

像移对卫星摄影成像质量的影响

史光辉

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 对卫星飞行速度, 卫星姿态变化以及地球自转等产生的像移对卫星摄影成像质量的影响作出了定量的分析。

关键词: 像移; 卫星摄影

像移是在用底片为接收器的卫星摄影中影响成像质量的重要因素之一。在相机设计中, 需要有相应的像移补偿机构。设计者要对包括像移补偿精度在内的产生像移的各个环节和因素提出公差要求。影响成像质量的是满足这些公差要求后产生的像移补偿误差。因此必须对产生像移的各种因素对成像质量的影响作出定量的分析才能给出合理的公差。

产生像移的因素主要是卫星在轨道上的飞行速度, 其次是卫星的姿态变化和地球自转速度。这些像移都有确定的方向但不相同。因此采用的像移补偿方法是让底片在曝光时间内, 沿各像移的组合矢量方向和影像作同步移动来实现的。所以这就必需求出在组合矢量方向上经补偿后产生的像移补偿误差。像移误差量的大小取决于产生像移各因素的误差和公差。描述对像质影响的最好方式是求出由像移误差量产生的传递函数 M 。我们可以将像移在底片上造成的模糊视为一条细线在底片上像的模糊。这一线扩散函数的傅立叶变换即传递函数

$$M = \frac{\sin(\pi \cdot \sigma \cdot \nu)}{(\pi \cdot \sigma \cdot \nu)} \quad (1)$$

式中 M 为像移量, ν 为要求达到的分辨率(ρ l/mm)。下面要求出 σ 值。

1. 卫星在轨道上飞行速度形成的像移 δ_1 及其剩余像移 $\Delta\delta$

$$\delta_1 = f \cdot \frac{V}{H} \cdot t$$

$$\Delta\delta = \frac{1}{H} [(V \cdot \Delta f + f \Delta V - f \cdot \frac{V}{H} \Delta H) \cdot t + f \cdot V \cdot \Delta f] \quad (2)$$

式中 f 和 Δf 为光学系统焦距及其误差, V 和 ΔV 为卫星飞行速度及其误差, H 和 ΔH 为卫星高度及其误差。以上三种误差来自测量精度。 t 和 Δt 为曝光时间及其误差。该误差来自快门精度。

2 由于卫星俯仰动作产生的像移 δ_2 及其剩余像移 $\Delta\delta_2$ 。

$$\begin{aligned} \delta_2 &= f \cdot V_\varphi \cdot t \\ \Delta\delta_2 &= V_\varphi \cdot t \cdot \Delta f + f \cdot t \cdot \Delta V_\varphi + f \cdot V_\varphi \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

式中 V_φ 和 ΔV_φ 为卫星俯仰动作平均角速度及其误差。该误差取决于卫星姿态控制精度。

3 由于卫星滚动动作产生的像移 δ_3 及其剩余像移 $\Delta\delta_3$

$$\begin{aligned} \delta_3 &= f \cdot V_\theta \cdot t \\ \Delta\delta_3 &= V_\theta \cdot t \cdot \Delta f + f \cdot t \cdot \Delta V_\theta + f \cdot V_\theta \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

式中 V_θ 和 ΔV_θ 为卫星滚动平均角速度及其误差。该误差也来自卫星姿态控制精度。

4 由于卫星偏航动作引起的像移 δ_4 及其误差 $\Delta\delta_4$ 。

$$\begin{aligned} \delta_4 &= L \cdot V_\theta \cdot t \\ \Delta\delta_4 &= V_\theta \cdot t \Delta l + L \cdot t \cdot \Delta V_\theta + L \cdot V_\theta \cdot \Delta t \end{aligned}$$

式中 $L \cdot \Delta L$ 为像点距离偏航转动中心的距及其误差。 V_θ , ΔV_θ 为偏航动作角速度及其误差。由于偏航角很小, L 也不会大, 因此在计算时该项可以忽略。

5 由于地球自转角速度产生的像移及其剩余像移

$$\begin{aligned} \delta_5 &= \Omega \cdot R \cdot \frac{f}{H} \cdot t \cdot \cos i \\ \Delta\delta_5 &= \frac{\Omega}{H} [(f \cdot t \cdot \Delta R + R \cdot t \cdot \Delta f - \frac{Rf}{H} \cdot t \cdot \Delta H + R \cdot f \cdot \Delta t) \cos i + R \cdot f \cdot t \cdot \sin i \cdot \Delta i] \end{aligned} \quad (5)$$

式中 Ω 为地球自转角速度, R , ΔR 为地球半径及其误差, i , Δi 为卫星所在纬度及其误差。地球并非一精确的球, 因此有 ΔR 。 Δi 是由于火箭发射误差产生的。

下面求组合向量及其剩余像移。由于卫星俯仰动作产生的像移和卫星飞行方向产生的夹角很小, 为简化, 可将二者的像移代数相加, 这对于误差计算精度几乎无影响。因此

$$\sigma_1 = \delta_1 + \delta_2$$

$$\Delta\sigma_1 = \Delta\delta_1 + \Delta\delta_2 \quad (6)$$

再将 σ_1 和地球自转产生的像移 δ_5 合成为向量 σ_2 , 见附图, 则

$$\sigma_2 = \sqrt{\sigma_1^2 + \delta_5^2 - 2 \cdot \sigma_1 \cdot \delta_5 \cos \alpha}$$

$$\Delta\sigma_2 = \frac{\sigma_1 \cdot \Delta\sigma_1 + \delta_5 \cdot \Delta\delta_5 - \delta_5 \cdot \cos \alpha \cdot \Delta\sigma_1 - \sigma_1 \cdot \cos \alpha \cdot \Delta\delta_5 + \sigma_1 \cdot \delta_5 \cdot \sin \alpha \cdot \Delta\alpha}{\sigma_2} \quad (7)$$

式中 α 和 $\Delta\alpha$ 为轨道倾角及其误差。该误差也来自火箭发射精度。然后再将 σ_2 和 σ_3 合成 δ_6 。为此先求出角 β

$$\beta = \arcsin \frac{\delta_2 \cdot \sin \alpha}{\sigma_3}$$

于是

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_2^2 + \delta_2^2 - 2\sigma_2 \cdot \delta_2 \cdot \sin \beta}$$

$$\Delta \sigma_3 = \frac{\sigma_2 \cdot \Delta \sigma_2 + \delta_2 \cdot \Delta \delta_2 - \sin \beta (\delta_2 \cdot \Delta \sigma_2 + \sigma_2 \cdot \Delta \delta_2) - \sigma_2 \cdot \delta_2 \cdot \cos \beta \cdot \Delta \beta}{\sigma_3} \quad (8)$$

式中 $\Delta \beta$ 为偏流角误差。(Y为偏流角) 此误差来自像移补偿机构精度。最后在合成矢量 σ_3 上的像移误差为

$$\sigma = \sigma_3 \cdot q + \Delta \sigma_3$$

式中 q 为底片在曝光时间内作像移补偿移动速度误差, 也来自像移补偿机构精度。知道了 σ 就可用(1)式求出因像移误差而产生的传递函数 M 。

下面给出一个实例, 见表1和表2, 要求底片上的分辨率为110 lp/mm。

Table 1 Knowing parameters and relative errors

f	2800 mm	$U \varphi$	0.02 (°/s)	t	4×10^{-3} s
Δf	5.6 mm	$\Delta U \varphi$	0.002 (°/s)	Δt	4×10^{-6} s
H	300 km	R	6371 km	$V \theta$	0.02 (°/s)
ΔH	- 0.1 km	ΔR	0.01 km	$\Delta V \theta$	0.002 (°/s)
V	7.38 km/s	i	20°	α	43°
ΔV	0.01 km/s	Δi	1°	$\Delta \alpha$	1°
Ω	7.27×10^{-5} r/s	$\Delta \beta$	0.5°	q	0.5%

Table 2 Calculation result

δ_1	0.2755	δ_2	1.64×10^{-2}	σ_3	0.2792
$\Delta \delta_1$	2.3×10^{-3}	$\Delta \delta_2$	1.5×10^{-4}	$\Delta \sigma_3$	2.1×10^{-3}
δ_2	3.9×10^{-3}	σ_1	0.2794	β	2.3°
$\Delta \delta_2$	4×10^{-3}	$\Delta \sigma_1$	2.7×10^{-3}	σ	3.5×10^{-3}
δ_3	3.9×10^{-3}	σ_2	0.2793	M	0.77
$\Delta \delta_3$	4×10^{-3}	$\Delta \sigma_2$	2.6×10^{-3}		

表1中的参数和误差是比较符合实际的, 因此可利用这些参数和误差计算得到的结果对各种因素的影响作出具体的分析。将(8)式中各项的值列表3

Table 3 Comparing effects of the different image motion

$\frac{\sigma_2 \cdot \Delta \sigma_2}{\sigma_3}$	$\frac{\sin \beta (\delta_2 \cdot \Delta \sigma_2 + \sigma_2 \cdot \Delta \delta_2)}{\sigma_3}$	$\frac{\sigma_2 \cdot \delta_2 \cdot \cos \beta \cdot \Delta \beta}{\sigma_3}$
2.6×10^{-3}	1.2×10^{-4}	3.4×10^{-5}

可见第二项和第三项都比第一项小得多。实际上可忽略不计。而由(7)式,经计算可知, $\Delta\sigma_2$ 主要由 $\sigma_1 \cdot \Delta\sigma_1$ 产生,其它项也小得可以忽略。又由(6), (2), (3)式可知 $\Delta\sigma_1$ 主要由 $\Delta\delta_1$ 产生,而 $\Delta\delta_2$ 和 $\Delta\delta_3$ 亦小得很多。再从像移量看, σ_2 和 σ_3 与 σ_1 相比差别甚微。因此可以得出结论,只要沿卫星飞行方向对因卫星飞行速度而产生的像移进行补偿,就可基本上消除像移对成像质量的影响。

综上所述,在相机设计时,考虑减小像移对成像质量的影响的主要途径有:

(1) 缩短曝光时间。这要求选感光度高的底片,但感光度高的底片分辨率低。因此选择底片时,两方面的因素要综合考虑。

(2) 提高快门的精度,降低曝光时间误差。

(3) 在像移补偿机构设计中,主要应考虑提高在曝光时间内,底片作补偿移动速度的精度。而偏流角误差影响并不大。

(4) 提高光学系统焦距的测量精度。同时要求光学系统校正畸变。因为有了畸变相当于随视场不同,焦距值不同,即产生焦距误差。

如果视场中心像移得到补偿,视场边缘像移就得不到补偿。实际上,焦距的相对误差即相对畸变即: $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta H}{H}$ 。为了算出由于畸变产生的像移对像质的影响,需计算出焦距误差 Δf 产生的像移。根据上面分析,只按下式求出近似值就足够了 $\Delta\delta = \frac{V}{H} \cdot \Delta f \cdot t$ 。取畸变为 1%,则得出 $\Delta\delta = 0.0028$ 。由此算出 $M = 0.88$ 。为了校正畸变,给光学设计增加了难度。

此外,对和相机无关的其它误差如卫星飞行速度,轨道高度等的测量精度也应提高要求。

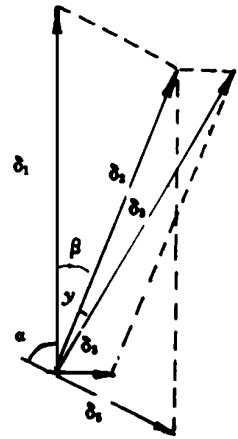


Fig. 1 Vector compound schema of image motion

The Effect of Image Motion on the Quality of the Images Formed for the Satellite Photography

Shi Guanghui

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper quantitatively analyses the quality of the images formed for the satellite photography due to image motion which caused by speed of flight, posture variety of the satellite and by rotation of the earth.

Keywords: Image motion, Satellite photography

史光辉 男, 1935年出生, 1961年毕业于哈尔滨工业大学光学仪器专业。一直在长春光机所从事光学设计工作, 现职务研究员。