

文章编号 1004-924X(2006)05-0822-07

成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度

李幼平^{1,3}, 禹秉熙², 王玉鹏^{2,3}, 方 伟²

(1. 北京市地理信息研究所, 北京 100011; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:分析了成像光谱仪遥感观测数据中包含的地物光谱特征、仪器参数和大气传输特性等的信息结构。研究了成像光谱仪辐射定标的物理过程和测量链,应用1993年国际标准化组织(ISO)颁布的《测量不确定度表示指南》,分析了辐射定标11项影响量的测量不确定度和合成标准不确定度。遥感辐射定标的绝对精度就是不确定度。辐射定标需要辐射标准、积分球光源、光谱辐射计以及遥感器上设置星上定标装置等专用设备和技术,并经过多级测量链的测试过程才能完成。光谱辐照度标准的不确定度在3%~5%,辐射定标中其它影响量的测量不确定度限制在1%~2%,成像光谱仪辐射定标的绝对精度才能达到5%~8%,这需要相当好的仪器设备和光辐射测试技术。

关键词:光学计量与测量;辐射定标;不确定度;精度;成像光谱仪

中图分类号:TP73 **文献标识码:**A

Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer

LI You-ping^{1,3}, YU Bing-xi², WANG Yu-peng^{2,3}, FANG Wei²

(1. *Beijing Institute of Geography Information, Beijing 100011, China*; 2. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, 130031 China*;
3. *Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing, 100039 China*)

Abstract: This paper analyses the information configuration in remote sensing observation data of imaging spectrometer, including the spectral character of ground surface, instrument parameter and atmosphere transmission and also discusses on the physical process and measurement chain of radiometric calibration of imaging spectrometer. Then according to the international updated method of ISO1993(E) *Express Guide of Measurement Uncertainty*, the measurement uncertainty and combined standard uncertainty of eleven influence quantities of radiometric calibration are analyzed by the special equipment such as radiation standard, light source of integral sphere, spectroradiometer and in-flight calibration sets and so on. To accomplish the radiometric calibration, the measurement process of multi-measurement chain is set up. Experimental results show that the radiometric calibration of the imaging spectrometer requires special advanced equipment and technique. To reach the absolute accu-

收稿日期:2006-02-22;修订日期:2006-07-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60174032)

racy of 5%~8%, the uncertainty of standard spectral irradiance must be 3%~5% and the measurement uncertainty of the other influence quantity items must be limited within 1%~2%.

Key words: optical metrology and measurement; radiometric calibration; uncertainty; precision; imaging spectrometer

1 引言

在可见到短波红外光谱范围(0.4~2.5 μm)工作的成像光谱仪的辐射定标,需要光谱辐射亮度标准、积分球大口径光源、光谱辐亮度计等仪器设备,还要在成像光谱仪中设置星上辐射定标光源装置,并且经过多级测量链的测试过程才能实现遥感对地观测数据的辐射定标。

光学成像遥感器的星上定标装置(只讨论0.4~2.5 μm 光谱范围的成像仪)是通过星载仪器上设置的光源及其投影系统,把它的光辐射引进遥感器的光路,照射遥感器成像面上的探测器件,使焦平面器件有输出信号响应。用星上辐射定标装置产生一个遥感器光瞳前的等效光谱辐亮度。

光学遥感器星上辐射定标装置有内定标和外定标两种,辐射定标用的光源有定标灯、积分球光源或太阳等自然界光源^[1-6]。

美国上世纪 80 年代末研制的机载可见红外成像光谱仪 AVIRIS 的绝对定标精度为 ≤10%^[7];中分辨率成像光谱辐射计 MODIS 的绝对定标精度为 ≤5%(0.4~2.5 μm)^[6],在 EO-1 卫星上 HyPerion 超光谱成像仪的绝对定标精度为 ≤6%^[8]。

本文分析了成像光谱仪遥感观测数据的信息

结构,研究了辐射定标物理过程和被测量—光谱辐射亮度定标的影响量及其测量链。根据 1993 年国际标准化组织(ISO)颁布的《测量不确定度表示指南》,研究了被测量在辐射定标中的影响量的数学模型与合成标准不确定度即绝对精度。

2 成像光谱仪数据的信息结构

成像光谱仪获取的光谱图像数据是地面二维(2D)空间和一维(1D)光谱(由波长上相邻接采样的超多波段窄带光谱通道提供)构成的三维(3D)图像立方体(Image Cube),其数据结构如图 1 所示。

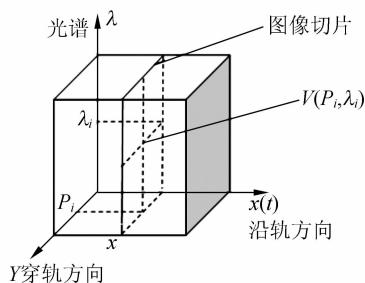


图 1 光谱图像立方体

Fig. 1 Spectral image cube

成像光谱仪焦平面器件采集的一帧光谱图像数据(图 1 中图像切片) $V(P_j, \lambda_i)$ 为一组 $m \times n$ 行列式矩阵:

$$[V(P_j, \lambda_i)] = \begin{bmatrix} V(P_1, \lambda_1), & \dots, & V(P_1, \lambda_i), & \dots, & V(P_1, \lambda_m) \\ V(P_2, \lambda_1), & \dots, & V(P_2, \lambda_i), & \dots, & V(P_2, \lambda_m) \\ \dots, & \dots, & \dots, & \dots, & \dots \\ V(P_j, \lambda_1), & \dots, & V(P_j, \lambda_i), & \dots, & V(P_j, \lambda_m) \\ \dots, & \dots, & \dots, & \dots, & \dots \\ V(P_n, \lambda_1), & \dots, & V(P_n, \lambda_i), & \dots, & V(P_n, \lambda_m) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

卫星遥感对地观测的物理过程如图 2 所示。

根据遥感对地观测信噪比(SNR)方程^[9],有

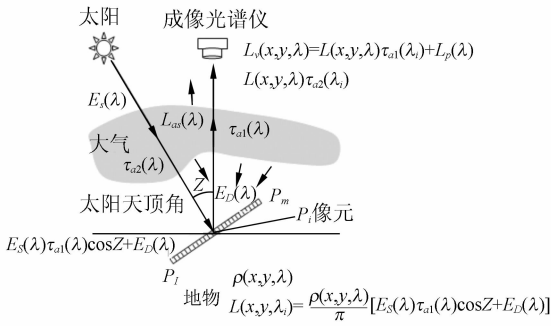


图 2 卫星遥感对地观测物理过程示意图

Fig. 2 Process of observing the ground from satellite remote sensing

$$\text{SNR} = \frac{V(P_j, \lambda_i)}{N_s}$$

$$\left\{ \frac{k_n(\alpha) \cos^n(\alpha) \pi A_d^{\frac{1}{2}} t_m^{\frac{1}{2}}}{4FN^2} \tau_0(\lambda) [L(x, y, \lambda_i) \tau_{a2}(\lambda_i) + L_p(\lambda_i)] + E_f(\lambda_i) \right\} D(\lambda) \Delta \lambda_i, \quad (2)$$

其中, $FN = f/D$ —光学系统焦比, f —焦距, D —光学孔径

A_d : 探测器像元面积

$K_N(\alpha)$: 渐晕系数, 它同视场角 α 和 FN 有关, 焦平面器件的不同像元 P_j 对应不同的视场角 α

$\cos^n \alpha$: $m = 2.5 \sim 4$ 像面照度随视场角 α 的 $\cos^4 \alpha$ 变化的更一般的表达式

$\tau_0(\lambda)$: 光学系统效率(透射率)

$\tau_{a1}(\lambda)$: 太阳—地物光程大气透射率

$\tau_{a2}(\lambda)$: 地物—遥感器光程大气透射率

$E_s(\lambda)$: 大气层外太阳光的光谱辐照度(常数)

$E_D(\lambda)$: 半球天空亮度在地面形成的辐照度

Z : 太阳天顶角

$\rho(x, y, \lambda)$: 地物反射率

N_s : 噪声信号 $E_f(\lambda)$: 仪器内部的杂散光在探测器像元上的辐照度, 杂散光具有光谱分布, 因此在探测器上照射产生的光电信号应该是对波长的积分

$$N_s \int E_f(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda$$

$L_p(\lambda)$: 大气散射程辐射度

t_m : 探测器积分时间

$D^*(\lambda)$: 探测器光谱探测率

$\Delta \lambda_i$: 各光谱通道的光谱带宽

成像光谱仪光瞳前的视辐射亮度 $L_V(x, y, \lambda)$ 为

$$L_V(x, y, \lambda_i) = L(x, y, \lambda_i) \tau_{a2}(\lambda_i) + L_p(\lambda_i) =$$

$$\frac{\rho(x, y, \lambda)}{\pi} [E_s(\lambda) \tau_{a1}(\lambda) \cos Z + E_D(\lambda)] \tau_{a2}(\lambda) + L_p(\lambda), \quad (3)$$

因此成像光谱仪原始数据可表示为

$$V(P_j, \lambda_i) =$$

$$k_n(\alpha) \cos^n(\alpha) \frac{\pi A_d^{\frac{1}{2}} t_m^{\frac{1}{2}}}{4FN^2} \tau_0(\lambda_i) D^*(\lambda) \Delta \lambda N_s L_v(P_j, \lambda_i) + N_s \int E_f(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

辐射定标的目的是从遥感观测的成像光谱仪数据 $V(P_j, \lambda)$ 获取地物光谱 $\rho(x, y, \lambda)$ 或 $L(x, y, \lambda)$ 的信息。

把上式(4)简写为

$$V(P_j, \lambda_i) = C(j, i) L_v(P_j, \lambda_i) + A(j, i), \quad (5)$$

式中 $C(j, i)$ 为辐射定标系数。 $A(j, i)$ 是同仪器内部杂散光有关的项, 同 $V(P_j, \lambda_i)$ 相比较一般很小。

辐射定标只能标定成像光谱仪光瞳前的视辐射亮度 $L_V(P_j, \lambda_i)$ 。

辐射定标就是用已知的标准辐亮度作为遥感器光瞳前视辐射亮度 $L_V(P_j, \lambda_i)$, 采集信号数据 $V(P_j, \lambda_i)$, 确定定标系数 $C(j, i)$ 和 $A(j, i)$ (为了讨论简便以后忽略 $A(j, i)$ 项)。

定标系数 $C(j, i)$ 是仪器参数的函数, 其中 $\tau_0(\lambda_i)$ 和 $D^*(\lambda)$ 、 N_s 等项还同工作环境有关。因此, 不仅在实验室用辐亮度标准光源进行辐射定标, 还要用遥感器上设置的星上定标光源, 在对地观测中进行定标。

从辐射定标后的遥感数据可获得遥感器光瞳前的视辐射亮度 $L_V(P_j, \lambda_i)$, 但还不能直接得到地物的光谱辐亮度 $L(x, y, \lambda)$ 或光谱反射率 $\rho(x, y, \lambda)$ 。若想从 $L_V(P_j, \lambda_i)$ 反演地物的光谱特征 $L(x, y, \lambda)$ 或 $\rho(x, y, \lambda)$ 则需要与大气传输特性有关的 $\tau_{a1}(\lambda)$ 、 $\tau_{a2}(\lambda)$ 、 $L_p(\lambda)$ 、 $E_D(\lambda)$ 、 Z 等参数, 或地面同步观测的有关光谱数据。从 $L_V(P_j, \lambda_i)$ 反演地物光谱 $L(x, y, \lambda)$ 或 $\rho(x, y, \lambda)$ 不是辐射定标的任务。

3 辐射定标影响量的测量链

成像光谱仪的辐射定标要经过用辐亮度标准定标积分球面光源的辐亮度; 然后用积分球辐亮度定标星上定标光源的有效辐亮度; 再用星上定标装置的有效辐亮度定标遥感观测数据等测试过

程的测量链。

图 3 表示了成像光谱仪辐射定标过程的全部测量链。

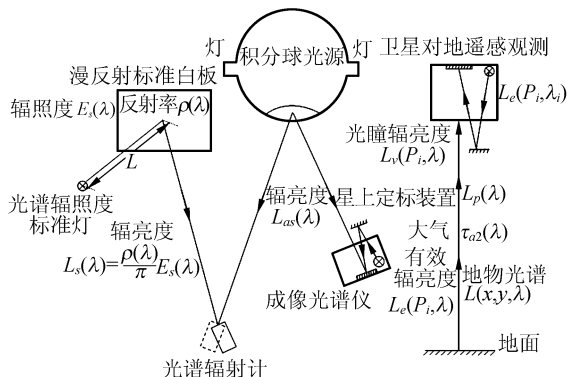


图 3 辐射定标测量链

Fig. 3 Measurement chain of radiometric calibration

3.1 辐射标准

遥感辐射定标用的光谱辐亮度标准是用光谱辐照度标准灯和漫反射标准白板导出的。

用光谱辐照度灯在一定距离照射到标准白板的照度为 $E_s(\lambda)$, 白板的反射比为 $\rho_s(\lambda)$, 那么标准白板的辐亮度为

$$L_s(\lambda) = \frac{\rho_s(\lambda)}{\pi} E_s(\lambda), \quad (6)$$

3.2 积分球光源-光谱辐亮度工作标准

根据相关技术规范制造的大积分球, 其内表面涂上高反射率的漫反射材料, 用卤钨灯照明积分球内表面, 积分球上开窗口作为大面积辐亮度标准光源。用光谱辐射亮度计测量标准白板和积分球光源的辐亮度时光谱辐射亮度计的信号输出分别为 $I_s(\lambda)$ 和 $I_{os}(\lambda)$,

$$I_s(\lambda) = k(\lambda) L_s(\lambda), \quad (7)$$

$$I_{os}(\lambda) = k(\lambda) L_{os}(\lambda). \quad (8)$$

从式(7)和(8)即可得到积分球面光源的辐亮度

$$L_{os}(\lambda) = \left(\frac{I_{os}(\lambda)}{I_s(\lambda)} \right) L_s(\lambda) = \left(\frac{I_{os}(\lambda)}{I_s(\lambda)} \right) \frac{\rho(\lambda)}{\pi} E_s(\lambda), \quad (9)$$

用光谱辐亮度标准标定了积分球面光源的辐亮度 $L_{os}(\lambda)$ 。

3.3 遥感器实验室辐射定标

在实验室用遥感器对积分球光源和遥感器的星上定标光源照明获得的遥感器信号输出分别为

$$V_s(P_j, \lambda_i) = C_s(j, i) L_{os}(\lambda), \quad (10)$$

$$V_{if}(P_j, \lambda_i) = C_s(j, i) L_e(\lambda). \quad (11)$$

式中 $L_e(P_j, \lambda_i)$ 为用星上定标光源照明的等效辐亮度, 那么

$$L_e(P_j, \lambda_i) = \frac{V_{if}(P_j, \lambda_i)}{V_s(P_j, \lambda_i)} L_{os}(\lambda) = \left(\frac{V_{if}(P_j, \lambda_i)}{V_s(P_j, \lambda_i)} \right) \left(\frac{I_{os}(\lambda_i)}{I_s(\lambda_i)} \right) \frac{\rho(\lambda_i)}{\pi} E_s(\lambda_i), \quad (12)$$

即定标了 $L_e(P_j, \lambda_i)$, 并要把数据存储在遥感器上带到星上去进行对遥感器观测地面目标的辐射定标。

3.4 星上对地观测数据的定标

在卫星上遥感对地观测获取了对某一地域场景的超光谱图像数据(信号输出),

$$V(P_j, \lambda_i) = C(j, i) L(P_j, \lambda_i), \quad (13)$$

然后, 在星上定标系统的有效辐亮度 $L_e(P_j, \lambda_i)$ 照明下获取遥感器的信号输出:

$$V_e(P_j, \lambda_i) = C(j, i) L_e(P_j, \lambda_i), \quad (14)$$

那么

$$L(P_j, \lambda_i) = \left[\frac{V(P_j, \lambda_i)}{V_e(P_j, \lambda_i)} \right] L_e(P_j, \lambda_i), \quad (15)$$

由于 $L_e(P_j, \lambda_i)$ 如公式(12)所示, 所以遥感观测的视辐亮度 $L(P_j, \lambda_i)$ 也被定标了。即

$$L(P_j, \lambda_i) = \left[\frac{V(P_j, \lambda_i)}{V_e(P_j, \lambda_i)} \right] \left[\frac{V_{if}(P_j, \lambda_i)}{V_s(P_j, \lambda_i)} \right] \left[\frac{I_{os}(\lambda_i)}{I_s(\lambda_i)} \right] \frac{\rho(\lambda_i)}{\pi} E_s(\lambda_i), \quad (16)$$

4 辐射定标不确定度

4.1 辐射定标的合成标准不确定度

在光学成像遥感中被测量的物理量是地面场景像元的光谱辐射亮度 $L(P_j, \lambda_i)$, 而遥感测量值是输出信号 $V(P_j, \lambda_i)$, 要把遥感器获取的信号用辐射定标, 转换成辐亮度值, 还需要辐射定标的测量过程, 才能获得最终所需要的被测量 $L(P_j, \lambda_i)$, 因此同一般的直接可测量的情况相比, 附加了“辐射定标”过程中带来的误差(即不确定度)。这实际上也是测量物理量的准确程度问题, 辐射定标(Radiometric Calibration)的绝对精度(Absolute Accuracy)就是计量学中的不确定度(Uncertainty)。

根据国际标准化组织(ISO)1993年发布实行的《测量不确定度表示指南(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)》^[10-11], 建立

被测量和各影响量的数学模型,通过数学模型求偏微分得出各影响量的传播关系和各分量的标准不确定度,最终可以算出被测量总的合成标准不确定度。

成像光谱仪遥感观测数据 $L(P_j, \lambda_i)$ 是被测量,其数学模型为公式(16)所示。根据含有若干测量分量的被测量合成标准不确定度的公式^[11] $L(P_j, \lambda_i)$ 的合成不确定度可表示为

$$\sigma^2(L) = \frac{u^2(L)}{L^2} = \left[\frac{u(V)}{V} \right]^2 + \left[\frac{u(V_e)}{V_e} \right]^2 + \left[\frac{u(V_{i,f})}{V_{i,f}} \right]^2 + \left[\frac{u(V_s)}{V_s} \right]^2 + \left[\frac{u(I_{os})}{I_{os}} \right]^2 + \left[\frac{u(I_s)}{I_s} \right]^2 + \left[\frac{u(\rho)}{\rho} \right]^2 + \left[\frac{u(E_s)}{E_s} \right]^2 + \left[\frac{u(L_s)}{L_s} \right]^2 + \left[\frac{u(L_{os})}{L_{os}} \right]^2 + \left[\frac{u(L_e)}{L_e} \right]^2, \quad (17)$$

式中

$$u^2(V) = \Delta V_k^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (V_k - \bar{V})^2, \quad (18)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m V_k, \text{ 测量 } V_k \text{ 的平均值, } k=1, 2,$$

\dots, m , 为测量次数,自由度 $\nu = m-1$ 。

上式中 $V_e, V_{i,f}, I_{os}, I_s$ 等也以此类推。

$$\sigma(L) = \frac{u(L)}{L}, \sigma(V) = \frac{u(V)}{V}, \dots, \sigma(E_s) =$$

$\frac{u(E_s)}{E_s}$ 称为相对不确定度。

在公式(17)中 $u(L_s)$ 、 $u(L_{os})$ 和 $u(L_e)$ 分别是辐亮度标准复现、积分球光源和星上定标光源的不确定度,虽然在公式(16)数学模型中没有这三项,但是它们的不确定度要带到定标的最终合成不确定度中,因此多加这三项。

4.2 辐射定标的影响量及其不确定度

公式(18)是被测量地面像元的光谱辐亮度 $L(P_j, \lambda_i)$ 的最终合成标准不确定度同各影响量不确定度的关系。分析各影响量的不确定度。

(1) 光谱辐照度标准 $E_s(\lambda)$ 的不确定度

$$\sigma_1[E_s(\lambda)] = u(E_s)/E_s$$

由提供辐照度标准灯的法定计量单位给出在 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 光谱范围的光谱辐照度值 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$) 和不确定度。 $\sigma_1(E_s)$: 一级标准(从国家工作基准标定的) 4.7% ($0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$) 和 4.1% ($1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$), 英美等国的一级标准为 3% 和 2% 。

(2) 漫反射标准白板 $\rho(\lambda)$ 的 $\sigma_2(\rho)$

同样有计量单位提供。给出反射比值 $\rho(\lambda)$ 和二向性反射分布函数(BDRF), 据此可准确换算出在指定的入射角辐照和指定的反射角的辐亮度, 其不确定度 $\sigma(\rho)$ 可达 $1 \sim 2\%$ 。

(3) 标准辐亮度复现不确定度 $\sigma_3(L_s)$

在实验室为了定标积分球光源, 用辐照度标准灯和标准白板复现辐亮度时由于均匀性、杂散光等复现条件不可能同计量单位复现亮度的情况一样, 所以产生复现亮度的不确定度, 一般 $\sigma_3(L_s)$ 为 $1 \sim 2\%$ 。

(4) 标准辐亮度测量不确定度 $\sigma_4(I_s)$

为了以辐亮度 $L_s(\lambda)$ 为标准定标积分球工作标准 $L_{os}(\lambda)$, 用光谱辐射亮度计测量 $L_s(\lambda)$ 的信号值 $I_s(\lambda)$ 的不确定度。可以用多次测量的方法取得。根据光谱辐射亮度计的信噪比(SNR)也可估算相对不确定度, 信噪比的倒数即为相对不确定度 $\sigma = 1/\text{SNR}$ 。例如: 测量 $L_s(\lambda)$ 的光谱辐射亮度计的 $\text{SNR} = 100$, 那么 $\sigma_4(I_s) = 1\%$ 。因此, 测量不确定度是同测量仪器的 SNR 有关的。

(5) 积分球光源测量的不确定度 $\sigma_5(I_{os})$

用光谱辐射亮度计测量积分球光源时, 信号值 $I_{os}(\lambda)$ 的不确定度, 与(4)情况相同。

(6) 积分球光源的不确定度 $\sigma_6(L_{os})$

由于积分球光源的稳定性、均匀性、杂散光等原因引起误差, 产生的不确定度。估计 $\sigma_6(L_{os}) = 2\%$ 。

(7) 成像光谱仪测量积分球辐亮度的不确定度 $\sigma_7(V_s)$

以积分球光源辐亮度工作标准定标星上定标光源的有效辐亮度时, 用成像光谱仪测量积分球光源辐亮度信号 $V_s(P_j, \lambda_i)$ 的不确定度。虽然积分球亮度是均匀的, 但经成像光谱仪系统后焦平面器件采集的数据是一组 $m \times n$ 行列式矩阵数据, 其不确定度同(4)的情况一样。成像光谱仪的信噪比是确定的, 无法选择, 而且随波长变化大, SNR 低于 50, 甚至低于 20, 30 的也不少。因此辐射定标的不确定度(绝对精度)对不同波长相差很大。 $\sigma_7(V_s)$: 1% 对 $\text{SNR} = 100$ 。

(8) 测量星上定标光源的不确定度 $\sigma_8(V_{i,f})$

成像光谱仪对其星上定标光源测量的信号 $V_{i,f}(P_j, \lambda_i)$ 的不确定度, 与(7)情况相同。

(9) 星上定标光源的不确定度 $\sigma_9(L_e)$

星上定标光源及其投影在焦平面上产生等效辐亮度的过程由于稳定性、杂光、均匀性等原因引起误差的不确定度。它在地面和空间卫星长期运行中要保持稳定,并把地面上的数据带到空间长期使用。估计 $\sigma_9(L_e)$ 为 2-3%。

(10) 遥感中测量星上光源的不确定度 $\sigma_{10}(V_e)$

在卫星上遥感对地测量中为了定标对地观测数据 $L(\rho_j, \lambda)$, 测量星上定标光源 V_e 的不确定度。它的情况同(8)中测量 V_{if} 是一样的,但是在空间卫星上测量。情况与(7)相同。

(11) 遥感对地观测的不确定度 $\sigma_{11}(V)$

这是成像光谱仪获取的地面数据 $V(\rho_j, \lambda_i)$ 的测量不确定度。对地观测时只能测量一次 $m=1$, 自由度 $\nu=m-1=0$, 测量值不准确。既使 $SNR=100$, 考虑到上述情况, 测量不确定度 $\sigma_{11}(V)$ 不能估计为 1%, 而是 2%。

表 1 各影响量和最终被测量的不确定度

Tab. 1 Influence quantities and final measurand uncertainty

序号	项目	符号	σ_i (%)		备注
			1#	2#	
1	辐照度值 $E_s(\lambda)$	$\sigma_1(E_s)$	3	5	1#: 用国外的 2#: 用国内的
2	标准白板 $\rho(\lambda)$	$\sigma_2(\rho)$	1	2	
3	辐亮度复现 $L_s(\lambda)$	$\sigma_3(L_s)$	1	2	
4	标准辐亮度测量 $I_s(\lambda)$	$\sigma_4(I_{os})$	1	1	SNR=100
5	积分球光源测 量 $L_{os}(\lambda)$	$\sigma_5(I_{os})$	1	1	同上
6	积分球光源 $L_{os}(\lambda)$	$\sigma_6(L_{os})$	1	2	
7	积分球光源测 量 $V_s(P_j, \lambda_i)$	$\sigma_7(V_s)$	1	2	1#: SNR=100 2#: SNR=50
8	定标光源测量 $V_{if}(P_j, \lambda_i)$	$\sigma_8(V_{if})$	1	2	同上
9	定标光源 $L_e(P_j, \lambda_i)$	$\sigma_9(L_e)$	2	3	
10	星上定标光源 测量 $V_e(P_j, \lambda)$	$\sigma_{10}(V_e)$	1	2	同 7 项
11	星上对地物测 量 $V(P_j, \lambda_i)$	$\sigma_{11}(V)$	2	2	对 SNR=100
合成不确定度 (绝对精度)			$\sigma(L) = \left(\sum_{i=1}^{11} \sigma_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}$		5 8

表 1 列出了辐射定标各影响量的不确定度和合成标准不确定度即绝对精度。

各影响量的不确定度的估计值: 1# 是好的情况, 2# 是次好情况。辐射定标的不确定度即绝对精度, 在相当好的实验测试条件下可能达到 5%~8%。辐射定标测量全链的影响量共有 11 项, 因此辐射定标的绝对精度要好于 5% 是相当困难的, 在表 1 中各影响量测量不确定度估计值无论是 1# 或是 2#, 都是比较高的, 光学测试中要用精密的仪器和实验条件, 精心操作、严格测试才能达到上述指标。

辐射定标的相对精度:

辐射定标的相对精度一般是指辐射对遥感器像元和光谱通道响应均匀的定标(或修正)误差。辐射定标的相对不确定度的影响量只有 $\sigma_{10}(V_e)$ 和 $\sigma_{11}(V)$ 。

因此辐射定标的相对精度

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{10}^2 + \sigma_{11}^2}, \sqrt{5} = 2.2\% \sim \sqrt{8} = 2.8\%。$$

4.3 自由度与定标中测量次数要求

为了估算出不确定度的准确性, 测量各分量要在重复(或再现)性条件(repeatability conditions)下多次测量, 求其平均值和测量标准偏差。被测量是独立变量时, 其自由度 $\nu=m-1$, m 为测量次数。

计量学中给出了不确定度实验标准差的相对不确定度与自由度的关系^[11]。

例如: 自由度 $\nu=8$ (测量次数 $m=9$) 的时候, 测量的不确定度的相对不确定度(相对误差)是 0.25。如果测量的不确定度是 4, 那么它的不确定度为 $4 \times 0.25 = 1$, 也就是 3~5 之间。遥感定标中测量 $m=9$ 次和 $m=13$ 次(相对不确定度 0.2)就足够了。

5 结 论

成像光谱仪在卫星上对地观测获得的原始数据中包含地物光谱、仪器参数和大气传输等信息, 辐射定标是把观测的数据转换(定标)为成像光谱仪光瞳前的视光谱辐射亮度。要从定标后的遥感视光谱辐射亮度数据中获得地物的光谱辐射亮度或光谱反射率, 还需要大气传输特性参数或在地面同步测量的有关光谱数据。从遥感视光谱辐射亮度反演地面景物的光谱辐亮度或光谱反射率不

是辐射定标的任务。

成像光谱仪辐射定标的测试过程中使用了辐亮度标准(辐照度灯加上漫反射板)、积分球光源和星上定标光源;并用光谱辐射计和成像光谱仪本身,经过多级测量链的测试过程后才能最终对卫星上对地观测的数据实现辐射定标。辐射定标测量全链的影响量共有 11 项。复现光谱辐亮度用的光谱辐照度一级标准的不确定度为 4%~5%(国内),2%~3%(英、美),因此在成像光谱

仪辐射定标中其它影响量的测量不确定度应限制在 1%~2%,才能使最终的合成标准不确定度(即绝对精度)达到 5%~8%。在光辐射的计量与测试技术中这样的测量精度是相当高的水平,需要精密的仪器设备和熟练的光辐射测量与实验技术。

辐射定标的不确定度同成像光谱仪的信噪比(SNR)特性有关。

参考文献:

- [1] LANSING J C, WISE T. Thematic mapper design description and performance prediction[J]. *SPIE*, 1979, 183: 224-234.
- [2] BEGNI G, DINGUIRARD M C. Absolute calibration of the spot-1 HRV camera[J]. *SPIE*, 1986, 660: 66-76.
- [3] MENDENHALL J A, LENCIONI D E. EO-1 advanced land imager in-flight calibration[J]. *SPIE*, 1998, 3439: 416-422.
- [4] 顾名禮. CBERS-1 卫星星载太阳定标器的研制[J]. *航天返回与遥感*, 2001, 22(4): 33-37.
GU M L. Development of the space-borne solar calibrator for CBERS-1 satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2001, 22(4): 33-37. (in Chinese)
- [5] MARKHAM B L. Landsat-7 enhanced thematic mapper plus in flight radiometric calibration[C]. *Proc. IGARSS96*, 2: 1273-1275.
- [6] PAGANO T S, QURHAM R M. Moderate resolution imaging spectroradiometer(MODIS) [J]. *SPIE*, 1993, 1939: 2-17.
- [7] GREEN R O, CONEL J E. In flight validation and calibration of the spectral and radiometric characteristics of the airborne visible/Infrared imaging spectrometer(AVIRIS) [J]. *SPIE*, 1990, 1298: 18-36.
- [8] LIAO L L, JARECKE P P. Performace characterization of the hyderion imaging spectrometer instrument [J]. *SPIE*, 2000, 4135: 264-275.
- [9] RECIVES R G. *Manual of Remote Sensing* [M]. Translation, Publishing House of the National Defence Industry.
- [10] 陈奕钦. 测量不确定度, 93 年国际指南应用实例 [M]. 中国计量出版社.
CHEN Y Q. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* [M]. China Metvology Publishing House. (in Chinese)
- [11] 李慎安. 测量不确定度表达 10 讲 [M]. 中国计量出版社, 1999.
LI SH A. *Ten Chapter of Expression of Uncertainty in Measurement* [M]. China Metvology Publishing House. (in Chinese)

作者简介: 李幼平(1965—), 女, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要从事卫星遥感应用研究。

E-mail: liyouup@sohu.com