



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 38236—2019

---

## 航天光学遥感器实验室辐射定标方法

Radiometric calibration method for space-borne optical  
remote sensors in laboratory

2019-10-18 发布

2020-05-01 实施

---

国家市场监督管理总局 发布  
中国国家标准化管理委员会

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国宇航技术及其应用标准化技术委员会(SAC/TC 425)提出并归口。

本标准起草单位:北京空间机电研究所、中国航天标准化研究所。

本标准主要起草人:李永强、李云飞、崔程光、王静怡、郭永祥、杨伟涛、吴永亮、晋利兵。



# 航天光学遥感器实验室辐射定标方法

## 1 范围

本标准规定了工作波段在  $0.35\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$  内的航天光学遥感器实验室辐射定标的定标环境、定标设备和定标方法及不确定度分析。

本标准适用于工作波段在  $0.35\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$  内的航天光学遥感器的实验室辐射定标。其他波段航天光学遥感器的实验室辐射定标可参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 3102.6 光及有关电磁辐射的量和单位

GB/T 26179 光源的光谱辐射度测量

GB/T 30114.1 空间科学及其应用术语 第1部分:基础通用

GB/T 34509(所有部分) 陆地观测卫星光学遥感器在轨场地辐射定标方法

## 3 术语和定义

GB/T 3102.6、GB/T 26179、GB/T 30114.1 和 GB/T 34509 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**光学遥感器** optical remote sensor

用光学方法远距离测量目标反射或辐射的紫外、可见光和红外波段能量,以获取目标特性的遥感器。

### 3.2

**实验室辐射定标** radiometric calibration in laboratory

在实验室条件下,确定遥感器输出信号与入射辐射量之间定量关系,或确定各探测器单元或探测器通道之间的输出响应不一致性的过程。

### 3.3

**绝对辐射定标** absolute radiometric calibration

确定遥感器输出信号与入射辐射量之间定量关系的过程。

### 3.4

**相对辐射定标** relative radiometric calibration

确定各探测器单元或探测器通道之间的输出响应不一致性的过程。

### 3.5

**光谱辐亮度** spectral radiance

辐射源在单位投影面积上、单位立体角内和单位波长间隔内的辐射(通)量。

3.6

**相对光谱响应函数** relative spectral response function

遥感器各波长处的光谱响应与光谱响应峰值之比。

3.7

**参考辐射源** reference radiation source

可用于对遥感器定标并进行量值溯源的具有已知光谱辐射特性的辐射源。

3.8

**绝对定标系数** coefficient of absolute calibration

遥感器的输出信号与入射辐射亮度的比例值。

4 定标环境要求

实验室环境应满足被测航天光学遥感器及其他参试设备对使用环境的要求。要求如下：

- a) 温度： $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 相对湿度： $35\% \sim 65\%$ ；
- c) 洁净度：满足航天光学遥感器对洁净度的要求；
- d) 避免环境杂光对定标的影响；
- e) 振动环境、电磁环境、静电防护和接地措施等符合航天光学遥感器使用要求。

5 定标设备要求

5.1 通则

测试设备应在检定合格或校准的有效期内，测试量值可溯源至国家相关计量基准或传递标准。

5.2 参考辐射源

参考辐射源要求如下：

- a) 光谱范围应覆盖航天光学遥感器的工作波段；
- b) 辐亮度调节范围宜覆盖航天光学遥感器的响应动态范围；
- c) 发光面应充满航天光学遥感器的入瞳；
- d) 发光面宜充满航天光学遥感器的视场；
- e) 参考辐射源应为均匀漫射源，发光面辐射亮度的面均匀性和角均匀性一般要求优于 98%；
- f) 参考辐射源具有辐射监测功能；定标工作时段内，辐亮度不稳定性应小于 1%。

注 1：参考辐射源发光面不能充满航天光学遥感器入瞳时，可使用平行光管作为扩束设备满足充满航天光学遥感器入瞳的定标要求，由参考辐射源加扩束设备组成的系统视为广义上的参考辐射源。

注 2：当参考辐射源不能充满航天光学遥感器视场时，可采用参考辐射源对航天光学遥感器不同视场分别进行辐射定标，实现全视场辐射定标。

5.3 光谱辐射计

用于对参考辐射源的光谱辐射量进行测量，光谱辐射计要求如下：

- a) 测量光谱范围应覆盖航天光学遥感器的工作波段；
- b) 对参考辐射源输出辐亮度进行测量时，光谱辐亮度测量误差宜小于 5%。

5.4 地面检测设备

地面检测设备要求如下：

- a) 地面检测台应满足航天光学遥感器专用地面检测设备的技术要求；
- b) 航天光学遥感器定标数据采集设备应满足航天光学遥感器专用地面检测设备的技术要求。

5.5 低温真空容器

低温真空容器要求如下：

- a) 低温真空容器内压力应小于  $1 \times 10^{-3}$  Pa；
- b) 低温真空容器热沉的温度满足航天光学遥感器辐射定标试验温度要求，通常热沉温度应低于 100 K；
- c) 定标期间，总污染量低于  $1 \times 10^{-6}$  g/cm<sup>2</sup>。

6 定标方法

6.1 波段范围 0.35 μm~2.5 μm 内的辐射定标

6.1.1 定标原理

波段范围 0.35 μm~2.5 μm 内的实验室辐射定标，除对大气吸收敏感的航天光学遥感器实验室辐射定标需在真空环境中进行外，一般在常温常压环境中进行。辐射定标原理如图 1 所示。

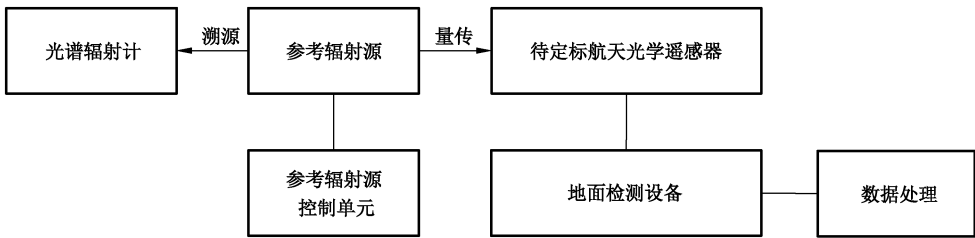


图 1 波段范围 0.35 μm~2.5 μm 内的实验室辐射定标原理图

采用光谱辐射计测量参考辐射源的光谱辐亮度，使参考辐射源充满航天光学遥感器的入瞳和视场，调整参考辐射源的输出辐亮度，采集航天光学遥感器在参考辐射源各输出辐亮度下的辐射定标数据，确认数据有效后，进行定标数据处理，给出定标结果。

绝对辐射定标要求建立航天光学遥感器输出信号与等效辐亮度之间的关系，航天光学遥感器对应谱段的等效辐亮度  $L_e$  计算见式(1)。

$$L_e = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L_{\lambda} R_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_{\lambda} d\lambda} \dots\dots\dots (1)$$

- 式中：
- $L_e$  ——航天光学遥感器对应谱段辐亮度级次下的等效辐亮度，单位为瓦每平方米球面度微米 ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ )；
  - $\lambda_{\max}$  ——航天光学遥感器谱段光谱响应函数的最大波长，单位为微米( $\mu m$ )；
  - $\lambda_{\min}$  ——航天光学遥感器谱段光谱响应函数的最小波长，单位为微米( $\mu m$ )；
  - $L_{\lambda}$  ——参考辐射源辐亮度级次下的光谱辐亮度，单位为瓦每平方米球面度微米 ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ )；

$R_{\lambda}$  ——航天光学遥感器的相对光谱响应函数。

## 6.1.2 定标流程

### 6.1.2.1 定标准备

辐射定标准备工作如下：

- 完成定标大纲和定标细则编写；
- 使用光谱辐射计测量参考辐射源各输出辐亮度级次的光谱辐亮度；
- 将航天光学遥感器置于参考辐射源前，调整航天光学遥感器与参考辐射源的发光面对准；
- 确认航天光学遥感器消杂光措施、温度控制措施、防静电措施、接地措施等状态符合定标环境要求；
- 连接航天光学遥感器与地面检测设备，并通电检查，确保工作正常。

### 6.1.2.2 定标步骤

辐射定标步骤如下：

- 开启并稳定参考辐射源，航天光学遥感器加电，根据动态范围要求确定航天光学遥感器的探测器与电路状态，如积分时间、增益等参数，完成定标数据采集状态设置；
- 对航天光学遥感器响应稳定性进行考核，考核时间根据实际需要确定，一般不小于 30 min；
- 进行辐射定标数据采集，并记录参考辐射源的辐射监测值；定标数据重复采集次数一般不小于 100；
- 依据定标细则改变参考辐射源辐射输出，重复 c)；
- 采集存储无辐射输入时航天光学遥感器的输出；
- 定标数据采集完成后，确认数据的有效性；
- 开展辐射定标数据处理和分析，编写定标总结报告。

## 6.1.3 数据处理方法

### 6.1.3.1 绝对定标系数

根据航天光学遥感器输出信号与入射辐射亮度之间的关系，计算得到绝对定标系数。当航天光学遥感器响应为线性时，可采用两点法或多点最小二乘法进行线性拟合，按照式(2)所示的线性拟合方程解算航天光学遥感器谱段定标系数  $A_{\text{band}}$  (定标斜率) 和  $B_{\text{band}}$  (定标截距)。

$$L_e = A_{\text{band}} \times \text{DN} + B_{\text{band}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$A_{\text{band}}$  ——定标斜率，单位为瓦每平方米球面度微米 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ )；

DN ——各像元输出信号的平均值；

$B_{\text{band}}$  ——定标截距，单位为瓦每平方米球面度微米 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ )。

### 6.1.3.2 相对辐射定标

相对辐射定标应根据航天光学遥感器的响应特性来确定。在航天光学遥感器线性响应区间内，相对辐射定标计算见式(3)。

$$\text{DN}'_i = k_i \times \text{DN}_i + b_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$\text{DN}'_i$  ——第  $i$  个像元相对辐射定标后期望的输出信号值；

$k_i$  ——第  $i$  个像元相对辐射定标的斜率值；

$DN_i$ ——第  $i$  个像元的实际输出信号值；

$b_i$  ——第  $i$  个像元相对辐射定标的偏置校正值。

各像元的相对定标系数  $k_i$  可采用两点法或多点最小二乘法进行线性拟合得到。

### 6.1.3.3 响应非线性度

一般按照式(4)计算航天光学遥感器的响应非线性度。

$$NL = \left( \frac{DN_a - DN_0}{DN_b - DN_0} \times \frac{L_b}{L_a} - 1 \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

NL ——航天光学遥感器的响应非线性度；

$DN_a$  ——参考辐射源输出等效辐亮度  $L_a$  时，各像元输出信号的平均值；

$DN_b$  ——参考辐射源输出等效辐亮度  $L_b$  时，各像元输出信号的平均值；

$DN_0$  ——无辐射输入时，各像元输出信号的平均值；

$L_b$  ——响应非线性度测量选取的两个等效辐亮度中的较大值，单位为瓦每平方米球面度微米  
( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ )；

$L_a$  ——响应非线性度测量选取的两个等效辐亮度中的较小值，单位为瓦每平方米球面度微米  
( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ )。

在采用式(4)计算响应非线性度时，应同时给出相应的辐亮度范围  $L_a$  和  $L_b$ 。

### 6.1.3.4 信噪比

像元的信噪比一般可采用两种计算方法，第一种计算方法见式(5)。

$$SNR_i = \frac{S_i}{N_i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$SNR_i$ ——第  $i$  个像元的信噪比；

$S_i$  ——第  $i$  个像元多次采集输出信号的算术平均值；

$N_i$  ——第  $i$  个像元多次采集输出信号的均方根值，即均方根噪声值。

第二种计算方法见式(6)。

$$SNR_{i,L} = 20 \lg \left( \frac{S_i}{N_i} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$SNR_{i,L}$ ——第  $i$  个像元的信噪比，单位为分贝(dB)。

航天光学遥感器的信噪比取各像元信噪比的算术平均值。

### 6.1.3.5 动态范围

通常调整参考辐射源输出辐亮度使航天光学遥感器输出临近饱和，此辐亮度即为航天光学遥感器动态范围的上限值；以航天光学遥感器满足指定信噪比条件时入射辐亮度的最小值作为动态范围的下限值。如果可用线性表征，则为线性动态范围。

### 6.1.3.6 响应稳定性

像元的响应稳定性计算见式(7)。

$$RS_i = \left( 1 - \frac{DN_{i,max} - DN_{i,min}}{DN_{i,mean}} \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$RS_i$  ——稳定性测量周期内第  $i$  个像元的响应稳定性；

$DN_{i,max}$  ——稳定性测量周期内第  $i$  个像元输出信号的最大值；

$DN_{i,min}$  ——稳定性测量周期内第  $i$  个像元输出信号的最小值；

$DN_{i,mean}$  ——稳定性测量周期内第  $i$  个像元输出信号的算术平均值。

航天光学传感器的稳定性可采用各像元输出信号算术平均值的稳定性来表征。

## 6.2 波段范围 $2.5\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$ 内的辐射定标

### 6.2.1 定标原理

波段范围  $2.5\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$  内的辐射定标一般在低温真空容器中进行,采用黑体作为参考辐射源。根据黑体的温度和发射率,采用普朗克公式计算黑体的光谱辐亮度,按照式(1)计算得到航天光学遥感器的等效辐亮度,建立航天光学遥感器输出信号与等效辐亮度之间的关系,建立航天光学遥感器星上定标装置和参考辐射源之间的转换关系。

辐射定标原理如图 2 所示。

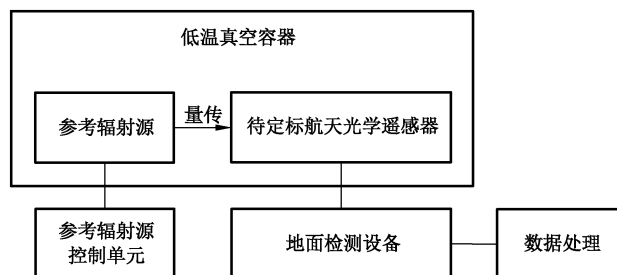


图 2 波段范围  $2.5\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$  内的实验室辐射定标原理图

### 6.2.2 定标流程

#### 6.2.2.1 定标准备

辐射定标准备工作如下：

- 完成定标大纲和定标细则编写；
- 红外参考辐射源工作温度范围根据定标需求确定,根据参考辐射源的温度和发射率计算得到不同温度下的光谱辐亮度,确定定标温度点；
- 将航天光学遥感器和参考辐射源置于低温真空容器内,调整航天光学遥感器与参考辐射源发光面对准；
- 连接航天光学遥感器与地面检测设备,并通电检查,确保工作正常；
- 连接参考辐射源电缆,开启制冷装置并进行检查,确保工作正常；
- 低温真空容器抽真空,当真空度满足定标大纲指定条件后,对低温真空容器热沉内充低温介质,使热沉降到试验要求的温度范围；
- 参考辐射源调整到试验准备状态,将航天光学遥感器温度控制到设定范围内。

#### 6.2.2.2 定标步骤

辐射定标步骤如下：

- 确认低温真空容器热沉、总污染量、参考辐射源、航天光学遥感器主体和探测器温度具备定标状态,开启并稳定参考辐射源；



- b) 航天光学遥感器加电,根据动态范围要求确定航天光学遥感器的探测器与电路状态,如积分时间、增益等参数,完成定标数据采集状态设置;
- c) 对航天光学遥感器响应稳定性进行考核;保持航天光学遥感器和所有参试设备的状态不变,在规定的稳定性测试周期内,对航天光学遥感器的输出信号进行多次采集;
- d) 进行辐射定标数据采集,并记录参考辐射源的温度数据;
- e) 依据定标细则改变参考辐射源辐射输出,重复 d);
- f) 根据航天光学遥感器定标需要调整航天光学遥感器温度,进行其他温度工况下的辐射定标数据采集;
- g) 定标数据采集完成后,确认数据的有效性;
- h) 航天光学遥感器及低温真空容器进行回温复压;
- i) 开展辐射定标数据处理和分析,编写定标总结报告。

6.2.3 数据处理方法

6.2.3.1 绝对定标系数

同 6.1.3.1。

6.2.3.2 相对辐射定标

同 6.1.3.2。

6.2.3.3 响应非线性度

同 6.1.3.3。

6.2.3.4 噪声等效温差

辐射定标数据采集时,将红外参考辐射源的温度分别调整到噪声等效温差测试温度  $T$  附近的两个温度点  $T_1$ 、 $T_2$ ,采集两个温度点的定标数据,像元的噪声等效温差计算见式(8)。

$$NETD_{i,T} = \Delta T / (\Delta S_{i,T} / N_{i,T}) \dots\dots\dots (8)$$

式中:  
NETD<sub>*i,T*</sub>——第 *i* 个像元在测试温度  $T$  下的噪声等效温差,单位为开尔文(K);  
 $\Delta T$ —— $T_1$  与  $T_2$  在航天光学遥感器入瞳等效温差,单位为开尔文(K);  
 $\Delta S_{i,T}$ ——第 *i* 个像元在  $T_1$  与  $T_2$  两个温度点输出信号的差值;  
 $N_{i,T}$ ——第 *i* 个像元在  $T_1$  与  $T_2$  两个温度点输出均方根噪声的平均值。  
航天光学遥感器的噪声等效温差取各像元噪声等效温差的算术平均值。

6.2.3.5 动态范围

同 6.1.3.5。

6.2.3.6 响应稳定性

同 6.1.3.6。

7 不确定度分析

7.1 总则

定标不确定度通常由定标过程的数学模型和不确定度的传播律来评定。

7.2 绝对辐射定标不确定度分析

航天光学遥感器绝对辐射定标不确定度的主要来源有：参考辐射源光谱辐射量测量的准确度、参考辐射源均匀性和稳定性，航天光学遥感器的杂散辐射响应、响应稳定性和信噪比，以及数据处理方法，定标环境等。当这些不确定度来源相互独立时，绝对辐射定标合成相对标准不确定度计算见式(9)。

$$u_c = \sqrt{\sum u_i^2} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

- $u_c$  ——绝对辐射定标合成相对标准不确定度；
- $u_i$  ——第  $i$  项绝对辐射定标不确定度来源引起的相对标准不确定度分量。

7.3 相对辐射定标不确定度分析

航天光学遥感器相对辐射定标不确定度的主要来源有：参考辐射源均匀性和稳定性，航天光学遥感器的杂散辐射响应、响应稳定性和信噪比，以及数据处理方法，定标环境等。当这些不确定度来源相互独立时，相对辐射定标合成相对标准不确定度计算见式(10)。

$$u_{c,rel} = \sqrt{\sum u_{i,rel}^2} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

- $u_{c,rel}$  ——相对辐射定标合成相对标准不确定度；
- $u_{i,rel}$  ——第  $i$  项相对辐射定标不确定度来源引起的相对标准不确定度分量。

