

推帚-光机混成式扫描光学系统

韩 心 志

(哈尔滨工业大学一系)

摘要——大视场反射式光学系统和红外波段的取样是推帚-光机混成式扫描方式要解决的关键问题。针对这一问题,本文提出一种新的扫描方案,并对该方案进行了论证与分析。

一、引 言

推帚式扫描的优越性是明显的。这种扫描方式可用位于焦面的线列探测器来复盖大面积观测地区。不象光机扫描那样要用反射镜等运动光学元件在垂直于航向的方向上进行扫描。这样,不仅大大简化了扫描机构,而且也提高了扫描精度。其次,由于探测器积分时间的差异,推帚式装置的灵敏度要比光机式扫描的灵敏度提高约 20 倍。另外,推帚式传感器的扫描效率是 100%,而光机式扫描的扫描效率最高只有 85%。因此,光机式传感器的数据速率比推帚式要高出 15% 以上。但是,短波红外,尤其是中远红外波段的集成焦面阵列还远没有达到实用水平。推帚式扫描的长波界限还没有超过 $1\mu\text{m}$ 。

另一方面,光机式扫描的焦面阵列是由分立式多元探测器构成的,比较简单。价格低而又成熟。所探测的波段一直延伸到中远红外光谱区。

倘若在可见光及近红外波段使用推帚式扫描,而在短波红外和中远红外波段使用光机式扫描,并把此两种扫描方式结合于同一个系统中,组成推帚-光机混成式扫描,则将具有下列优点:

1. 光谱范围宽。从 $0.50\mu\text{m}$ 可见光一直到 $12.50\mu\text{m}$ 中远红外波段,可给出全部可利用的波谱,可获得丰富的和有价值的卫星图象产品。
2. 适应性强。这种扫描方式既适合于当前国内外焦面成像阵列的已有水平,又有发展前途。一旦中远红外波段的集成摄像阵列达到实用水平,就可以毫不困难地过渡到从可见光至中远红外波段的宽波段推帚式扫描。
3. 经济价值高。就其性能和可能获得的图象产品价值而言,这种混成式扫描方式比国内外同类产品具有明显的优势。

图 1 表示推帚-光机混成式扫描系统的原理框图。

由地物场反射或自身辐射的波,经过大气窗口的选择,由大视场全反射光学成像系统接收,并在其焦面上成像。

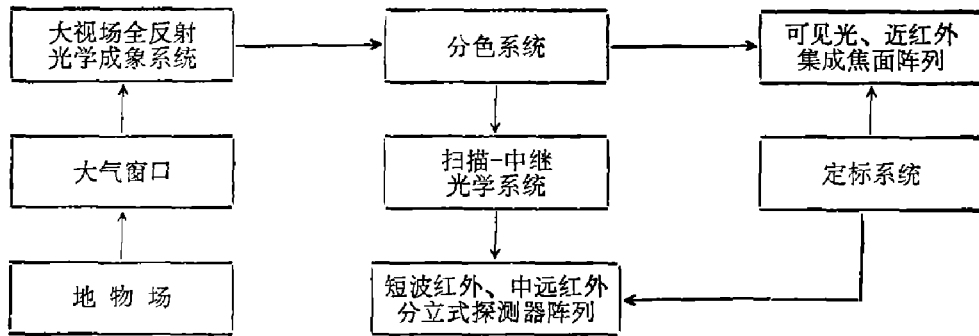


图1 推帚-光机混成式扫描系统图

Fig. 1 The push broom and optical-mechanic scan system

分色系统将入射光的波谱按波长展开。小于 $1\mu\text{m}$ 波长的波谱, 在可见光和近红外 CCD 焦面摄像阵列上成像, 以实现这一波段的推帚式扫描。

大于 $1\mu\text{m}$ 的波长的波段, 经扫描-中继光学系统取样, 在短波红外和中远红外探测器阵列上成像, 以实现这一波谱区的光机式扫描。

二、大视场全反射望远系统

由图 1 可见, 大视场全反射光学成像系统和扫描-中继光学系统是混成式扫描系统区别于其它扫描方式的主要子系统。

由于光学材料和光学设计上的限制, 在从可见光到中远红外波段的整个波谱范围内, 实现大视场、大口径的望远系统是极其困难的。这导致了寻求全反射光学系统的研究。

在光机扫描系统中使用的同轴双反射镜成像系统, 如卡氏系统, 不可能实现大视场优质成像, 其原因在于其本身光学结构的限制。

为满足推帚式扫描要求, 其成像系统应满足以下条件: 孔径要大, 以便对弱信号提供足够的灵敏度; 无遮光, 以便减小 MTF 的下降量; 视场要大, 允许推帚式扫描; 象质极好, 使全视场象质要一致; 焦面平坦, 便于应用探测器阵列; 颜色校正极佳, 全部所用光谱带均好; 系统允许量高, 允许探测弱信号; 场外能量抑制高, 降低背景水平。

轴外多反射镜无阻挡孔径全反射光学系统可满足上述全部要求。

进一步分析可知, 卫星的前进运动已提供了航迹方向上的推扫。在使用线列集成焦面的情况下, 大视场的要求仅发生在穿轨迹的方向上。也就是说, 光学系统的瞬时视场是一个窄条。这给系统设计以很大的启发。

设有一光学系统, 用极坐标 (r, θ) 表示出瞳上光线迹点的位置, 视场内的轴外点用象点离光轴的距离 H 表示。如此, 系统的波象差方程式可写成

$$\begin{aligned}
 W(H, r, \theta) = & a_1 r^4 + a_2 H r^3 \cos \theta + a_3 H^2 r^2 + a_4 H^2 r^2 \cos^2 \theta + a_5 H^3 r \cos \theta \\
 & + b_1 r^6 + b_2 H r^5 \cos \theta + b_3 H^2 r^4 + b_4 H^2 r^4 \cos^2 \theta + b_5 H^3 r^3 \cos \theta \\
 & + b_6 H^3 r^3 \cos^3 \theta + b_7 H^4 r^2 + b_8 H^4 r^2 \cos^2 \theta + b_9 H^5 r \cos \theta + \dots; \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中, a 为三级(赛德)象差系数, b 为五级象差系数。

式(1)表明, 在设计时如果使五级象差尽可能地减小, 其剩余量可以由具有同种变量出瞳坐标 (r, θ) 的三级象差来平衡。例如, 系数 a_3 (赛德彗差) 可用来平衡 b_5 (五级椭圆彗差)。结果, 这两系数的波象差变为

$$W = (a_2 H + b_5 H^5) r^3 \cos \theta \quad (2)$$

图2表示在全视场范围内对系数 $r^3 \cos \theta$ (有三级彗差出现时)平衡的情况。使 a_2 和 b_5 符号相反,并使其尽可能地平衡,则可以大大降低有效象差。在轴外某点,例如图中的 H_0 点,有效象差降低到零。在视场内的其它各点,保证为最佳的折衷值。其它象差也可以用类似的方法平衡。剩下的残余象差随视场而变化,但由于只剩下五级象差,数值已经不大了。

在系统是对称的情况下,以系统对称轴为圆心,以 H_0 为半径,将形成一环形优质象带,其波象差方程式为

$$\begin{aligned} W(H_0, r, \theta) = & (a_1 + H_0^2 b_3) r^4 + (a_2 + H_0^2 b_5) H_0 r^3 \cos \theta \\ & + (a_3 + H_0^2 b_7) H_0^2 r^2 + (a_4 + H_0^2 b_8) H_0^2 r^2 \cos \theta \\ & + (a_5 + H_0^2 b_9) H_0^3 r \cos \theta + b_1 r^6 + b_2 H_0 r^5 \cos \theta \\ & + b_4 H_0^2 r^4 \cos^2 \theta + b_6 H_0^3 r^3 \cos^3 \theta + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

在式(3)中,五个三级象差和九个五级象差已降低为九个有效象差,而其中的五个象差可以在三级象差系统中平衡到零。

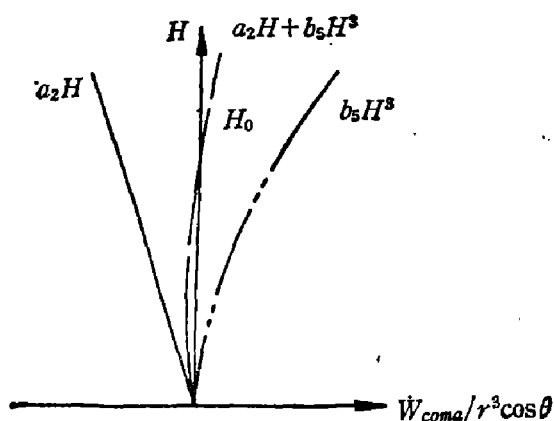


图2 三级象差和五级象差的平衡
Fig. 2 Balance between the third and the fifth order aberrations

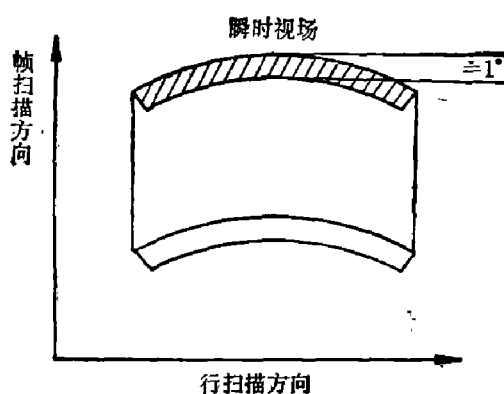


图3 环形视场扫描图形
Fig. 3 Scan figure for circle field of view

如果放弃用直线带形视场扫描的传统概念,改用弧形带状视场扫描(见图3)。则式(3)所表示的光学系统(环形视场光学系统)即可得到应用。这种系统在以 H_0 为半径的圆环附近的一个窄带中,可以完全满足上述推帚式扫描对光学系统所提出的要求。扫描所用的瞬

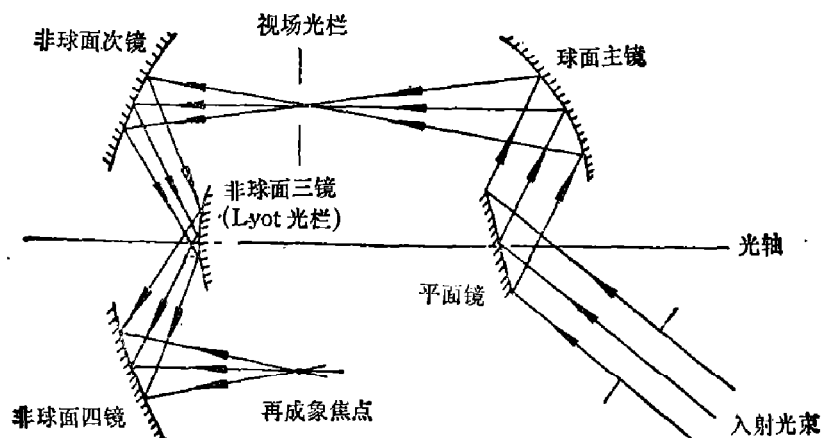


图4 环形视场光学系统
Fig. 4 The optical system for circle field of view

时视场,只是此圆环的一部分。当然与这种瞬时视场相应的集成焦面阵列也是一段圆弧,但就其本质和工艺过程而论,它和直线型集成焦面阵列没有任何区别。

图4给出这种光学系统环形视场扫描的图形。入射光束由球面主镜在其焦点上形成一欠校正的象。在此象处放置一环形光栏(与图面对称的环形槽孔)。另外,三块反射镜形成一组,封置于一独立的腔室内,使得在再成象焦面上构成一平坦的,高质量的环状象。其独立的腔室可以限制杂光,并便于温度控制。在视场光栏处放一块太阳抑制滤光片,以限制光谱带以外不需要的光;因此,可以应用低温光学系统来降低背景。

三、扫描-中继光学系统

扫描中继光学系统完成地物场红外象的扫描取样工作,并把该取样象转移到致冷器的致冷焦面上,在此焦面上配置分立单元红外探测器阵列。

图5是推帚-光机混成式扫描光学系统图。由图可见,该系统由三部分组成,“1”是前述大视场全反射光学成象系统(包括分色镜 F_3);“2”是中继扫描光学系统;“3”是双反射镜卡氏系统。在 M_2 处配置可见光及近红外集成焦面摄像环形阵列(过 M_2 点的圆环,图中未画出)。

在设计此中继扫描系统时,考虑的要求有:1)不损失大视场系统的象(M_3)在致冷焦面上共轭取样象(M_4)的质量;2)实现多元多光谱扫描;3)结构合理,对卫星不产生任何不允许的动力学影响。

这一系统由两块平面反射镜 O' 和 O 组成。两反射镜互相平行并一起绕卡氏双反射镜系统的光轴旋转,从而完成对环形象(M_3)的顺次取样工作。

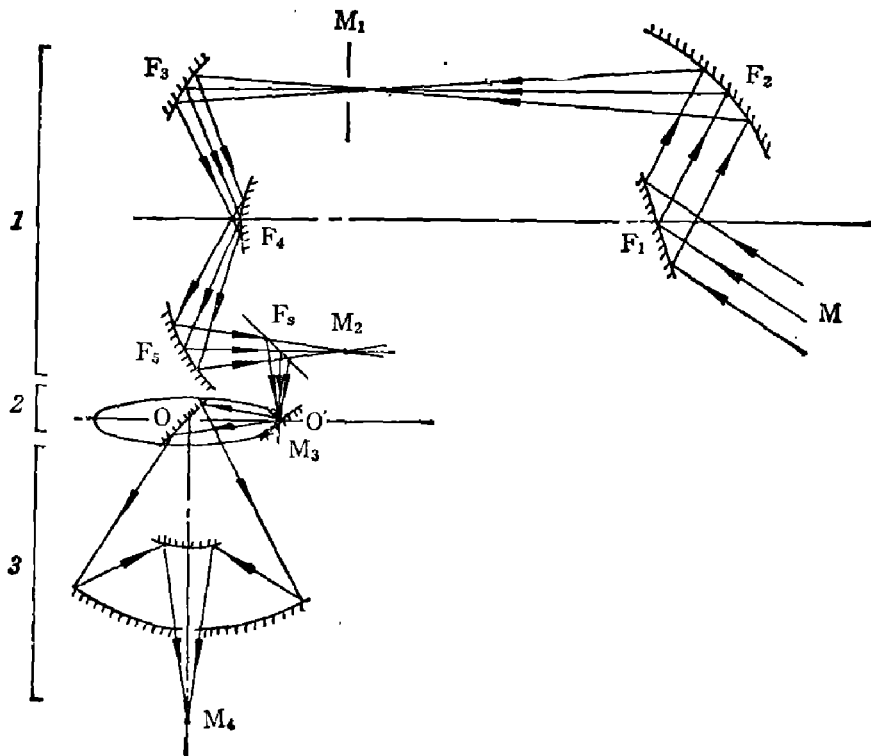


图5 推帚-光机混成式扫描光学系统图

Fig. 5 The optical system for push broom and optical-mechanic scan

由图 6, 设入射象为平行于 x 轴的单位向量 \bar{A} , 为实现多元多光谱扫描, 则只需要证明: 当扫描取样系统绕 z 轴旋转时, 系统的出射象仍和 x 轴平行, 而且沿以 z 轴为轴心的圆周取样。或者, 反过来说, 圆周 O 上所有平行于 x 轴的向量 $\bar{A}'_1, \bar{A}'_2, \bar{A}'_3 \dots$ 等, 在扫描取样系统旋转时, 都成象在向量 \bar{A} 上, 和向量 \bar{A} 重合。下面可以证明, 上述取样是正确的。

依向量反射定理:

$$\bar{A}' = \bar{A} - 2\bar{n}(\bar{A}\bar{n}), \quad (4)$$

在图 6 所示的情况下,

$$A_x = 1; A_y = 0; A_z = 0。$$

设反射镜 O 绕 z 轴转动 $-\varphi$ 角, 对其法线 \bar{n}_1 来说:

$$n_{1x} = \sin \alpha \cos \varphi; n_{1y} = -\sin \alpha \sin \varphi;$$

$$n_{1z} = -\cos \alpha;$$

式中, α 为法线 \bar{n}_1 和 z 轴间的夹角, 并取 $\alpha = 45^\circ$ 。由此得

$$(\bar{A}\bar{n}_1) = A_x n_{1x} + A_y n_{1y} + A_z n_{1z}$$

$$= A_x n_{1x} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \varphi,$$

$$\bar{A}' = A_x \bar{i} + A_y \bar{j} + A_z \bar{k} - 2(n_{1x} \bar{i} + n_{1y} \bar{j} + n_{1z} \bar{k}) \cdot (A_x n_{1x} + A_y n_{1y} + A_z n_{1z})$$

$$= \sin^2 \varphi \bar{i} + \frac{1}{2} \sin 2\varphi \bar{j} + \cos^2 \varphi \bar{k}。 \quad (5)$$

由于反射镜 O' 和反射镜 O 相对位置固定不变, 并绕同一 z 轴旋转, 则当反射镜 O 旋转 φ 角后, 反射镜 O' 除位置有平行移动外, 亦绕一平行于 z 轴的自身轴旋转同一角度 φ 。

由于反射镜的平移运动不对象的形成和运动产生影响, 故只需讨论反射镜 O' 旋转所产生的效果。

重复应用公式 (4), 可以得出

$$\bar{A}'' = \bar{i}。$$

这个结果表明, 经中继系统的出射象 \bar{A}'' , 其方向与取样系统的旋转无关, 永远和 x 轴平行, 即和入射象的方向一致。

这样, 沿方向 A 配置多元探测器阵列, 即可以实现短波红外和中远红外波段的多元多光谱扫描。而当这一波段的集成焦面阵列达到实用水平后, 图 5 中的 2、3 两部分可以方便地拆除, 并过渡到从可见光到中远红外波段的全波段推帚式扫描。

参 考 文 献

- [1] Nummedal. K., *SPIE*, Vol. 226, 1981, 4: 2~12.
- [2] 张幼文, 红外光学工程, 上海科技出版社, 1983, 240~246.
- [3] Altenhof. R. R., *Opt. Eng.*, 15(1976), 364.

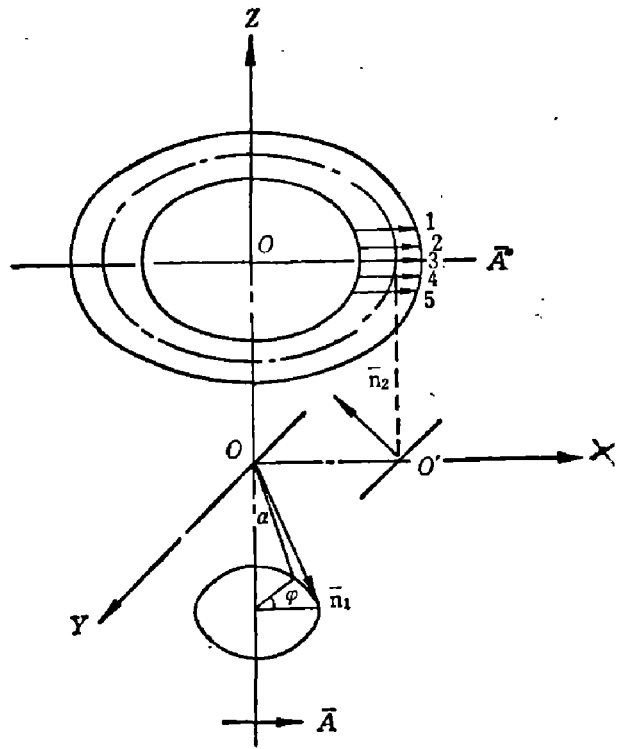


图 6 扫描中继系统取样原理

Fig. 6 The principle of sampling for scan relay system

OPTICAL SYSTEM FOR PUSH-BROOM AND OPTICAL MECHANIC SCAN

Han Xinzhi

(Photoelectron Department, Harbin Institute of Technology)

ABSTRACT

A new scan project is presented, analysed and demonstrated to solve the key problems of a reflective optical system with wide field of view and sampling in infrared push-broom and optical-mechanic scan mode.