小的。

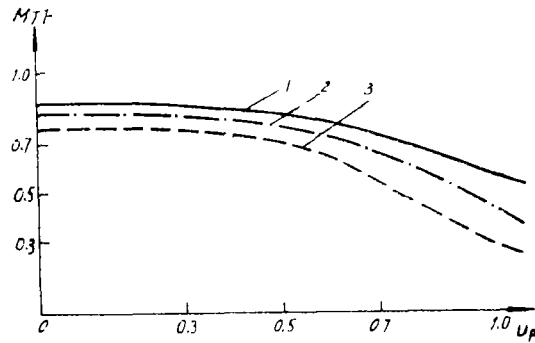


图11 视场 U_p 和 MTF 关系曲线

1— f_r30 对线/mm 2— f_r40 对线/mm 3— f_r50 对线/mm

参 考 文 献

- [1] O.Hofmann, P. Seige; Erste erprobungsergebnisse mit der experimentellen optoelektronischen kamera von MBB, bildmessung und luft bild wesen, 1979, 47, Heft 2, 33—40.
- [2] Proceedings of the twelfth international symposium on Space technology and Science 1977, 221—226.
- [3] R. Welch; Measurements from linear array camera images, Photogrammetric engineering and remote sensing, 1980, 46, No. 3, March, 315—318.
- [4] 卢寿楠 [译]; 地资卫星上的四带和五带多光谱扫描器, 光学机械, 1976年3期 14—23.
- [5] 叶人超; 航空多光谱扫描仪原理和性能分析, 红外物理与技术, 1980年3期。

Design of Optical System on All Bands CCD MSS on EROS

Sun Jing

Abstract

In the paper, the principle and features of a multi spectral scanner (MSS) based on electronical scanning for earth resources observation satellite (EROS) are described and optical system parameters of all bands CCD MSS are determined according to general scheme of the system. The structure of the optical system is selected and some ways for beam splitting are discussed. Finally the design of a refracting-reflecting objective with long focal length is represented.