

扫描线校正器的光学原理及分析

杨 存 武

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——在星载多光谱扫描仪中引入扫描线校正器(SLC)可显著地改善仪器的性能。本文讨论的扫描线校正器由两块互相平行的、绕公共轴线往复转动的平面反射镜组成。文中以严格的解析形式给出了该装置的运动方程,对扫描线的校正问题作了深入分析,并讨论了有关的几个问题。本文给出的结果,可作为扫描线校正器光学设计的依据。

一、焦面运动方程

现代的星载多光谱扫描仪常把各波段的视场光阑并列设置于光学系统焦面上,而每一个波段又包含若干个探测单元。为使各单元对应的地面图象在扫描过程中保持固定的排列,通常使用摆动镜作物方扫描。随着卫星的飞行及扫描镜的摆动,得到的扫描条带如图1(a)所示。这样的扫描条带与卫星飞行方向不垂直,特别是正向(设由西至东)扫描条带与反向扫描条带有很大一部分交迭在一起,倾斜方向又不同,因而只有正向扫描是有效扫描,扫描效率很低。为改进多光谱扫描仪的性能^[1,2],在仪器中引入扫描线校正器(SLC),将扫描线校正成图1(c)所示状态,使两个方向的扫描均成为有效扫描。

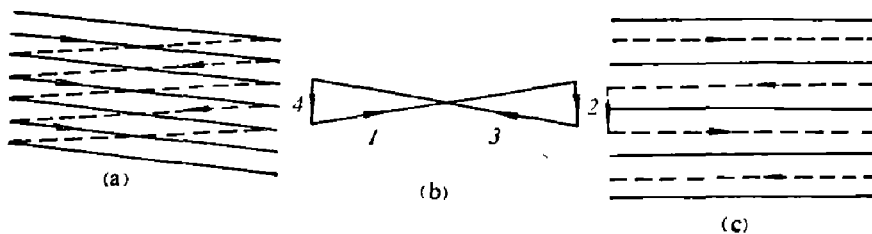


图1 扫描轨迹

(a) 单向扫描 (b) 扫描线校正器使图象位移 (c) 双向有效扫描

本文讨论的扫描线校正器由两块可绕公共轴转动的、与光学系统光轴成 45° 角的平面反射镜组成,放置在焦面前适当距离处。当该装置转动时,焦平面列阵相对于光轴运动。这里,我们以解析形式来描述焦面的运动规律。参看图2,选取坐标系 O_1-xyz 。设卫星自北向南飞行,降交点在上午9:30左右,光学系统光轴(由入射到出射)的指向朝西,即沿 x 轴的正

方向。设两块镜面的中心间距 $O_1O_2=P$ ，公共轴线的转动角 θ 在 xz 平面内量度，规定两块镜面的法线 N_1 、 N_2 在 xy 平面内时， $\theta=0$ ，并规定由 x 轴正向到 z 轴负向(西→南→东→北)为 θ 的正值。写出反射平面方程并与光线方程联立，可得到过点 (x, y, z) 、方向余弦为 (ξ, η, ρ) 的光线与反射面的交点坐标 (x', y', z') ：

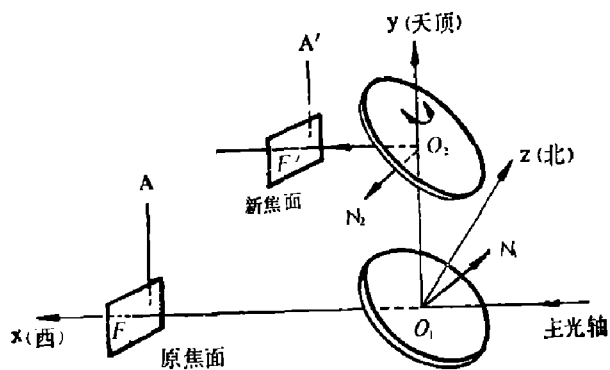


图2 坐标系

弦为 (ξ, η, ρ) 的光线与反射面的交点坐标 (x', y', z') ：

$$\begin{cases} x' = \frac{y - \frac{\eta}{\xi}x - P_0 + z \sin \theta - \frac{\rho}{\xi}x \sin \theta}{\cos \theta - \frac{\eta}{\xi} - \frac{\rho}{\xi} \sin \theta}, \\ y' = y + \frac{\eta}{\xi}(x' - x), \\ z' = z + \frac{\rho}{\xi}(x' - x). \end{cases} \quad (1)$$

式中：对反射面 1, $P_0=0$ ；对反射面 2, $P_0=P$ 。再求反射光线的方向矢量 $q'(\xi', \eta', \rho')$ 。当入射光线方向矢量为 $q(\xi, \eta, \rho)$ 、反射平面法线矢量为 $N(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ 时，反射定律为

$$\begin{cases} q \times N = q' \times N, & (2a) \\ q \cdot N = -q' \cdot N. & (2b) \end{cases}$$

用 N 对式 (2a) 两边作矢积，算得

$$q' = q + (q' \cdot N - q \cdot N)N, \quad (3)$$

代入式 (2b)，得

$$q' = q - 2(q \cdot N)N. \quad (4)$$

对于 θ 角位置，写出法线 N_1 、 N_2 的方向余弦，并令

$$D = \xi \cos \theta - \eta - \rho \sin \theta, \quad (5)$$

则不论对反射面 1 或 2，出射光线矢量皆为

$$\begin{cases} \xi' = \xi - D \cos \theta, \\ \eta' = \eta + D, \\ \rho' = \rho + D \sin \theta. \end{cases} \quad (6)$$

式 (1)、(6) 是对转动的双反射镜系统求解任意光线的普遍方程。

设未引入该装置时，焦面在 l_0 处，现考查焦面上的焦点 $F(l_0, 0, 0)$ 及轴外点 $A(l_0, y_A, z_A)$ 。由于平面反射镜仅使光线转折而不引入像差，交于某点的众多光线经平面镜反射后仍相交于一点，因而只需要考查其中一条光线即可，当然以选择平行于光轴的光线为最方便。求解过程是：把光线起始数据代入式 (1)、(6)，求出在第一镜面上的交点及反射矢量，又以它们为新的起始数据代入式 (1)、(6)，得出在第二镜面上的交点及最后的出射矢量。利用这两个交点的坐标值和最后的出射矢量，则可得到焦点 F 和轴外点 A 经过系统后的新位置 F' 和 A' 的坐标值。

求解结果：第一条光线过焦点 $F(l_0, 0, 0)$ ，入射矢量为 $T(1, 0, 0)$ ，经过系统后出射矢量为 $T(\xi'_T, \eta'_T, \rho'_T)$ ，点 F 变换为点 $F'(x'_F, y'_F, z'_F)$ ，有

$$\begin{cases} \xi'_T = 1, \\ \eta'_T = 0, \\ \rho'_T = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} x'_F = l_0 - P \cos \theta, \\ y'_F = P, \\ z'_F = P \sin \theta. \end{cases} \quad (7)$$

第二条光线过轴外点 $A(l_0, y_A, z_A)$ 、入射矢量为 $K(1, 0, 0)$ ，经过系统后的出射矢量为 $K'(\xi'_K, \eta'_K, \rho'_K)$ ，点 A 变换为点 $A'(x'_A, y'_A, z'_A)$ ，有

$$\begin{cases} \xi'_K = 1, \\ \eta'_K = 0, \\ \rho'_K = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} x'_A = l_0 - P \cos \theta, \\ y'_A = y_A + P, \\ z'_A = z_A + P \sin \theta. \end{cases}$$

式(7)、(8)描述了焦面的运动规律，据此得出以下几个主要结论：

(1) 矢量 T' 平行于 T ，矢量 K' 平行于 K 。事实上，对任意光线都是如此。无论转动角 θ 为何值，光线经过系统后仍与原入射方向平行。

(2) x'_F 值与 x'_A 值相同，表明系统在转动过程中，焦面始终保持与光轴垂直。

(3) 由 $y'_A - y'_F = y_A$ 、 $z'_A - z'_F = z_A$ 看出，点 A' 对点 F' 的相对位置与点 A 对点 F 的相对位置完全一样。点 F' 和点 A' 在 y 向的数据始终不变，因而焦面没有旋转，仅在 z 向平移。

(4) 光轴或焦面在横向(z 轴方向)的平移量为

$$\Delta z = 2(z'_F|_{\theta=\theta_{\max}} - z'_F|_{\theta=0}) = 2(z'_A|_{\theta=\theta_{\max}} - z'_A|_{\theta=0}) = 2P \sin \theta_{\max} \quad (9)$$

(5) 对不同的转动角 θ ，焦面轴向位置的变化量为

$$\Delta x = x'_F|_{\theta} - x'_F|_{\theta=0} = x'_A|_{\theta} - x'_A|_{\theta=0} = P(1 - \cos \theta), \quad (10)$$

这表明该装置虽然不增加任何像差，但产生离焦量 Δx 。

二、扫描线的校正过程

若要得到图1(c)所示的扫描条带，须满足两个要求，一是扫描条带与卫星飞行方向垂直，即在东西方向是平直的；二是扫描镜正向摆动与反向摆动形成的相邻条带无交迭部分，并且又要恰好相接。

当扫描线校正器作正向(北→西→南→东)转动时(参见图3(a))，由式(7)中 $z'_F = P \sin \theta$ 可知， θ 增大亦使 z'_F 增大，光轴朝 z 轴正向即由南向北平移(参见图3(b))，相对于光轴焦平面列阵由北向南平移(参见图3(c))。若采用成倒像的卡塞格林光学系统，焦平面列阵对应的地面景物则由南向北平移(参见图3(d))。通过扫描镜的摆动得到图1(b)中1、3所示的倾斜轨迹，再考虑卫星自北向南的飞行运动，使两者移动速率等值异向，合成结果就实现了在东西方向平直的扫描条带，从而满足了第一个要求。

摆镜在时间 T_1 内作有效扫描，扫描线校正器在此 T_1 时间内正向转动，作有效校正。此后，摆镜经过较短时间 T_2 返回并开始反向有效扫描，扫描线校正器也就在此 T_2 时间内反向迅速转动，恢复到原来的起始位置，对应的地面景物迅速由北至南移动一段距离(图1(b)中的2)，使就要开始的回扫条带与前面的正扫条带恰好相接，这样，就实现了第二个要求。这种摆镜运动与扫描线校正器转动的配合，可用图4中的“角度-时间关系”表示。简单地说，扫描线校正器就是交替地进行转动(北→西→南→东)和迅速回转，以实现扫描线的校正。

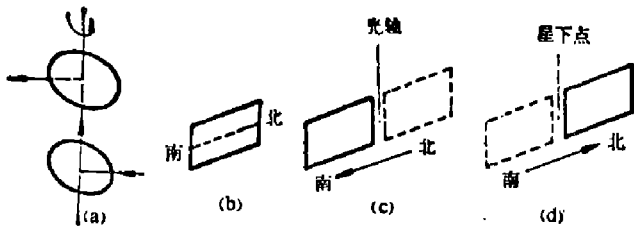


图3 扫描线校正器的转动效果

- (a) 扫描线校正器转动(北→西→南→东) (b) 光轴平移(南→北) (c) 相对于光轴焦面列阵平移(北→南) (d) 地面景物平移(南→北)

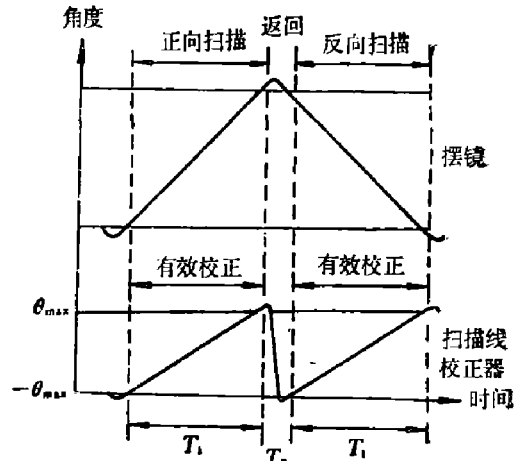


图4 角度-时间关系

三、校正速率和校正量

焦面在光轴横向(z 向)的平移由 $z = P \sin \theta$ 确定, 对应的物方视场平移速率为

$$\frac{H}{f} \cdot \frac{dz}{dt} = P \frac{H}{f} \cos \theta \frac{d\theta}{dt}。$$

式中 f 为光学系统焦距, H 为卫星高度。设卫星运动引起的地面景物移动速率为 V_s 。(当卫星高度选定后, V_s 就是确定的), 为把实际扫描线校正为平直的, 则需

$$\frac{H}{f} \cdot \frac{dz}{dt} = V_s,$$

于是得到

$$P \cos \theta \frac{d\theta}{dt} = V_s \frac{f}{H}。 \quad (11)$$

式(11)决定了对于一定 P 值的扫描线校正器的转动速率 $\frac{d\theta}{dt}$ 。可以看出: (1) 转动速率并不是唯一的, 可通过选取不同的反射镜间距 P 加以调整。(2) 即使扫描线校正器作匀速转动 ($\frac{d\theta}{dt}$ 为常数), 地面景物移动速率 V_s 也不变化, 但仍存在非线性因子 $\cos \theta$, 使扫描条带不是严格平直的。不过, 由于最大转角 θ_{\max} 一般在 1.5° 以内, 而 $\cos 1.5^\circ = 0.9996$, 扫描线的平直度偏差小于 0.04% , 这完全是允许的。

摆镜的有效扫描时间 T_1 就是扫描线校正器的有效校正时间, 在这段时间内, 扫描线校正器由 $-\theta_{\max}$ 转到 θ_{\max} 。对式(11)两边求积分, 注意时间与角度的对应, 有

$$\int_{-\theta_{\max}}^{\theta_{\max}} \cos \theta d\theta = \int_0^{T_1} \frac{V_s f}{PH} dt,$$

求得

$$\theta_{\max} = \sin^{-1} \left(\frac{V_s f T_1}{2PH} \right)。 \quad (12)$$

式(12)决定了最大有效转角。相应的地面图像总校正量为

$$C_1 = \frac{HP}{f} [\sin \theta_{\max} - \sin(-\theta_{\max})] = V_s \cdot T_1。 \quad (13)$$

从卫星运动来看, 这一结果是必然的。

J. C. Lensing^[3] 认为, 对应于总校正量, 焦面的位移大约等于探测器长度, 或地面景物

大约移过一个扫描条带宽度。这种说法是不妥当的。由于返回时间 T_2 与 T_1 之比一般为 $T_2:T_1=1:6$, T_2 甚为可观, 在时间 T_2 内卫星的飞行又使地面景物移过一段距离 $C_2=V_s T_2$, 所以, 总校正量 C_1 与 C_2 的和(不仅仅是 C_1)才等于扫描条带宽度, 即 $C_1+C_2=V_s(T_1+T_2)$, 这也正是相邻扫描条带恰好相接的先决条件。

四、讨 论

这里讨论几个与扫描线校正器实际应用有关的问题。

1. 转速 $\frac{d\theta}{dt}$ 与间距 P 的选取

前面已指出, 对于所需的校正速率, 可以通过扫描线校正器的转速 $\frac{d\theta}{dt}$ 及两块反射镜间距 P 的不同组合来实现。同样, 对于所需的校正量也可通过最大转角 θ_{\max} 与 P 的不同组合来实现。在选取恰当的 $\frac{d\theta}{dt}$ 、 θ_{\max} 及 P 时要着重考虑离焦量 Δx , 应将 Δx 引起的弥散增量 δ 限制在不明显影响光学系统像质的范围内。如果 δ 过大, 可增大 P 值, 使 θ_{\max} 减小, 从而 Δx 及 δ 也减小; 反之, 如果 θ_{\max} 过小, 装置的转动及线性度不易实现, 则可减小 P 值, 在允许的 δ 范围内使 θ_{\max} 适当增大。

2. 转动装置

扫描线校正器的转动在有效校正时间内应具有良好的线性度, 并能在扫描镜反转的短暂时间内返回原位置。可以采用铍制品作转动部件, 用挠曲枢轴作转动支架, 使用带有转速反馈的动圈马达驱动。实现这种转动装置看来还有一定难度。可以认为, 双向扫描摆镜运动的难度会减小, 但这部分困难将转移到扫描线校正器方面。由于尺寸较小, 又是绕中心轴转动的, 实现这一装置的前景还是乐观的。

3. 扫描线校正器的效益。

在多光谱扫描仪中引入扫描线校正器将使仪器性能有重大改进。一方面, 它使两个方向的扫描均为有效扫描, 明显地提高了扫描效率。这就导致电子系统带宽下降而信噪比提高, 并使数据速率下降, 在数据处理与传输能力相近的前提下, 可使仪器向更高分辨率、更高灵敏度发展。另一方面, 对相同的卫星高度、光学系统焦距及焦平面列阵线性度, 扫描镜的摆动频率也降低了。这就减少了扫描镜所需要的驱动功率, 并使由于摆镜运动引起的振动影响减小, 这对空间应用是十分有利的。

4. 扫描线校正器的几种可能形式

除上面讨论的双反射镜装置外, 也许还有可能采用其它形式的扫描线校正装置。但不论何种形式的装置都应具备这样一些特点: 要适应从可见到热红外的宽广波段, 只宜采用全反射系统; 校正过程中新引进的像质退化要限制在甚小程度内; 在装置的运动过程中, 焦面相对于光轴在卫星飞行相应的方向上平移, 不能有转动; 装置具有较长的有效校正时间, 并能在较短的返回时间内回复到原来的状态, 即运动过程是快、慢交替的形式。鉴于这些条件, 可以设想有平移、单向转动及双向转动三大类运动方式。前两种方式实现起来难度较大, 具体装置可能很复杂。因而, 虽然有可能使用其他形式, 但本文所讨论的双反射镜双向转动装置仍不失为一种可行的、较理想的扫描线校正器。

致谢——扫描线校正器的研究课题是由丁世昌同志提出的，本文是该课题在几何光学范畴的工作结果，曾得到匡定波、顾勇华同志的帮助，与钱鸿麟、华铁均同志作过讨论，在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Salcmenson V. V. *Proc. of the 12th international symposium on remote sensing of environment*, 1978, Vol. 1, 371.
- [2] Blanchard L. E., *IEEE Trans.*, GE-18(1980), 2: 146.
- [3] Lensing J. C., *Proc. SPIE*, Vol. 183, 1979, 224.

OPTICAL PRINCIPLE AND ANALYSIS FOR SCAN LINE CORRECTOR

YANG CUNWU

(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The scan line corrector (SLO) discussed in this paper consists of two mirrors which are parallel to each other and rotate back and forth around a common axis. The motion equations of this assembly in an exact analytic form and a deep analysis about the correction process are presented. Some related problems are also discussed. According to these results, the optical design of SLO can be easily achieved.