

多光谱摄影机底片灰标密度的辐射标定的

崔敦杰 任建伟 禹秉熙

摘要: 为了在DGP—II A型多光谱相机4个波段底片灰标的密度和所拍摄的地物辐亮度之间建立定量关系, 自制并标定了相应于该相机4个波段的简易辐亮度计, 用相机拍摄地标的同时, 用辐亮度计测量地标的各波段辐亮度, 在考虑底片光谱响应和滤光片透过率的情况下, 算出了与底片密度对应的地标的辐亮度, 因而标定了底片的灰标。

一、引言

DGP—II A型多光谱相机是大型航空遥感仪器, 它的红、绿、蓝和红外4个通道滤光片的光谱透过率如图1所示。

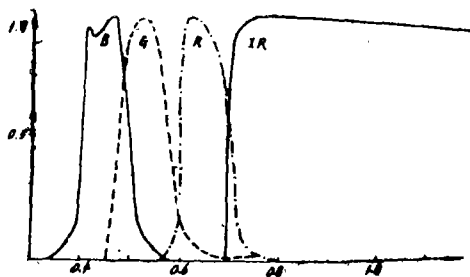


图1 红外、红、绿、蓝滤光片相对光谱透过比

目前在红、绿、蓝3个通道上多使用航微1全色黑白胶片, 在红外通道使用红外胶片, 它们的相对光谱响应如图2所示。

为了标定各波段摄影胶片密度的辐射量值, DGP—II A型多光谱相机各通道上都设有如图3所示的密度等级拍摄装置, 用氙闪光灯和10级特定的光楔, 在底片上可以产生10个密度不同的灰阶。它和地物拍摄在同一张底片上, 因此能够提供与冲洗条件无关的参考辐射等级。但是它与地物的辐亮度之间还没有建立直接的关系, 因而需要用辐亮度计在相机拍摄的同时测定地物的辐亮度, 用来建立地物辐亮度与相机底片密度之间的关系。我们利用与多光谱相机各通道滤光片相同的四种滤光片和硅光电池组装了一组多光谱辐亮度计, 并用绝对辐射计组装成各相应波段上的绝对辐亮度计, 在天然昼光下标定这组多光谱辐亮度计。在昼光下对反射率不同的灰色地标进行多光谱摄影, 同时用多光谱辐亮度计测出各通道上地标的辐亮

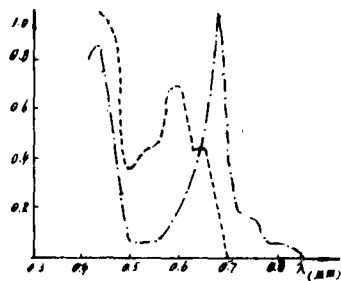


图2 胶片相对光谱灵敏度
 - - - 红外 — — — 航微

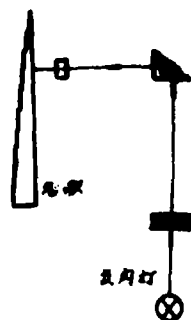


图3 确定底片密度等级的拍摄装置

度。冲洗胶片后比较画幅上地标影像的密度和摄影时用氙闪光灯打在画幅上的10级灰标密度，就建立了灰阶密度等级和地物辐亮度之间的关系，完成了影像底片密度的辐射标定。

氙灯与平均昼光的相对光谱存有差异，但在图4所示的窄通带内可以忽略两者的差异。

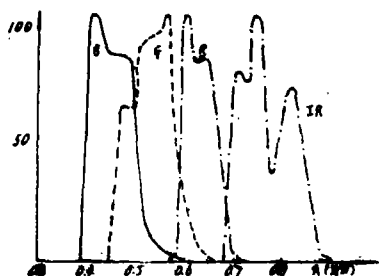


图4 滤光片与底片配合使用的相对光谱响应曲线

二、标定方法

1. 多光谱辐亮度计的组成

(1) 相对光谱灵敏度的匹配

选择探测器和滤光片，使多光谱辐亮度计的相对光谱灵敏度与图4所示的各通道响应曲线相接近，然后通过适当的修正满足标定的要求。

我们用硅光电池作为探测器，其相对灵敏度曲线如图5(a)实线所示（生产厂家提供的数据）。在红、绿、蓝三个通道上用隔热玻璃抑制红外辐射，用虚线表示了其相对透射比。用多光谱摄影中使用的红、绿、蓝滤光片分别装在装有隔热玻璃的硅光电池前面，就成为三个通道的辐亮度计，用红外滤光片装在硅光电池前，成为红外通道的辐亮度计，它们的相对光谱曲线如图5(b)所示。比较图4和图5(b)就可以看出，在红、绿、蓝三个通道上多光谱摄影中的相对光谱响应和我们组装的多光谱辐亮度计的相对光谱灵敏度基本相似，但在红外通道上相差较大。我们利用昼光光谱数据^[1]，在各通道上用图4所示的多光谱摄影相对光谱响应进行加权积分，又用我们组装的多光谱辐亮度计相对光谱灵敏度进行加权积分，比较了所得到的两

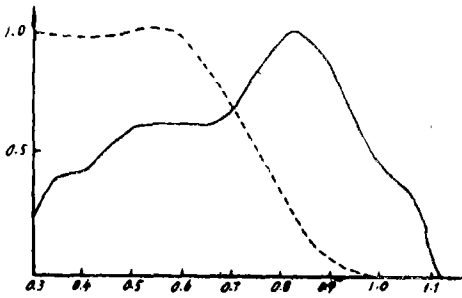


图5(a) ——硅光电池相对光谱灵敏度
 ---隔热玻璃相对光谱透过比

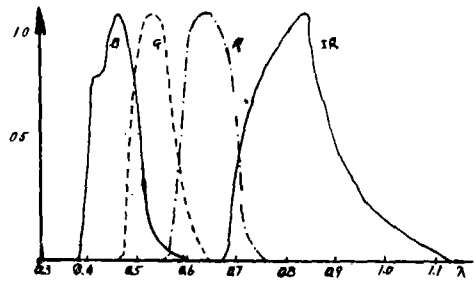


图5(b) 硅光电池加滤光片后
 相对光谱曲线

组数据，其结果在红、绿、蓝和红外各通道上的比值分别是 $\alpha_r = 1:1.11$, $\alpha_g = 1:1.096$, $\alpha_b = 1:1.17$, $\alpha_{ir} = 1:1.43$ 。可以利用这些比值，对标定结果进行修正，在某种程度上能够补偿辐亮度计和多光谱摄影在光谱上的不匹配。

(2) 辐亮度计的结构

如图6所示，用面积较大而灵敏度均匀的探测器，在其前面放置两块圆孔光栏，就可以构成简易的辐亮度计。当亮度均匀的大面积地物充满视场时，在探测器上的辐照度与地物辐亮度之间只差一个与亮度计几何尺寸有关的因子^[2]。图6中的视场角为 30° ，探测器为日产S639B硅光电池，直径为20mm，探测器后面的电阻为1K Ω ，在辐亮度计的筒内涂有黑漆。

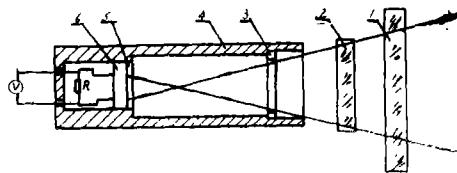


图6 简易辐亮度计结构图

1—波带滤光片 2—隔热玻璃 3、5—视场光栏 4—机壳 6—探测器

(3) 硅光电池的线性问题

我们检查了装成辐亮度计的硅光电池的输出信号和辐亮度之间的线性关系。在实际测量的辐亮度水平上检查了线性，结果在红、绿、蓝三个通道上其线性保持在1%以内，但在红外通道上，由于滤光片的带宽较宽，硅光电池的输出超出线性范围，因此在红外通道用中性金属网格进行减光，使之在线性范围内工作，计算结果时再将网格的透射比考虑在内。

2. 用绝对辐射计标定多光谱辐亮度计

(1) 绝对辐射计光谱响应的匹配

为了标定多光谱辐亮度计的绝对灵敏度，我们用电补偿式绝对辐射计。用红、绿、蓝滤光片加上隔热玻璃组成三组滤光片，分别加到绝对辐射计上，就构成简易的多光谱辐照度计。这时各通道上的相对光谱灵敏度示于图7。在组装红外通道辐照度计时，因为找不出红外截止滤光片，只好利用不同起始波长的红外前截止滤光片进行测量，然后求出差值，得出窄带下的红外辐照度值。它们的光谱透过率示于图8。利用昼光光谱分布数据，在各通道上

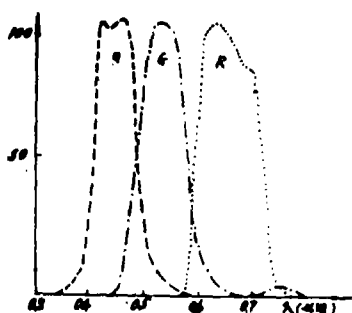


图7 绝对辐照度计各通道的相对光谱灵敏度

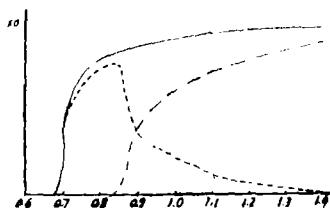


图8 ——, ---两种红外滤光片光谱透过比
- - - 两曲线的差值

用图5(b)所示的辐亮度计相对光谱灵敏度和图7、8所示的辐照度计相对光谱灵敏度, 求出各波段加权积分值的比值, 分别为 $\beta_r = 1:0.980$, $\beta_g = 1:1.02$, $\beta_b = 1:1.035$, $\beta_{ir} = 1:1.701$ 。

在昼光下用绝对辐照度计标定辐亮度计时, 用这些值乘上所得的辐亮度值, 则在某种程度上能够补偿两种相对光谱灵敏度不匹配的问题。

用绝对辐照度计进行辐照度测量时, 要用各通道滤光片的峰值绝对透射比除所测得的值, 才能得出该通道的绝对辐照度值。绝对辐射计在我们使用的照度水平上线性很好, 不用考虑非线性问题。

(2) 多光谱辐亮度计的标定

在标定辐亮度计时, 我们用1m见方的氧化镁白板作为二次光源, 在昼光下用绝对辐照度计对准天空(包括太阳直射光部分)测出白板上面的辐照度 E_i , 然后算出白板的辐亮度作为标准, 亦即

$$L_i = \frac{\rho_i}{\pi} E_i \quad (1)$$

其中 L_i 是 i 波段上白板上面的辐亮度, 而且假定白板是完全漫反射体。

昼光是直射阳光和天空散射光的综合结果, 它分布在整个半球空间, 而绝对辐照度计的视场角远小于 180° 。为了补偿入射光的这种空间分布上的差异, 我们在红、绿、蓝三个通道上用照度计(带有余弦修正接收器)测出昼光(直射阳光加天空光)和天空光(挡住直射阳光), 算出两者的比值, 然后按同样的方法用绝对辐射计测出直射阳光部分, 再乘上上述比值, 得出昼光在白板上的辐照度。

对红外波段来讲, 因为天空散射光中的红外辐射很低, 就用“直射阳光加部分天空光”作为昼光来进行标定。用公式表示时,

$$E_i = \frac{E_i(\text{昼})}{E_i(\text{昼}) - E_i(\text{天})} \cdot [E_i(\text{直射} + \text{部分天空}) - E_i(\text{部分天空})] \quad (2)$$

式中 $E_i(\text{昼})$ 为昼光照度值, $E_i(\text{天})$ 为天空光照度值, $E_i(\text{直射} + \text{部分天空})$ 为绝对辐照度计测得的昼光辐照度值, $E_i(\text{部分天空})$ 为挡住太阳时绝对辐照度计测出的辐照度。结合前几节的讨论, 对胶片起作用的辐亮度值定义为

$$L^*_i = \frac{1}{\alpha_i \beta_i} \cdot \frac{1}{\tau_{i_{max}}} \cdot L_i \quad (3)$$

其中 α_i, β_i 是在前几节中叙述的波段修正系数, $\tau_{i_{max}}$ 是各波段滤光片的绝对透过比的峰值。

在同样的条件下, 我们用多光谱辐亮度计对准白板, 读出各通道硅光电池的输出电流 I_i , 就测得了各通道的响应度 R^*_i :

$$R^*_i = L^*_i / I_i \quad (4)$$

3. 对地标的多光谱摄影和底片密度的辐射标定

为了对多光谱摄影底片密度进行辐射标定, 我们选晴朗天气在地面上平铺三块灰色地标, 每块大小为 $6 \times 8m^2$, 标称反射率分别为16%, 32%, 64%, 进行拍摄时用上述已标定好绝对灵敏度的多光谱辐亮度计测出各波段的辐亮度 L_i^* 。

离地大约30m处拍摄地物, 控制曝光量和冲洗条件, 使三块地标像的光学密度尽可能都处于宽容度以内。

在相机内确定底片密度等级的拍摄装置中, 假设光束经过某一级光楔 M , 在底片上产生密度 D'_M , 这时

$$D_{M'} = \gamma \lg H_{M'} + D_0 \quad (5)$$

其中 D_0 为底片的灰雾度, $H_{M'}$ 为底片的曝光量, γ 为底片的反差系数。

当相机对反射比为 ρ 的地标进行拍摄时, 经冲洗后在底片上产生一影像密度 D_ρ , 这时有

$$D_\rho = \gamma \lg H_\rho + D_0 \quad (6)$$

因为影像和灰阶同在一个画幅内, 冲洗条件相同, 当 $D_\rho = D_{M'}$ 时, 有

$$H_\rho = H_{M'} \quad (7)$$

H_ρ 和 $H_{M'}$ 可表示为 $H_\rho = K(D/f, t)$, $H_{M'} = T_M K'(D'/f', t')$, 其中 $K(D/f, t)$, $K'(D'/f', t')$ 分别是与相对孔径和曝光时间有关的常数, E_ρ 和 $E_{M'}$ 分别是胶片对反射比为 ρ 的地物辐射量的响应和对经过 M 级光楔的闪光光源辐射量的响应, T_M 为第 M 级光楔的透过率。因此, 由(7)式有

$$\frac{T_M K'(D'/f', t')}{K(D/f, t)} = \frac{E_\rho}{E_{M'}} = \frac{L^*_\rho}{L^*_{M'}} \quad (8)$$

因而可写成

$$L^*_{M'} = \frac{K(D/f, t)}{T_M K'(D'/f', t')} \cdot L^*_\rho \quad (9)$$

当标定条件选定之后, $K(D/f, t)/K'(D'/f', t')$ 是一定的, 因而对 j 级光楔来说, 有

$$L^*_j = \frac{T_j}{T_M} L^*_{M'} = \frac{T_j}{T_M} L^*_\rho \quad (10)$$

式中 T_j 是第 j 级光楔的透过比。用这一关系式, 我们可以标定出一固定曝光条件下任一幅图像的底片密度和辐亮度的关系曲线。

得到标定条件下的密度—辐亮度关系曲线之后, 可根据下述的关系式得出其他曝光条件下的底片密度与辐亮度关系曲线:

$$L^*_j = \frac{t^*}{t} \left[\frac{D^*/f^*}{D/f} \right] \cdot \frac{T_j}{T_M} L^*_\rho \quad (11)$$

式中 $t^*, D^*/f^*$ 分别为 H^* 曝光条件下的曝光时间和相对孔径, $t, D/f$ 为标定条件下的曝光时间和相对孔径。

4. 结果

(1) 多光谱辐亮度计的标定结果

如上所述, 用自己组装的多光谱辐照度计, 在昼光下标定多光谱辐亮度计, 而且用昼光数据和滤光片的透过率以及硅光电池的光谱灵敏度数据计算出各修正量, 结果如表 1。

表 1 各通道上的修正系数、滤光片透过率、 L_i 测得值、经修正后的 L_i^* 值、各波段辐亮度响应度

	蓝(1*)	绿(2*)	红(3*)	红外(4*)
α_i	1.17	1.10	1.11	1.43
β_i	1.04	1.02	0.98	1.70
$\tau_{i \max}$	0.730	0.655	0.625	0.860
L_i ($\text{mWsr}^{-1}\text{cm}^{-2}$)	4.13	3.39	3.02	5.17
L_i^* ($\text{mWsr}^{-1}\text{cm}^{-2}$)	4.44	5.22	4.31	2.49
R_i^* ($\text{mWsr}^{-1}\text{cm}^{-2}$ / mV)	5.51×10^{-2}	5.37×10^{-2}	7.25×10^{-2}	3.44×10^{-3}

考虑到各方面因素的影响, 估计在可见区三个波段标定的不确定度在 $\pm 15\%$ 以内, 在红外波段的不确定度在 20% 以内。因为多光谱摄影和冲洗等过程中各种不确定因素较大, 这一结果基本上满足辐射标定的要求。

(2) 底片密度与辐亮度关系曲线

测出底片上灰阶的密度, 建立纵坐标 D 轴, 根据底片各级灰阶对应于光楔的号数建立横坐标 N 轴。将与 4 个坐标轴 (4 个通道) 对应的 4 个光楔各级的透射比代入 (10) 式中。式中 L_{0i}^* 是标定值, 取 L_{0i}^* 的原则是尽量让与 L_{0i}^* 对应的密度值位于 $D \sim \lg H$ 曲线的线性范围的中部。4 个通道的辐亮度值分别是

$$\begin{aligned} L_{0 \text{ 蓝}}^* &= 0.507 \quad \text{mWsr}^{-1}\text{cm}^{-2}, \\ L_{0 \text{ 绿}}^* &= 1.245 \quad \text{mWsr}^{-1}\text{cm}^{-2} \\ L_{0 \text{ 红}}^* &= 0.645 \quad \text{mWsr}^{-1}\text{cm}^{-2} \\ L_{0 \text{ 红外}}^* &= 0.593 \quad \text{mWsr}^{-1}\text{cm}^{-2} \end{aligned}$$

图 9 是标定条件下的 $D \sim \lg H(N)$ 曲线。可根据这组曲线的的数据, 应用 (11) 式, 计算出其他曝光条件下的 $D \sim \lg H$ 数据, 并画出曲线。表 2 列出了 4 个通道上的各灰阶号数 N 与光束经过灰阶后在像面上产生的辐亮度 L_i^* 的对应关系。

表 2 N 与 L_i^* 的对应关系

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	单 位
波 段											
B		0.12	0.21	0.29	0.36	0.44	0.51				$\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
G		0.49	0.70	1.06	1.33	1.73	1.94	2.30			$\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
R		0.038	0.31	0.44	0.54	0.68	0.80	0.94			$\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
IR			0.65	0.93	1.18	1.58	1.70				$\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$

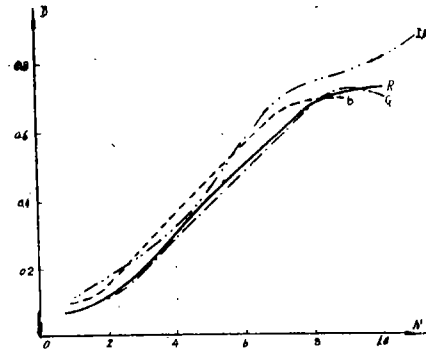


图 9

1—B波段 2—G波段 3—R波段 4—IR波段

三、结 束 语

多光谱摄影底片密度的辐射标定是一项麻烦而困难的工作，其原因是多方面的：底片的光谱响应变化较大；底片密度与冲洗条件有关；不容易用光电传感器和滤光片匹配成与各通道底片光谱响应相似的辐亮度计；参考灰阶拍摄光源的不稳定性；该光源的光谱特性与昼光的差异……等等。我们用各通道滤光片和硅光电池组装多光谱辐亮度计，又用绝对辐射计和各通道滤光片组装绝对辐照度计，在昼光条件下标定出辐亮度计的绝对灵敏度，然后在昼光下对地标进行多光谱摄影，同时测出地标的辐亮度，冲洗底片后比较地物密度和底片参考灰阶的等级，经过一系列修正后，完成了底片密度的辐射标定，基本上满足了标定的要求。

参加本实验的还有陈淑芳、梁芳等同志，在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] E.R.Dixon; J.O.S.A. 1978, 68, No. 4, 437
- [2] P.Moon D.E.Sponcer; «The Photic Field», (1981)

Radiant Calibration on the Gray Scale Density of Films in a Multispectral Band Camera

Cui Dunjie Ren Jianwei Yu Bingxi

Abstract

In order to establish a quantitative relationship between the gray scale density of films in model DGP—II A multispectral band camera and the radiance of terrain subjects imaged on the film, we fabricated and calibrated a group of simple radiance-meters corresponding to the 4-spectral bands of the camera. When taking the photographs of the standard ground subjects, we at the same time measured their radiations for each band by means of the radiance-meters, then calculated the radiance of the ground subjects corresponding to the film density and calibrated the gray scale of the films with considerations of the spectral response of the films and the transmittance of the filters.