

卫星摄影地面分辨率的预估

史光辉 崔庆丰

摘要: 把通过卫星摄影获取地面信息的过程看作一个系统, 分析了系统各个环节对地面信息的影响。得出了各个环节传递函数的数量概念。由此可以在给定条件下估计卫星摄影的地面分辨率。

一、引 言

对卫星摄影相机最重要的指标要求是地面分辨率。光学系统参数的选择, 相机的体积、重量以及对光、机、电各部分的质量指标和精度要求, 最终都和地面分辨率有关。因此在相机设计的初始阶段, 综合影响地面分辨率各方面因素, 作出对地面分辨率的估算, 对整个相机工程具有重要意义。

据报导, 美国“大鸟”卫星相机的焦距为2.44m, 卫星轨道高度为160km, 地面分辨率达到0.3m。光学系统采用卡塞格林式。下面我们就依此为例, 用传递函数观点来讨论地面分辨问题, 看这一指标是否可能?

轨道高度160km, 地面分辨率为0.3m, 要求相机的分辨角为 $0.3/160000 = 1.875 \times 10^{-6}$ rad。与此对应的相机光学系统的特征频率为 $\nu = 1/(1.875 \times 10^{-6} \times 2440) = 218.6 \approx 220$ 对线/毫米。

我们选用美国Kodak公司生产的分辨率最高的航空胶片EK3414。据产品说明书介绍, 根据照度要求, 光学系统的 F 数 $F^* = 4$ 。曝光时间为 $\frac{1}{250}$ 秒。设卡塞格林系统的中心遮拦为1/3。则光学系统的 F 数为:

$$F^* = 4 \times \sqrt{1 - (1/3)^2} = 3.8$$

另据不同资料介绍, 反差为1000:1时的分辨率为630~800对线/毫米。1.6:1时的分辨率为250对线/毫米。我们还知道频率为110对线/毫米时的传递函数 $MTF = 0.65 \sim 0.8$ 。

二、影响地面分辨率的因素

由卫星相机获取的地面目标的影像最终是由人眼来识别和判读的。由地面目标到影像进入人的眼睛这一光学串见图1。

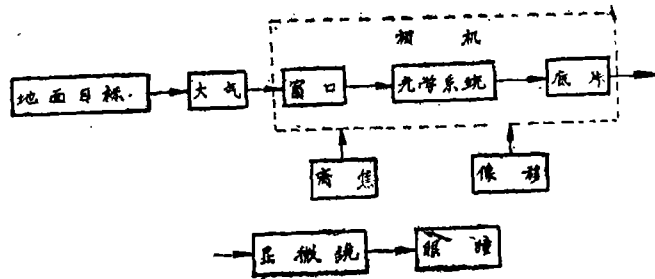


图1 光学串方块图

下面分别讨论各环节对地面分辨率的影响。

1. 大气的影晌

分两类，一类是由于大气中的微粒散射作用致使目标对比降低。对比的定义为（图2）

$$C = \frac{\text{最大} - \text{最小}}{\text{最小}} = \frac{\text{最大}}{\text{最小}} - 1$$

并定义：

$$\bar{C} = \frac{\text{最大}}{\text{最小}}$$

为对比度。地面目标多为低对比的。我们取4:1。这是常见的地面目标的对比度。相应的对比 $C_0 = 3$ 。目标对比在平行于海平面的大气中经过R公里后对比为

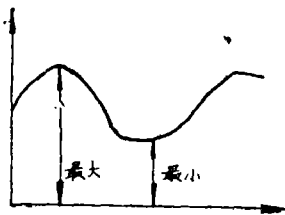


图2

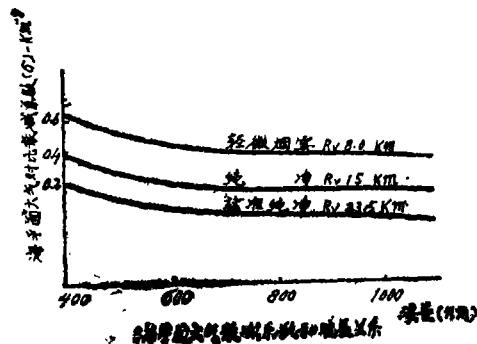


图3 海平面大气衰减系数和波长关系

$$C_R = C_0 \cdot \exp[-\sigma \cdot R] \tag{1}$$

σ 为大气衰减系数，图3为不同大气条件下， σ 和波长的关系^[1]。由曲线可知，短波部分的衰减系数随波长变短增加很快。而且由于短波具有强烈的散射作用，因此容易产生杂光、所以、空间对地摄影都将短波去掉，而取波段为0.5—0.7 μm ，其中间波长为0.6 μm ，由图可知，对于纯净大气，该波长对应的 σ 值为0.23。

但是在与海平面垂直的方向上，随着高度的增加，大气透明度逐渐增加，在纯净大气中，当高度达到7.62km时，透过大气观察地面目标的对比就不再降低了，这时有关系：

$$\sigma_{H=7.62\text{km}} = 0.2\sigma \tag{2}$$

所以轨道高度为160km时，地面目标的对比度变为，

$$C_R = 3 \cdot \exp[-0.2 \times 0.23 \times 7.62] = 2.11 \tag{3}$$

$$\bar{C}_R = 2.11 + 1 = 3.11 \quad (4)$$

由此得到经过大气后，地面目标的调制度为

$$M_{\text{目标}} \cdot M_{\text{大气}} = \frac{\bar{C}_R - 1}{\bar{C}_R + 1} = \frac{3.11 - 1}{3.11 + 1} = 0.51 \quad (5)$$

另一类大气影响是大气抖动。其原因是由于大气中各处的温度和气压不均匀使大气产生了对流作用，从而导致大气中折射率的分布呈不均匀状态，而且随时间变化，对流层只有十公里厚，对流作用比较强烈的离地面也只有 0.5 公里。折射率的不均匀会使来自地面一点光源发出的球面波经过大气后进入光学系统的波面产生变形。这种变形显然和卫星轨道高度，光学系统口径，在大气中光锥截面的大小以及曝光时间有关，现光学系统入瞳口径为 640mm，相应的在大气中光锥截面直径为 40mm（大气厚 10km）和 2mm（大气厚 0.5km）。因此在很短的曝光时间（1/250s）内，在这么小的范围内，大气折射率的不均匀性是微不足道的。所以可以认为在此微小的立体角内光线光程差的差别是可以忽略不计的。因而进入光学系统的波面变形也就可以忽略不计了。

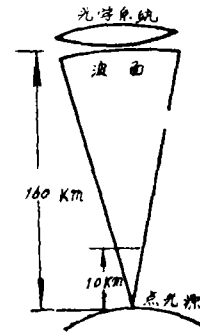


图 4

也可以用光学设计的常识来解释，由宇宙高空观察地球表面，大气层相当于贴在在物面上的一块平行表面玻璃板。而这样一块玻璃的折射率不均匀性对像质的影响是可忽略不计的。

文献^[2]明确地作出结论，在 100km 以上高空对地面摄影，大气抖动的影响是可以不考虑的。

2. 窗口玻璃的影响

相机的窗口玻璃和光学系统其他单元不同，它受到窗内外很大的温差和气压差的影响，会产生严重的变形和引起折射率不均匀变化，因而会严重的影响像质。此外，它不参加光学系统成像，因此可作为一个独立的单元，单独考虑 *MTF*。可以用特殊的安装方法和采用表面镀导电膜及镜框周围加温等办法来减轻这一影响。在采取了这些措施后，我们规定允许窗口玻璃产生的最大波差为 $\lambda/4$ 。可以认定由窗口玻璃的影响产生的能量弥散呈高斯分布，因此可用公式^[3]

$$M_{\text{窗口}} = \exp [-2 \cdot \pi^2 \cdot \delta^2 \cdot \nu^2] \quad (6)$$

δ 为垂轴像差 *RMS* 值。可由下式：

$$D = 1 - 4\pi^2 w^2$$

计算出波差 *RMS* 值 w 。D 为有像差时弥散斑中心点亮度和无像差时的中心点亮度之比。波差为 $\lambda/4$ 时，该比值为 0.8。由此计算出 $w = 0.07\lambda$ 。与对应的横向几何像差为 0.00065。于是

$$M_{\text{窗口}} = \exp [-2 \times \pi^2 \times 0.00065^2 \times 220^2] = 0.67 \quad (7)$$

3. 光学系统的影响

光学系统的截止频率为

$$\nu_{\text{截}} = 1/\lambda \cdot F = 1/0.0006 \times 3.8 = 438.6 \text{ (对线/毫米)} \quad (8)$$

则规范化频率为:

$$\nu_{\text{规}} = \frac{220}{438.6} = 0.5 \quad (9)$$

则光学系统理想的 MTF 为:

$$\begin{aligned} M_{\text{理}} &= \frac{\pi}{2} [\text{arc cos} 0.5 - 0.5 \sin(\text{arc cos} 0.5)] \\ &= 0.39 \end{aligned} \quad (10)$$

如图 5, 根据自相关法, 有中心遮拦时, $\nu_{\text{规}} = 0.5$ 的 MTF 为两光瞳错开 1 (将光瞳半径规范化为 1) 时, 两光瞳公共部分的透光面积 (不包括遮拦部分) 除以光瞳的透光面积。据此可计算出有中心遮拦时的 MTF 下降。这一计算很复杂, 但有表可查^[4]。 $M_{\text{遮}} = 0.836$ 。允许光学设计的为 MTF 下为 $M_{\text{设}} = 0.8$ (大约相当于波差小于 $\lambda/4$)。而光学加工产生的 MTF 下降可由下式计算, 允许产生的弥散同半径 $R = 0.002$, (相当于 $\lambda/4$) 则^[5]

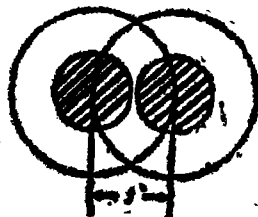


图 5

$$M_{\text{加工}} = 1 - R \cdot \nu = 0.56 \quad (11)$$

于是光学系统产生的总的 MTF 为

$$\begin{aligned} M_{\text{光学}} &= M_{\text{理}} \cdot M_{\text{遮}} \cdot M_{\text{设}} \cdot M_{\text{加工}} \\ &= 0.15 \end{aligned} \quad (12)$$

4. 底片的影响

根据经验公式^[6]

$$M = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi\nu}{a}\right)^2} \quad (13)$$

可计算出底片的传递函数 M , 前面提到。已知 110 对线/毫米的 MTF 为 0.65, 据此可求出和底片性质有关的系数 $a = 942$ 。然后可求出 220 对线/毫米的 MTF

$$M_{\text{底片}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 220}{942}\right)^2} = 0.34 \quad (14)$$

5. 离焦的影响

由于温度和气压的变化, 会引起玻璃和空气折射率的变化。假设温度是均匀分布的, 则其影响主要是像面离焦。为减小温度的影响, 在设计时, 反射镜要选用低膨胀系数玻璃。镜筒要选用低膨胀系数金属材料。此外, 还要施以温度控制和气压控制以及加调焦机构。采用这些措施后, 我们规定允许的剩余的离焦量为 $\Delta = 0.008\text{mm}$ (相当于 $\lambda/8$)。计算由于离焦产生的 MTF 下降有公式^[7]

$$\begin{aligned} M_{\text{离焦}} &= \frac{2J_1(x)}{x} \\ x &= \frac{\pi \cdot \Delta \cdot \nu}{F^*} (1 - \nu \cdot \lambda \cdot F^*) \end{aligned} \quad (15)$$

$J_1(x)$ 为一阶贝塞尔函数。于是

$$x = \frac{\pi \cdot 0.0008 \cdot 220}{3.8} (1 - 220 \times 0.0006 \times 3.8)$$

$$= 0.81 \quad (16)$$

$$M_{\text{离焦}} = \frac{2J_1(0.81)}{0.81}$$

$$= 0.92 \quad (17)$$

温度呈不均匀分布,对像差影响大。但由于负担大部分光焦度的反射镜采用了低膨胀系数玻璃,而折射透镜为无光焦度或有很小的光焦度,以及采取使空气产生对流等措施,温度不均匀的影响是可以忽略不计的。

6. 像移的影响

产生像移的因素很多,主要因素是由于卫星的飞行运动使影像在曝光时间内相对底片有一个位移,采用速高比计和像移补偿机构可以补偿,但不能完全补偿。地球的自转也会产生像移,这种像移随卫星所在的纬度增加而减小,它可用卫星的转动作实时修正加以补偿,但也不会完全补偿;其他还有卫星姿态变化以及卫星舱内的机械振动等原因也产生像移。据有关资料、经计算得出,这些像移的 *RMS* 值

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} = 0.0009 \text{ (mm)} \quad (18)$$

可以认为,综合这些像移在像面产生的能量的弥散分布为高斯分布。因此:

$$M_{\text{像移}} = \exp[-2 \cdot \pi^2 \cdot \delta^2 \cdot \nu^2]$$

$$= \exp[-2 \cdot \pi^2 \times 0.0009^2 \times 220^2]$$

$$= 0.83 \quad (19)$$

7. 判读的影响

目标在底片上的影像要经过判读设备来判读。我们假定用显微镜来判读,则显微镜的质量也会降低目标影像的调制度,我们设:

$$M_{\text{判读}} \geq 0.7$$

即要求显微镜光学系统在频率为220对线/毫米时的 *MTF* 要等于或大于0.7。下面讨论这个值是否合适。

MTF = 0.7 对应的归化频率0.238,则要求系统的截止频率为 $220/0.238 \approx 924$ 对线/毫米。光学系统的数值孔径为 $NA = 0.5 \times 0.0006 \times 924 = 0.28$ 。人眼观察感到舒服的频率应小于8周度。(相当于对人眼张角为 $7.5'$)。其线宽为: $250 \times 0.0175/8 = 0.5469$ mm。因此要求光学系统的放大率为 $0.5469 \times 220 = 120$ 倍。仪器的出瞳为 $2 \times 0.28 \times 250/120 = 1.2$ mm。在这一范围内,人眼产生的像差,对分辨影响很小,因此取 $M_{\text{判读}} = 0.7$ 是合适的。

三、可能性判断

求出光学串各环节的传递函数后,我们就可以求出目标在底片上影像的调制度,即对比为4:1、相距为0.3m的地面目标经过大气传输、光学系统、底片、最后经过显微镜判读,送入人眼瞳的影像调制度为:

$$\begin{aligned}
M_{\text{眼瞳}} &= M_{\text{目标}} \cdot M_{\text{大气}} \cdot M_{\text{窗口}} \cdot M_{\text{光学}} \cdot M_{\text{离焦}} \cdot M_{\text{像移}} \cdot M_{\text{判读}} \\
&= 0.51 \times 0.67 \times 0.15 \times 0.34 \times 0.81 \times 0.83 \times 0.7 \\
&= 0.0078
\end{aligned}$$

调制度为0.0078的影像是否能分辨，这和人眼的特性有关。图7为人眼相对不同频率，不同视网膜照度条件下，所能分辨的调制度^[8]，从图中最下面一条曲线可知，频率为8周/度对应的调制度为0.003。 $M_{\text{眼瞳}} = 0.0078$ 为它的2.6倍。而人眼能较舒服地分辨的亮度差为2%。相应的调制度为0.01，这和0.0078很接近。因此我们可以得出结论。卫星轨道高度为160km，相机焦距为2.44m，对低对比目标（4：1），地面分辨率有可能达到0.3m。而对高对比目标，如20：1，经计算得 $M_{\text{眼瞳}} = 0.015$ 。这更是可能的了。

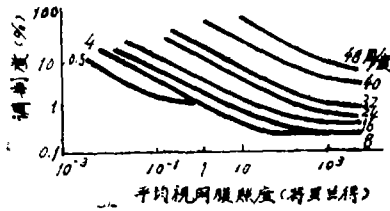


图6

参 考 文 献

- [1] B. Mathews, SPIE, 424, 1983, p39
- [2] A. Consortini, Space Optics, 1973, p490
- [3] 麦伟麟,《光学传递函数及其理论基础》,国际工业出版社,1979年
- [4] B. Mathews, SPIE, 424, 1983, p67
- [5] R. Hwight, SPIE 424, 1983, p150
- [6] 李俭白,《光学系统成像质量及检验文集》,中国计量出版社,1988年,86页

Ground Resolution Prediction by Satellite Photography

Shi Guanghui Cui Qingfeng

Abstract

Regarding the process of acquiring information from the earth by satellite photography as a system the effects of all factors in the system have been analyzed and the transfer functions have been introduced. Therefore the ground resolution can be predicted under the given conditions.