

文章编号: 1672-8785(2010)09-0023-07

# 绝对辐射定标与相对辐射定标的关系研究

赵晓熠 张伟 谢蓄芬

(哈尔滨工业大学空间光学研究中心, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:** 通过对辐射定标过程的全面分析, 指出了绝对辐射定标和相对辐射定标之间的不确定传递关系。其中, 相对辐射定标方法选取多点辐射定标, 绝对定标方法选取“标准灯—漫反板—积分球”的定标流程。以这组相对、绝对辐射定标链路为模型, 给出了该辐射定标链路的综合不确定性的表达式, 并分析了该表达式中由相对辐射定标所带来的不确定性分量的来源和意义。最后计算出了在目前器件水平下可达到的辐射定标不确定性数值, 从而为实验室辐射定标精度要求提供了理论依据。

**关键词:** 辐射定标; 相对定标; 绝对定标; 不确定性

**中图分类号:** TP73    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.09.006

## Study of Relationship between Absolute Calibration and Relative Calibration

ZHAO Xiao-yi, ZHANG Wei, XIE Xu-fen

(Space Optical Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Through the complete analysis of a radiometric calibration process, the uncertainty transfer relationship between absolute calibration and relative calibration is revealed. In the analysis, the multi-point radiometric calibration method is used for the relative calibration and the standard lamp—diffusion board—integrating sphere routine is used for the absolute calibration. By taking this radiometric calibration chain as a model, the uncertainty equations in the radiometric calibration chain are given and the uncertainty factors due to the relative calibration in these equations are analyzed. Finally, the uncertainty values which can be achieved with the current equipment are calculated. These values are helpful theoretically to the determination of the precision requirement for lab radiometric calibration.

**Key words:** radiometric calibration; absolute calibration; relative calibration; uncertainty

## 1 引言

辐射定标是建立辐射量与探测器输出量的数值联系的过程。空间相机的辐射定标技术主要包括相对辐射定标(也称均匀性校正)和绝对辐射定标两个部分。

相对辐射定标是矫正探测器不同像元响应度的过程。造成这种响应度和偏置不同的原因除了有工艺水平之外, 还包括其他多种因素, 如

分为器件自身的非均匀性、器件工作时引入的非均匀性、外界输入相关的非均匀性和光学系统的影响。由于器件工艺比较成熟, 目前可见光探测器件一般不需要均匀性校正, 因此相对辐射定标主要用于红外波段。焦平面器件的众多光敏元对辐射的响应不大一致, 相互之间也没有一定的关系, 并且一般光敏元的响应率并不呈线性。这些都给非均匀性校正带来了很大困

收稿日期: 2010-04-26

作者简介: 赵晓熠(1985-), 男, 陕西人, 硕士研究生, 主要从事光学辐射定标研究。E-mail: xiaoyizhao.hit@gmail.com

难。一般的校正过程都是通过用算法将实际情况简化的。

目前，国内外主要存在两类非均匀性校正方法：温度定标校正法和基于场景的校正法。前者发展得比较成熟，并因容易实施而得到了广泛的应用；后者不需要温度定标和校正系数的定期更新，克服了温度定标法的不足，然而具体实施起来有一定的难度。它目前尚处于实验室研究和探讨阶段，但已经显示出巨大的发展潜力。

具体到温度定标校正法，目前较为成熟的算法包括两点温度定标法和多点温度定标法。而基于场景的校正法的种类较多，有时域高通滤波法、神经网络算法、CS算法、恒定范围统计法等<sup>[1,2]</sup>。

绝对辐射定标是建立探测器输出信号与空间相机输入辐射量之间关系的过程。一般而言，绝对辐射定标的主要目标是确定空间相机入瞳处的辐亮度L与探测器输出信号V之间的函数关系，即确定绝对定标系数。常见的绝对辐射定标包括飞行前实验室定标、在轨星上装置定标、在轨场地定标和在轨与其他卫星交叉定标。这些定标方法都可以用来对空间相机进行绝对辐射定标，它们互有优势和局限性。在具体使用时，可采用多种定标方式相结合的方法来弥补缺陷。

定标不确定性是由定标测量数据链在传递过程中的各种不确定性所决定的。不同的测量链会引入不同的测量误差，最终合成定标精度。辐射定标中的绝对精度就是计量学中的不确定性。

定标不确定性必须依据国际标准化组织(ISO)认可的《测量不确定性政策实施指南》来确定，即先建立被测量和各影响量的数学模型，然后通过对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性，最终根据合成不确定性公式，算出被测量的总的合成标准不确定性<sup>[3,4]</sup>。

本文通过选取典型的实验室相对和绝对辐射定标方法与流程，分析了绝对辐射定标中经

常被忽略的相对辐射定标对其造成的不确定性影响，并在一定程度上给出了更加准确的辐射定标精度模型，为提高辐射定标精度提供了理论基础。

## 2 不确定性与辐射定标的基本理论

### 2.1 不确定性的基本理论

根据不确定性实施指南，当y是由通过N次测量获得的 $x_i$ 使用函数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 计算获得时，其不确定性为

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (1)$$

式中， $u(x_i)$ 为 $x_i$ 引入的不确定性分量， $u(x_i, x_j)$ 为 $x_i, x_j$ 两项的协方差。

由于 $u^2(x_i) = u(x_i, x_i)$ ，上式可表达为

$$u^2(y) = f_x^T U_x f_x \quad (2)$$

式中， $f_x^T = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdots \frac{\partial f}{\partial x_N} \right)$ ， $U_x = [u(x_i, x_j)]$ 为 $N \times N$ 矩阵<sup>[5]</sup>。

### 2.2 相对辐射定标的基本理论

本文讨论了相对定标中的温度定标校正法，该方法需要能满足空间相机全口径入射的均匀光源，其定标不确定性取决于具体的定标算法和光源的均匀性。例如，在两点法校正中，由于基本假设探测元的光谱响应度与入射波长无关，而只与入射辐照度有关，且呈线性，所以其校正方程为

$$V'_{ij} = \beta_{ij} V_{ij} + b_{ij} \quad (3)$$

式中， $V_{ij}$ 为探测器的实际响应信号， $V'_{ij}$ 为均匀校正后的探测器信号， $ij$ 为像元编号， $\beta_{ij}(E_g)$ 和 $b_{ij}(E_g)$ 为相对定标确定的相对定标系数。

多点校正法则是引入多个定标黑体温度点，通过分段线性函数来逼近探测元对于不同能量的非线性响应。采用多点定标算法，取k个定标黑体温度点，即 $T_1, T_2, \dots, T_k$ 得到k个入射辐照度 $E_1, E_2, \dots, E_k$ ，则<sup>[6]</sup>

$$V'_{ij}(E) = \beta_{ij}(E_g) V_{ij}(E) + b_{ij}(E_g) \quad (4)$$

式中,  $E \in [E_g, E_{g+1}]$ ,  $g \in [1, k-1]$ ,

$$\beta_{ij}(E_g) = \frac{\bar{V}_{space}(E_{g+1}) - \bar{V}_{space}(E_g)}{V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)}$$

$$b_{ij}(E_g) = \frac{V_{ij}(E_{g+1})\bar{V}_{space}(E_g) - V_{ij}(E_g)\bar{V}_{space}(E_{g+1})}{V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)}$$

其中, 空间平均响应电压  $\bar{V}_{space}(E_g) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1, j=1}^{M, N} V_{ij}(E_g)$

每个探测元有  $k-1$  对校正系数  $[\beta_{ij}(E_g), b_{ij}(E_g)]$ , 整个焦平面探测器则将有  $MN(k-1)$  对均匀性校正系数。因此, 为了实现两点法或多点法相对辐射定标, 就需要有可足够照亮空间相机整个入瞳面的均匀光源, 且光源的均匀性、光谱匹配度都应得到严格控制。

### 2.3 绝对辐射定标的基本理论

空间相机的绝对辐射定标实际上是一个建立标准和传递标准的过程, 即由较高级的初级标准逐级向较低级的标准传递, 直至相机探测器。因此, 绝对定标精度与选取的辐射定标初级标准源、次级辐射传递方法、辐射链传递长度等因素相关。一般来说, 绝对定标方程可表达为

$$V'_{ij} = R_{ij} L_{ij} + V_{0ij} \quad (5)$$

式中,  $R_{ij}(\lambda_k)$  为绝对定标系数,  $V_{0ij}$  为暗电流信号,  $L_{ij}$  为入瞳处的等效辐亮度。

本文主要讨论实验室辐射定标。目前, 国内外普遍采用的实验室辐射定标方法有标准灯 / 太阳 - 漫反射板辐射定标、积分球辐射定标、黑体点源 - 准直系统定标、基于标准探测器辐射定标等。

本文采用典型的“标准灯 - 漫反射板 - 积分球”的绝对定标链路进行分析。由于该方法的初级标准精度较高、试验条件简单, 且最终的传递标准积分球可满足大口径光学系统定标的要求, 因此该方法在实际定标工作中已得到了广泛的应用。图 1 所示为该辐射定标方法的标准传递链路。

## 3 辐射定标的不确定性分析

由辐射定标的流程可知, 空间相机一般先进行相对定标, 然后进行绝对定标。相对定标和绝对定标之间存在着一定的联系和影响。一方面, 相对定标的精度会对像质产生影响。例如, 使用 MTF 作为像质评价手段时, MTF 本质上就是图像对比度。而相对定标是校正探测元的非均匀性, 如果相对定标不准确, 像元间的对比度就必然存在误差, 就会对图像的 MTF 产生影响。另一方面, 绝对定标不会影响像质, 但是绝对定标是在相对定标被认为准确的基础上进行的。因此, 如果相对定标的误差不能被消除, 就必然会对绝对定标产生影响, 辐射定标误差也就在这个过程中被传递下去。

在以下的分析过程中, 相对定标采用多点法进行定标, 而绝对定标则采用实验室积分球进行定标, 由式(3)和式(5)可得

$$L_{ij} = \frac{\beta_{ij} V_{ij} + b_{ij}}{R_{ij}} \quad (6)$$

由上式可以看出, 相对定标系数在绝对定标中有所体现, 因此, 相对定标不确定性将被传递到绝对定标中来。

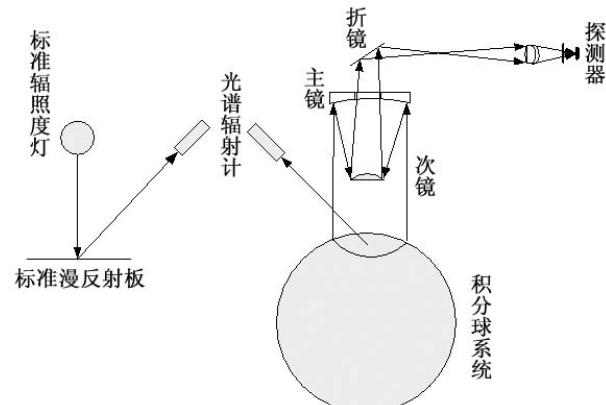


图 1 “标准灯 - 漫反射板 - 积分球”辐射定标链路

### 3.1 相对辐射定标的不确定性

我们可采用多点相对辐射定标算法来进行分析。首先, 将定标黑体  $E_g$  的不确定性归为 B 类不确定性, B 类的评定信息可来自黑体生产厂检测说明书中依据的标准、引用手册的参考数据以及测量的相关材料特性数据等。 $E_g$  的 B 类不确定性可参照实际选用的黑体并结合《测量不确定性政策实施指南》来计算。假设所使用黑体

的校准证书中给出的扩展不确定度为  $U(E_g)$ ，包含因子为  $k$ ，则  $E_g$  的标准不确定度为

$$u(E_g) = \frac{U(E_g)}{k} \quad (7)$$

若资料未指明  $k$ ，可取  $k=2$ ，即置信概率为 95%。其他情况可参考所用黑体的校准证书。

$u(\bar{V}_{space}(E_g))$  所对应的灵敏系数为

$$\begin{aligned} \frac{\partial V'_{ij}(E)}{\partial \bar{V}_{space}(E_g)} &= \frac{-V_{ij}(E)}{V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)} \\ + \frac{V_{ij}(E_{g+1})}{V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)} &= \frac{V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E)}{V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)} \end{aligned} \quad (8)$$

因此，当对应的  $\bar{V}_{space}(E_g)$  的标准不确定度为  $u(\bar{V}_{space}(E_g))$  时，定标中由  $\bar{V}_{space}(E_g)$  引入的合成不确定度分量  $u_1$  为

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{\partial V'_{ij}(E)}{\partial \bar{V}_{space}(E_g)} u(\bar{V}_{space}(E_g)) \\ &= \frac{V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E)}{V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)} u(\bar{V}_{space}(E_g)) \end{aligned} \quad (9)$$

式中，标准不确定度  $u(\bar{V}_{space}(E_g))$  可由探测器的扩展不确定度和包含因子确定。

同理，由  $\bar{V}_{space}(E_{g+1})$  引入的合成不确定度分量  $u_2$  为

$$\begin{aligned} u_2 &= \frac{\partial V'_{ij}(E)}{\partial \bar{V}_{space}(E_{g+1})} u(\bar{V}_{space}(E_{g+1})) \\ &= \frac{V_{ij}(E) - V_{ij}(E_g)}{V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)} u(\bar{V}_{space}(E_{g+1})) \end{aligned} \quad (10)$$

同理，由  $V_{ij}(E_g)$  引入的合成不确定度分量  $u_3$  为

$$\begin{aligned} u_3 &= \frac{\partial V'_{ij}(E)}{\partial V_{ij}(E_g)} u(V_{ij}(E_g)) \\ &= \left\{ \frac{\bar{V}_{space}(E_{g+1}) - \bar{V}_{space}(E_g)}{[V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)]^2} V_{ij}(E) \right. \\ &\quad \left. + \frac{V_{ij}(E_{g+1}) \bar{V}_{space}(E_g) + V_{ij}(E_{g+1}) \bar{V}_{space}(E_{g+1})}{[V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)]^2} \right\} \\ &\quad \times u(V_{ij}(E_g)) \end{aligned} \quad (11)$$

式中，标准不确定度  $u(V_{ij}(E_g))$  可由通过多次测量的 A 类不确定性的计算获得。A 类不确定性的计算方法如下：

$$u^2(V) = \Delta V_l^2 = \frac{1}{d-1} \sum_{l=1}^d (V_l - \bar{V})^2 \quad (12)$$

式中，测量量  $V_l$  的平均值  $\bar{V} = \frac{1}{d-1} \sum_{l=1}^d V_l$ ；测量次数  $l = 1, 2, \dots, d$ ；自由度  $v = d-1$ 。

同理，由  $V_{ij}(E_{g+1})$  引入的合成不确定度分量  $u_4$  为

$$\begin{aligned} u_4 &= \frac{\partial V'_{ij}(E)}{\partial V_{ij}(E_{g+1})} u(V_{ij}(E_{g+1})) \\ &= \left\{ \frac{\bar{V}_{space}(E_g) - \bar{V}_{space}(E_{g+1})}{[V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)]^2} V_{ij}(E) \right. \\ &\quad \left. + \frac{V_{ij}(E_g) \bar{V}_{space}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g) \bar{V}_{space}(E_g)}{[V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)]^2} \right\} \\ &\quad \times u(V_{ij}(E_{g+1})) \end{aligned} \quad (13)$$

同理，由  $V_{ij}(E)$  引入的合成不确定度分量  $u_5$  为

$$\begin{aligned} u_5 &= \frac{\partial V'_{ij}(E)}{\partial V_{ij}(E)} u(V_{ij}(E)) \\ &= \frac{\bar{V}_{space}(E_{g+1}) - \bar{V}_{space}(E_g)}{V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)} u(V_{ij}(E)) \end{aligned} \quad (14)$$

最后，当空间相机的像元数  $MN$  较大时，可近似认为  $\bar{V}_{space}(E_g)$  与某个特定像元点  $(p, q)$  的响应  $V_{pq}(E_g)$  之间的相关系数近似为零。根据  $V'_{ij}(E_g)$  的函数表达式，其合成不确定度可表达为

$$\begin{aligned} u^2(V'_{ij}(E_g)) &= u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 \\ &\quad + u^2(E_g) + u^2(E_{g+1}) \end{aligned} \quad (15)$$

当使用等效温度为  $T_g$  的标准黑体时，定标值  $V'_{ij}(E_g)$  的相对不确定度为  $\sigma(V'_{ij}(E_g)) = \frac{u(V'_{ij}(E_g))}{V'_{ij}(E_g)}$ 。其中， $u_1, u_2, \dots, u_5$  是由相对辐射定标光源的不均匀性以及探测器自身响应度的不均匀性两者相互影响造成的。 $u(E_g)$  和  $u(E_{g+1})$  仅受相对辐射定标光源的不均匀性的影响。

### 3.2 绝对辐射定标的不确定性

相对定标不确定性取决于不同的均匀性校正算法, 类似地, 绝对定标的不确定性分析也必须建立在其相应的绝对定标方法上。即不同的绝对定标流程将产生不同的绝对定标不确定性。

以图 1 中的定标链为例, 使用积分球系统对空间相机进行定标。用光谱辐射计标定的积分球面光源的辐亮度可表达为<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} L_{os}(\lambda_k) &= \left[ \frac{V_{os}(\lambda_k)}{V_s(\lambda_k)} \right] L_s(\lambda_k) \\ &= \left[ \frac{V_{os}(\lambda_k)}{V_s(\lambda_k)} \right] \frac{\rho(\lambda_k)}{\pi} E_s(\lambda_k) \end{aligned} \quad (16)$$

式中,  $V_{os}(\lambda_k)$ 、 $V_s(\lambda_k)$  分别为用光谱辐射计测量标准反射板和积分球光源时的输出信号,  $L_s(\lambda_k)$  为标准反射板的辐亮度,  $E_s(\lambda_k)$  为用标准辐照度灯照射反射板时的照度,  $\rho(\lambda_k)$  为漫反射板的反射率。

因此, 实验室绝对定标方程可表达为

$$V'_{os}(i, j, \lambda_k) = R_{ij} L_{os}(i, j, \lambda_k) \quad (17)$$

### 3.3 辐射定标的合成标准不确定性

在采用实验室积分球进行定标时, 定标方程为

$$\begin{aligned} V'_{os}(i, j, \lambda_k) &= \beta_{ij} V_{os}(i, j, \lambda_k) + b_{ij} \\ &= R_{ij} L_{os}(i, j, \lambda_k) \end{aligned} \quad (18)$$

式中,  $L_{os}(i, j, \lambda_k)$  为定标积分球的辐亮度。

当空间相机进行遥感观测时, 获得的数据为

$$V'(i, j, \lambda_k) = \beta_{ij} V(i, j, \lambda_k) + b_{ij} = R_{ij} L(i, j, \lambda_k) \quad (19)$$

式中,  $L(i, j, \lambda_k)$  为成像光学系统入瞳处的辐亮度。

因此, 由式(18) 和式(19) 可得

$$\begin{aligned} L(i, j, \lambda_k) &= L_{os}(i, j, \lambda_k) \frac{V'(i, j, \lambda_k)}{V'_{os}(i, j, \lambda_k)} \\ &= \left[ \frac{V_{os}(\lambda_k)}{V_s(\lambda_k)} \right] \frac{\rho(\lambda_k)}{\pi} E_s(\lambda_k) \frac{\beta_{ij} V(i, j, \lambda_k) + b_{ij}}{\beta_{ij} V_{os}(i, j, \lambda_k) + b_{ij}} \end{aligned} \quad (20)$$

以上就是遥感观测的辐亮度定标结果。然而, 此处仅为在空间相机入瞳处的辐亮度,

并非目标本身反演的信息。目标反演还需要相应的位置以及大气参数, 反演所引入的误差在这里暂且不作讨论。

当定标源温度点  $T(\lambda_k) \in [T_g, T_{g+1}]$  时,  $L(i, j, \lambda_k)$  的合成相对不确定性可表达为

$$\begin{aligned} \sigma^2(L(i, j, \lambda_k)) &= \frac{u^2(L(i, j, \lambda_k))}{(L(i, j, \lambda_k))^2} \\ &= \left[ \frac{u(V_{os}(\lambda_k))}{V_{os}(\lambda_k)} \right]^2 + \left[ \frac{u(V_s(\lambda_k))}{V_s(\lambda_k)} \right]^2 + \left[ \frac{u(\rho(\lambda_k))}{\rho(\lambda_k)} \right]^2 \\ &\quad + \left[ \frac{u(E_s(\lambda_k))}{E_s(\lambda_k)} \right]^2 + \left[ \frac{u(V'(i, j, \lambda_k))}{V'(i, j, \lambda_k)} \right]^2 + \left[ \frac{u(V'_{os}(i, j, \lambda_k))}{V'_{os}(i, j, \lambda_k)} \right]^2 \end{aligned} \quad (21)$$

式中,  $\frac{u(V'(i, j, \lambda_k))}{V'(i, j, \lambda_k)}$ 、 $\frac{u(V'_{os}(i, j, \lambda_k))}{V'_{os}(i, j, \lambda_k)}$  为由相对定标引入的相对不确定性分量, 其具体计算方法已由相对不确定性分析部分给出。

## 4 模型分析

辐射定标过程中采用的均匀光源可同时用于绝对定标和相对定标。由最终获得的空间相机入瞳处的辐亮度合成不确定性表达式可以看出, 空间相机的辐射定标精度包括两个部分: 相对辐射定标不确定性和绝对辐射定标不确定性。

其中, 对相对辐射定标精度影响较大的是其均匀性和定标算法误差。而对于绝对辐射定标精度而言, 辐射标准源的辐射量值精度、辐射量值的传递链以及传递方式才是关键因素。虽然两者的影响因素不同, 但它们最终都会在经过辐射定标的空间相机等光学设备所获得的数据中反映出来。

$u(V'(i, j, \lambda_k))$  表示空间遥感相机在轨观测时获得的信号  $V(i, j, \lambda_k)$  经过相对定标校正后的不确定性分量。当  $V(i, j, \lambda_k)$  所对应的输入表观辐照度  $E \in [E_g, E_{g+1}]$  时, 由多点法相对定标校正矩阵因子算法与相对辐射定标黑体特性共同确定的不确定性可表达为

$$\begin{aligned} u^2(V'(i, j, \lambda_k)) &= u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 \\ &\quad + u^2(E_g) + u^2(E_{g+1}) \end{aligned} \quad (22)$$

式中,  $u_1, u_2, \dots, u_4$  是由相对辐射定标中黑体光源的不均匀性以及探测器自身响应度的不均匀

性两者相互影响造成的。 $u(E_g)$  和  $u(E_{g+1})$  仅受相对辐射定标黑体的不均匀性影响。

为了直观地表达这项的影响，假设探测器的扩展不确定性为  $U_1$ ，包含因子为  $k_1$ ；相对辐射定标中使用黑体的扩展不确定性为  $U_2$ ，包含因子为  $k_2$ 。 $u(V_{ij}(E_g))$ 、 $u(V_{ij}(E_{g+1}))$ 、 $u(V_{ij}(E))$  近似等于探测器的标称不确定性，且探测器响应与黑体辐射在定标波段内保持良好的线性，则

$$\begin{aligned} u^2(V'(i, j, \lambda_k)) &= u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 \\ + u^2(E_g) + u^2(E_{g+1}) &= \frac{19}{4} \left( \frac{U_1}{k_1} \right)^2 + 2 \left( \frac{U_2}{k_2} \right)^2 \end{aligned} \quad (23)$$

同理， $u(V'_{os}(i, j, \lambda_k))$  表示空间遥感相机在实验室观测积分球时获得的信号  $V_{os}(i, j, \lambda_k)$  经过相对定校正后的不确定性分量。当  $V_{os}(i, j, \lambda_k)$  所对应的输入表观辐照度  $E_{os} \in [E_g, E_{g+1}]$  时，由多点法相对定校正矩阵因子算法与相对辐射定标黑体特性共同确定的不确定性可表达为

$$\begin{aligned} u^2(V'_{os}(i, j, \lambda_k)) &= u_{os_1}^2 + u_{os_2}^2 + u_{os_3}^2 + u_{os_4}^2 \\ + u_{os_5}^2 + u^2(E_g) + u^2(E_{g+1}) & \end{aligned} \quad (24)$$

式中， $u_{os_1}, u_{os_2}, \dots, u_{os_4}$  是由绝对辐射定标中积分球光源的不均匀性以及探测器自身响应度的不均匀性两者相互影响造成的。 $u(E_g)$  和  $u(E_{g+1})$  仅受相对辐射定标光源的不均匀性影响。其中，

$$\begin{aligned} u_{os_5} &= \frac{\partial V'_{ij}(E)}{\partial V_{ij}(E)} u(V_{os}(i, j, \lambda_k)) \\ &= \frac{\bar{V}_{space}(E_{g+1}) - \bar{V}_{space}(E_g)}{V_{ij}(E_{g+1}) - V_{ij}(E_g)} u(V_{os}(i, j, \lambda_k)) \end{aligned} \quad (25)$$

式中， $u_{os_5}$  是由相对辐射定标光源的不均匀性、探测器自身响应度的不均匀性、绝对辐射定标中积分球输出的不均匀性三者相互影响造成的。

为了直观地表达这项的影响，假设积分球光源的扩展不确定性为  $U_3$ ，包含因子为  $k_3$ 。取  $u(V_{ij}(E_g))$ 、 $u(V_{ij}(E_{g+1}))$ 、 $u(V_{ij}(E))$  近似等于探测器的标称不确定性，且探测器响应与黑体辐射在定标波段内保持良好的线性，则

$$u^2(V'(i, j, \lambda_k)) = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2$$

$$\begin{aligned} &+ u_5^2 + u^2(E_g) + u^2(E_{g+1}) \\ &= \frac{15}{4} \left( \frac{U_1}{k_1} \right)^2 + 2 \left( \frac{U_2}{k_2} \right)^2 + \left( \frac{U_3}{k_3} \right)^2 \end{aligned} \quad (26)$$

一般的辐射定标器件至少应满足正态分布下的置信概率  $p = 95\%$ 。此时， $k_1 = k_2 = k_3 = 2$ 。

(1) 空间相机观测积分球的不确定性  $\delta(V_{os}(\lambda_k))$

假设绝对辐射定标过程中使用的积分球的出光均匀性为 1，此时造成输出信号不均匀的误差仅仅来自于空间相机自身的信噪比。而空间相机的信噪比在相机结构设计和装调完成后就是固定的，并且与波段有关。一般来说，当空间相机在某波段的 SNR=100 时，其  $\delta(V_{os}(\lambda_k)) = 1\%$ 。

(2) 空间相机观测目标的不确定性  $\delta(V_s(\lambda_k))$

空间相机在轨观测时，除了在地球静止轨道上以外，一般都只能对同一区域进行一次观测，因此其自由度为 0。仍然假设空间相机在该波段的 SNR=100，此时  $\delta(V_s(\lambda_k)) > 1\%$ <sup>[7]</sup>。

(3) 漫反射板的反射率测量的不确定性  $\delta(\rho(\lambda_k))$

由漫反射板提供方给出其二向反射系数(BRDF)，根据实际使用时的空间位置，计算其在该方向上的反射率。 $\delta(\rho(\lambda_k))$  一般在 1% ~ 2% 之间。

(4) 光谱辐照度标准灯的不确定性  $\delta(E_s(\lambda_k))$

它是由计量局等单位提供的标准辐照灯的铭牌确定的，其国家一级标准为 4.1% ~ 4.7%。国外发达国家的一级标准为 2% ~ 3%。

(5) 空间相机在观测目标时的相对校正不确定性  $\delta(V'(i, j, \lambda_k))$

相对辐射定标所用黑体的均匀性一般能满足 1%。国产探测器的响应均匀性为 2% ~ 3%，国外先进探测器则可达到 1% 以内。由此确定国内外的  $\delta(V'(i, j, \lambda_k))$  分别为 2% 和 1%。

(6) 空间相机观测积分球时的相对校正不确定性  $\delta(V'_{os}(i, j, \lambda_k))$

国产积分球光源的均匀性为 2% ~ 3%，国外制造的积分球光源的均匀性可达到 1% ~ 2%<sup>[8]</sup>。国产探测器的响应均匀性为 2% ~ 3%，国外

先进探测器则可达到 1% 以内。由此确定国内外的  $\delta(V'_{os}(i, j, \lambda_k))$  分别为 3% ~ 4% 和 2% ~ 3%。

由此辐射定标链路完成的辐射定标不确定性的估算结果见表 1。

表 1 辐射定标链路中各不确定性分量及合成相对不确定性

	相对不确定性 $\delta/\%$	国内	国外
	$\delta(V_{os}(\lambda_k))$	2%	1%
绝对辐射定标流程中引入的相对不确定性	$\delta(V_s(\lambda_k))$	2%	2%
	$\delta(\rho(\lambda_k))$	1%	1%
	$\delta(E_s(\lambda_k))$	4%	2%
相对辐射定标流程中引入的相对不确定性	$\delta(V'(i, j, \lambda_k))$	3%	2%
	$\delta(V'_{os}(i, j, \lambda_k))$	2%	1%
合成相对不确定性	$\sigma(L(i, j, \lambda_k))$	6%	4%

## 5 结束语

相对辐射定标和绝对辐射定标是两个密切联系的过程。在实际的辐射定标工作中,为了提高定标精度,必须对两者之间的不确定性传递影响进行分析。在整个辐射定标流程中,可采用统一标定的均匀面光源对相机系统进行绝对辐射定标和相对辐射定标。因此,在计算由相对辐射定标造成的最终辐射定标综合不确定性时,应着重考虑由相对辐射定标算法带来的误差和辐射定标光源自身产生的均匀性误差。

本文全面分析了这两种误差的传递过程,并给出了相应的不确定性计算方法。通过分析

论证,指出了相对辐射定标算法和辐射定标源均匀性产生的具体不确定性量值的计算方法。为进一步分析论证如何降低辐射定标不确定性提供了依据。在具体的辐射定标工作中,还应结合实际标准传递链路以及定标器件自身的特性对综合不确定性作具体分析,这样才能为辐射定标结果提供可靠的依据。

## 参考文献

- [1] Horman S R, Hepfer K C, Zurasky M. Uniformity compensation for high quantum efficiency focal Plane arrays [J]. SPIE, 1996, **2744**: 154.
- [2] Parrish. Improvements in uncooled systems using bias equalization [J]. SPIE, 1999, **3698**: 748.
- [3] International Organization for Standardization. Guide to the expression of uncertainty of uncertainty in measurement [S].
- [4] 陈奕钦. 测量不确定度“93 年国际指南”应用实例 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1998.
- [5] James L Gardner. Uncertainty Propagation for NIST Visible Spectral Standards [J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2004, **109**(3): 2-4.
- [6] 施立原. 面列阵焦平面探测器的多点定标非均匀性校正算法及其实现 [J]. 红外, 2002, **23**(8): 2-3.
- [7] 李幼平. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度 [J]. 光学精密工程, 2006, **14**(5): 2-3.
- [8] Jacquez J A, Kuppenheim H F. Theory of the integrating sphere [J]. Journal of the Optical Society. Of America, 1955, **45**(6): 455-456.

## 新闻动态 News

### 雷神公司将毫米波雷达、非致冷红外成像技术及半主动激光器集成于武器中

据 [www.eetasia.com](http://www.eetasia.com) 网站报道,美国雷神公司最近宣布,为了使战斗机能再恶劣的天气条件下摧毁固定的或移动的目标,美国空军已选择将该公司的 GBU-53/B 寻的器用于其小直径炸弹增量 II 计划中的空中发射远程精确打击

武器。

GBU-53/B 装有毫米波雷达、非致冷红外成像技术及半主动激光器,可装备在所要求的所有飞机上,能满足不同 F-35 联合打击战斗机内部武器舱的卸载要求。经过在 21 天内进行的 26 次飞行试验,该寻的器未曾发生一起硬件故障。根据这项价值约 4.5 亿美元的合同,产品交付预计从 2013 年开始,并将于 2014 年晚些时候投入使用。

□ 高国龙