

# 基于噪声等效辐射亮度的红外高光谱遥测系统 辐射定标方法

庞玲玲, 杨智雄, 余春超, 丁瑞霖, 王博洋, 鲍佳男, 王理贤, 薛杰  
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 红外辐射定标是建立成像光谱的数字量化值与目标光谱辐射亮度值二者之间关系的方法, 对所测光谱进行定标是定量分析中的重要环节。在实际应用中, 由于仪器本身的稳定性和目标辐射特性对仪器的影响, 定标结果的好坏没有很好的评估, 本文提出了基于噪声等效辐射亮度 (noise equivalent spectral radiance, NESR) 来定量分析定标结果的准确性。采用两点线性辐射定标法对仪器进行标定, 利用 NESR 信噪比计算方法得到仪器 NESR 的实测值, 通过对比 NESR 标称参数, 可以快速、量化地判定辐射定标结果的准确性。利用自研的成像遥测系统采集到的数据进行验证, 得出该方法可以快速、有效地评价辐射定标结果的准确性, 从而提高标定后亮温光谱的质量, 为后续红外光谱气体识别奠定基础。

**关键词:** 噪声等效辐射亮度; 红外辐射定标; 黑体辐射亮度; 红外高光谱成像仪; 量化判定  
**中图分类号:** TP732.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2025)07-0869-08

## Radiometric Calibration Method for Infrared Hyperspectral Telemetry System Based on Noise Equivalent Spectral Radiance

PANG Lingling, YANG Zhixiong, YU Chunchao, DING Ruilin, WANG Boyang, BAO Jianan,  
WANG Lixian, XUE Jie  
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** Infrared radiometric calibration is a method for establishing a relationship between the digital quantization values of imaging spectra and the spectral radiance values of a target. Calibrating the measured spectra is crucial in quantitative analysis. In practical applications, because of the stability of the instrument and the effect of the target radiation characteristics on the instrument, the quality of calibration results cannot be evaluated effectively. This study proposes a method based on noise equivalent spectral radiance (NESR) to quantitatively analyze the accuracy of calibration results. A two-point linear radiometric calibration method is used to calibrate the instrument, and the measured NESR value is obtained using the NESR signal-to-noise ratio calculation method. By comparing the measured NESR with the nominal NESR parameter, the accuracy of the radiometric calibration results can be determined rapidly and quantitatively. Data obtained using a self-developed imaging telemetry system are used for verification, which demonstrates that the proposed method can rapidly and effectively evaluate the accuracy of radiometric calibration results, thereby improving the quality of brightness temperature spectra after calibration and establishing a foundation for subsequent infrared spectral gas identification.

**Key words:** noise equivalent spectral radiance, infrared radiometric calibration, blackbody radiance, hyperspectral imaging spectrometer, quantitative determination

收稿日期: 2024-09-14; 修订日期: 2025-02-19.

作者简介: 庞玲玲 (1990-), 硕士, 工程师, 主要从事红外高光谱数据算法软件开发研究。E-mail: 13648838673@163.com.

通信作者: 杨智雄 (1987-), 高级工程师, 博士, 主要从事红外高光谱数据处理及图像处理技术研究。E-mail: tino\_y2024@163.com.

基金项目: 云南省基础研究专项 (202401AT07020)。

## 0 引言

红外辐射定标是红外光谱信息量化的关键技术<sup>[1]</sup>, 是对所测光谱进行定量分析的重要环节。由于红外成像光谱仪在不同波长处的仪器响应能力不同, 未定标时测量值是些不规则的电信号, 反映的是物体相对的辐射量值, 不能从中得到光谱的绝对强度, 要从中提取有用的物理信息, 必须对采集到的这些电信号进行标定。红外辐射定标的基本原理是用已知辐射量值的黑体光源对仪器做标定, 计算出光谱仪的响应和偏置量, 将测得光谱的相对强度转化为绝对强度, 从而得到定标后的亮温光谱。

国内外不少学者对红外辐射定标及如何提高辐射定标精度做了研究, 例如袁小春等利用标准黑体对长波傅里叶光谱仪进行两点线性定标, 定标后得到的亮温光谱与德国 BRUKER OPAG33 傅里叶红外光谱仪测得结果很好地吻合<sup>[1]</sup>; 庞鑫宇提出通过对温漂进行补偿从而提高红外光谱仪辐射定标的精度, 温漂对辐射定标方程的偏置系数影响很大, 通过构建温漂补偿模型可以提高辐射定标精度<sup>[2]</sup>; 还有 Paule Lapeyre 等人提出了 Poisson-Gaussian 去噪声模型从而提高辐射定标精度等<sup>[3-5]</sup>。从国内外研究结果可以看出, 学者多从红外光谱辐射定标方法以及如何提高定标精度的角度进行研究, 而对如何快速、量化地判定仪器红外辐射定标结果目前还没有报道。但在实际应用中, 由于仪器本身的稳定性和目标辐射特性对仪器的影响, 采集的原始干涉数据存在掉帧、零极平移、噪声过大等问题, 会给定标结果带来很大影响, 一旦定标结果出现问题, 会导致鉴别目标的特征信息淹没在无规则的电信号中, 给目标鉴别带来很大困难, 故找出一种快速且准确评价红外成像光谱仪定标结果的方法具有实际意义。

红外成像光谱仪的干扰主要来自大气吸收特性、系统噪声和目标辐射特性三方面因素的影响, 在辐射定标过程中, 由于黑体和仪器距离很近, 大气吸收特性的影响可忽略不计, 仪器的干扰因素主要来源于系统噪声和目标辐射特性两方面, 但要从目标的辐射中分离出二者的贡献是比较困难的。噪声等效光谱辐射度 (noise equivalent spectral radiance, NESR) 是描述系统噪声水平一个比较客观的参数, 定义为系统信噪比 (SNR) 为 1 时仪器可分辨的光谱最小辐亮度的变化值<sup>[6]</sup>, 多组光谱辐亮度数据在同一像素点的起伏变化情况, 可以反映定标结果的准确性。因此, 本文提出通过 NESR 指标对辐射定标结果的准确性进行快速、有效地评估, 并进一步分析验证了 NESR 用于判定辐射定标

结果的可行性。

## 1 理论方法

### 1.1 辐射定标

辐射定标旨在建立红外高光谱遥测系统输出的数字化值与目标实际光谱辐射亮度值之间的关系, 将测量的无量纲数据转换为具有物理意义的辐射亮度值, 利用两点线性定标法对红外高光谱遥测系统进行辐射定标, 理想黑体的光谱辐亮度可由 Planck 定理给出<sup>[7-8]</sup>, 如式(1)所示:

$$L(\nu) = \frac{c_1 \nu^3}{\exp\left(\frac{c_2 \nu}{T}\right) - 1} \quad (1)$$

式中:  $L(\nu)$ 是光谱辐亮度,  $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-2} \cdot \text{cm}$ ;  $\nu$ 是波数,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $T$ 是绝对温度,  $\text{K}$ ;  $c_1$ 是第一辐射常数,  $c_1 = 1.191 \times 10^{-12} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ;  $c_2$ 是第二辐射常数,  $c_2 = 1.439 \times 10^4 \text{K} \cdot \mu\text{m}$ 。

探测器的辐射功率包括目标辐射功率和仪器自身热辐射两部分, 一个带标定的测量值如式(2)所示:

$$\text{Spec}(\nu) = K(\nu)L_{\text{source}}(\nu) + M(\nu) \quad (2)$$

式中:  $\text{Spec}(\nu)$ 为仪器标定后测量到的目标光谱;  $L_{\text{source}}(\nu)$ 为目标的光谱辐亮度;  $K(\nu)$ 是仪器的响应函数;  $M(\nu)$ 是仪器内部热辐射产生的偏移函数。要求出系统的响应函数  $K(\nu)$ 和辐射偏置量  $M(\nu)$ , 需要进行高低温两个温度点光谱测量。其中,  $L_{\text{HT}}(\nu)$ 和  $L_{\text{LT}}(\nu)$ 可由公式(1)求得, 测得的高低温黑体光谱数据如式(3)、(4)所示:

$$\text{Spec}_{\text{HT}}(\nu) = K(\nu)L_{\text{HT}}(\nu) + M(\nu) \quad (3)$$

$$\text{Spec}_{\text{LT}}(\nu) = K(\nu)L_{\text{LT}}(\nu) + M(\nu) \quad (4)$$

由公式(3)、(4)可推导出响应函数  $K(\nu)$ 和辐射偏置量  $M(\nu)$ , 如式(5)、(6)所示, 完成辐射定标。

$$K(\nu) = \frac{\text{Spec}_{\text{HT}}(\nu) - \text{Spec}_{\text{LT}}(\nu)}{L_{\text{HT}}(\nu) - L_{\text{LT}}(\nu)} \quad (5)$$

$$M(\nu) = \frac{\text{Spec}_{\text{HT}}(\nu)L_{\text{HT}}(\nu) - \text{Spec}_{\text{LT}}(\nu)L_{\text{LT}}(\nu)}{L_{\text{HT}}(\nu) - L_{\text{LT}}(\nu)} \quad (6)$$

标定后的目标光谱辐亮度  $L_{\text{RT}}(\nu)$ 由公式(2)推导可得, 如式(7)所示:

$$L_{\text{RT}}(\nu) = \frac{\text{Spec}(\nu) - M(\nu)}{K(\nu)} \quad (7)$$

根据 Planck 逆变换, 求出标定后目标的亮温光谱 BT, 如式(8)所示:

$$BT = \frac{c_2 v}{\lg\left(\frac{c_1 v^3}{L_{RT}(v)} + 1\right)} \quad (8)$$

## 1.2 NESR 计算

NESR 定义为 SNR 为 1 时, 仪器所能达到的光谱辐亮度噪声水平  $\Delta L$ <sup>[9]</sup>, 如式(9)所示:

$$NESR = \frac{\Delta L}{SNR} \quad (9)$$

如式(10)所示, 当仪器信噪比为 1 时, 采用标准黑体替代均匀背景开展测试。由于探测器固有噪声、读出电路噪声及辐射源非均匀性的影响, 采集的数据存在起伏变化,  $N$  组光谱辐亮度数据中同一像素点测量值的方差即为 NESR 的值。

$$NESR = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (L_i - \bar{L})^2} \quad (10)$$

式(10)中:  $L_i$  表示第  $i$  个 ( $i \in [1, 100]$ ) 光谱辐射亮度数据, 对应光谱图像区域内  $10 \mu\text{m}$  波长处单个像元的测量结果;  $\bar{L}$  为  $N$  组光谱辐射亮度数据的平均值。

在实际应用中,  $\Delta L$  可以通过计算高低温黑体光谱辐亮度之差获得,  $SNR_{\text{measure}}$  受目标辐射、环境等因素影响是一个不可控参数, 故由 NESR 定义可知, 通过计算成像遥测系统的光谱噪声水平 (SNR) 可近似计算出 NESR 的值, 如式(11)所示:

$$NESR \approx \frac{\Delta L}{SNR_{\text{measure}}} \quad (11)$$

式中:  $SNR_{\text{measure}}$  为  $N$  组实测光谱计算出的信噪比。

$SNR_{\text{measure}}$  计算由式(12)所示, 其中, 信号  $Spec_{\text{mean}}$  为  $N$  组高温光谱黑体数据立方体  $Spec_{\text{HT}}$  减去  $N$  组低温光谱黑体数据立方体  $Spec_{\text{LT}}$  的均值, 如式(13)所示; 噪声  $Spec_{\text{std}}$  为前  $N/2$  组低温光谱黑体数据立方体  $Spec_{\text{HT1}}$  减去后  $N/2$  组低温光谱黑体数据立方体  $Spec_{\text{HT2}}$  的方差, 如式(14)所示。

$$SNR_{\text{measure}} = \frac{Spec_{\text{mean}}}{Spec_{\text{std}}} \quad (12)$$

$$Spec_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Spec_{\text{HT}} - Spec_{\text{LT}}) \quad (13)$$

$$Spec_{\text{std}} = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N/2} (Spec_{\text{LT1}} - Spec_{\text{LT2}})^2} \quad (14)$$

进一步说明, 当确定高温温度为  $40^\circ\text{C}$ , 低温温度  $20^\circ\text{C}$  时, 分别代入式(1)可计算出理想光谱辐亮度的差值  $\Delta L$ ; 当采集的黑体高、低温光谱数据组数  $N=4$  时, 代入式(12)可计算出实测光谱的信噪比  $SNR_{\text{measure}}$ ; 最后利用公式(11)计算得到 NESR 的值。

## 2 基于 NESR 的辐射定标判定方法

### 2.1 NESR 标称参数设计

红外高光谱成像遥测技术在国内已经比较成熟, 例如国外代表性产品如加拿大 TELOPS 公司的长波红外 (LWIR) 干涉型成像光谱仪系列产品, 其中 FIRST LW 产品的噪声等效辐亮度水平达到  $5.3 \times 10^{-8} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}@10 \mu\text{m}$ <sup>[10]</sup>; HyperCam LW 产品的噪声等效辐亮度水平达到  $2 \times 10^{-8} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}@10 \mu\text{m}$ <sup>[10]</sup>; 国内昆明物理研究所郑为建等人设计的基于时空调制干涉原理的 LWIR 时空调制高光谱成像实验装置 CHIPED-1, 单次采样 NESR 可达  $5.6 \times 10^{-8} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}@10 \mu\text{m}$ <sup>[11]</sup>; 另外, 基于前期研究积累与工程实践验证红外高光谱成像仪器 NESR 指标应满足  $\leq 3 \times 10^{-7} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}@10 \mu\text{m}$  的要求。结合目前国内外同类型产品的技术水平和现有的标准, 将红外高光谱成像遥测系统 NESR 标称参数设计为  $\leq 5 \times 10^{-8} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}@10 \mu\text{m}$ , 将该 NESR 标称参数作为红外辐射定标的评价依据。

### 2.2 基于 NESR 的辐射定标判定方法

基于上述理论, 对基于 NESR 判定辐射定标结果的方法做详细介绍, 具体实现流程如图 1 所示。

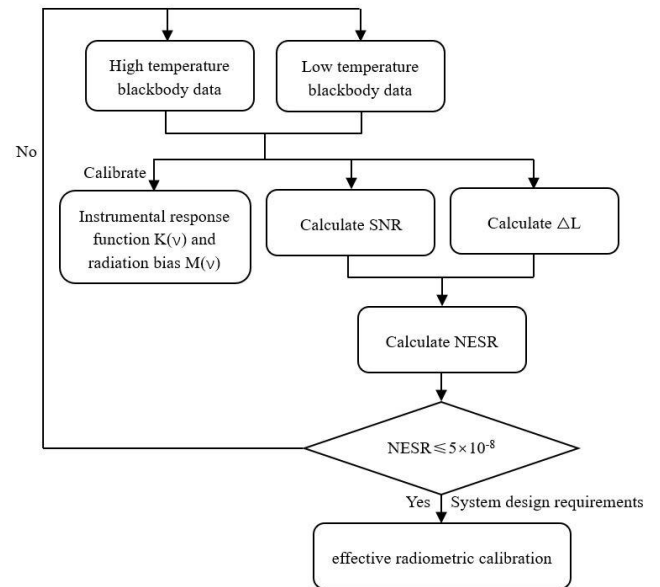


图 1 NESR 判定辐射定标结果流程

Fig.1 Flowchart for determining NESR to evaluate radiation calibration results

采用两点线性定标法对光谱仪进行辐射定标。分别采集  $N$  组低温  $20^\circ\text{C}$  黑体光谱数据立方体和  $N$  组高温  $40^\circ\text{C}$  黑体光谱数据立方体, 对高低温  $N$  组光谱数据进行平均, 得到 1 组高低温黑体光谱数据立方体; 利用公式(1)分别计算出高低温黑体光谱辐亮度, 结合

采集的高低温黑体光谱数据,利用公式(5)、(6)求得仪器的响应函数  $K(\nu)$ 和辐射偏置量  $M(\nu)$ ,完成辐射定标。标定后采集 30℃ 目标黑体光谱数据立方体,利用公式(7)求出目标的光谱辐亮度,再利用公式(8)获取目标的亮温光谱数据。

仪器标定后即可通过  $N$  组高低温光谱数据得到信号  $\text{Spec}_{\text{mean}}$  和噪声  $\text{Spec}_{\text{std}}$ ,将二者代入公式(12)中获取信噪比  $\text{SNR}_{\text{measure}}$ ,从而求得实测 NESR 的值。当实测 NESR 的值小于 NESR 标称参数设计值时,观察标定后获取的目标亮温光谱数据的温度变化情况,以真实值 303K 为标准,当温度变化幅度小于 2K 时,说明辐射定标有效;当实测 NESR 的值大于 NESR 标称参数设计值时,观察标定后获取的目标亮温光谱数据的温度变化情况,当温度变化幅度大于 2K 时,温度波动较大,说明辐射定标无效。重复多组实验,若辐射定标结果均与上述 NESR 判定条件相符合,则说明 NESR 的值可以判定辐射定标结果的准确性。

### 3 实验与分析

#### 3.1 实验装置及方法

使用实验室自研的红外高光谱成像遥测系统(以下简称成像遥测系统)探测不同温度时黑体的辐射光谱,实验所用的制冷型长波红外探测器的响应波段为  $700\sim 1200\text{cm}^{-1}$ ,对应波长范围  $8.3\sim 14.3\mu\text{m}$ ,像元尺寸为  $640\times 512$ 。红外辐射定标的实验装置如图 2 所示,以色列 CI System 公司面源黑体 SR800 置于光学平台上,黑体发射率 0.99;成像遥测系统置于三脚架上,为避免大气环境带来的干扰,成像遥测系统与黑体的距离为不大于 1m;调节成像光谱仪俯仰及偏航,确保黑体表面与光轴垂直;成像遥测系统与光谱数据处理器通过 Camerlink 数字端口相连接,完成光谱图像采集;光谱数据处理器的上位机软件控制成像遥测系统的参数设置,使得相关参数设置满足目标数据的采集。

实验中设置黑体温度分别为 30℃、40℃ 和 50℃,

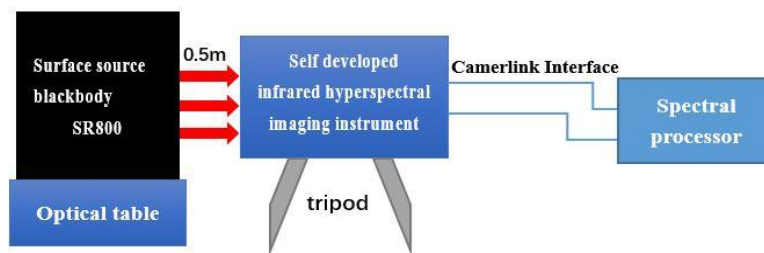


图 2 红外辐射定标实验装置

Fig.2 Experimental setup for infrared radiation calibration

每个温度点采集 4 组目标光谱数据用于 NESR 计算;同时,每个温度点重复 100 次实验以开展 NESR 测量的不确定度分析,并从中选取 4 次典型实验结果进行讨论。采集到的光谱数据立方体大小为  $640\times 512\times 126$ ,黑体光谱数据立方体和对应光谱曲线如图 3 所示。由于仪器中探测器中心区域像元均匀、响应一致性好且盲率低,干扰对实验结果影响最小,为保证实验结果的准确性,本实验选取所有数据立方体中心像素  $64\times 64$  的区域(数据立方体大小:  $64\times 64\times 126$ )进行实验结果讨论。采集到光谱数据后,通过辐射定标和 NESR 理论方法进行计算,得到标定后的 NESR 的测量值和亮温光谱数据。

#### 3.2 数据不确定度分析

成像遥测系统辐射定标过程中,需要进行不同温度下的黑体光谱数据采集,求得仪器的响应函数和辐射偏置量,从而完成辐射定标。辐射定标不确定度的影响因素主要来自黑体控温精度和仪器系统误差,其中标准黑体温度偏差是随机的,偏差量级为  $0.01\text{℃}$ ,这使得每组黑体光谱数据不确定度都不相同;仪器系统误差由成像遥测系统的自身特性所决定,可视为常量,二者的不确定度会在辐亮度数据上综合体现。

依据国家标准的不确定度评定规范<sup>[2]</sup>,基于 A 类不确定度计算方法,测量样本量的增加可使不确定度评估值更逼近真值。本实验中,首先对每个温度点(以 30℃ 为例)单次实验采集的 4 组黑体光谱辐亮度数据进行算术平均,获取该次实验的均值数据;继而利用 100 次重复实验所得的均值数据,完成 NESR 测量值不确定度的计算。选择每组黑体光谱辐亮度数据中心像素  $64\times 64$  的区域,计算均值得到一条含有 126 个点的黑体光谱辐亮度均值曲线,将相同波数位置  $\lambda$  对应的 100 个辐亮度值计算出一个不确定度,这样可以得到 126 个不确定度的数值,然后将所有不确定度累加求平均得到黑体辐亮度总的不确定度,具体过程如下:

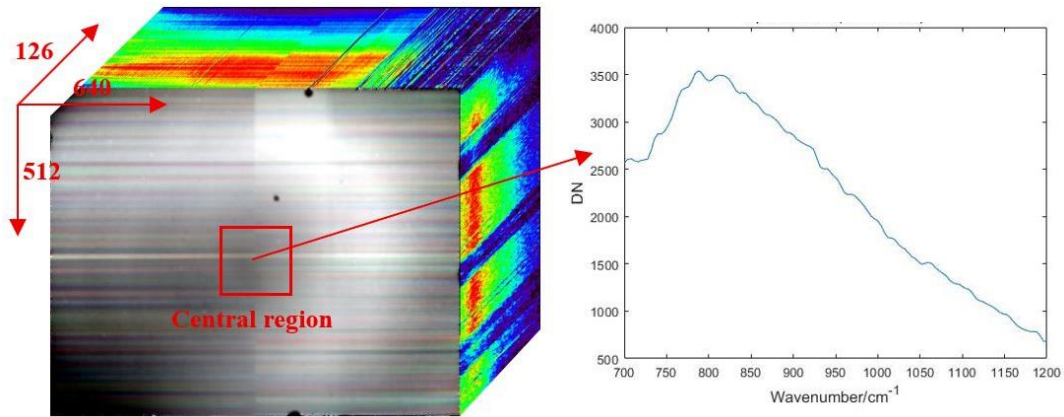


图3 黑体光谱数据立方体(左)和对应光谱曲线(右)

Fig.3 Blackbody spectral data cube(left) and corresponding spectral curve(right)

相同波数位置 $\lambda$ 对应的最佳估计值为:

$$\bar{L}(\lambda) = \frac{1}{100} \sum_{n=1}^{100} L_i(\lambda) \quad (15)$$

用 A 类不确定度方法计算相同波数位置 $\lambda$ 的标准不确定度, 这样可以得到 126 个不确定度数值,  $n$  为 100:

$$\Delta L(\lambda) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i(\lambda) - \bar{L}(\lambda))^2}}{\sqrt{n}} \quad (16)$$

总不确定度为:

$$u_A = \frac{1}{126} \sum_{\lambda=1}^{126} \Delta L(\lambda) \quad (17)$$

相对不确定度为:

$$u_{rel} = \frac{u_A}{\frac{1}{126} \sum_{\lambda=1}^{126} \bar{L}(\lambda)} \times 100\% \quad (18)$$

亮温光谱的不确定度影响因素与光谱辐亮度相同, 故计算过程相同, 将辐亮度数据替换为亮温光谱数据即可计算亮温光谱的不确定度。NESR 的标准不确定度根据 1.2 节求解方法可表示为:

$$u(\text{NESR}(\lambda)) = \sqrt{\sum_{i=1}^{100} [\Delta L(\lambda) \cdot u_A]^2} \quad (19)$$

光谱辐亮度、亮温光谱和 NESR 的相对不确定度曲线, 如图 4 所示。

对图中 3 条曲线求均值, 可以得到每条曲线的平均相对不确定度。辐亮度平均相对不确定度为 2.718%, 亮温光谱平均相对不确定度为 6.1522%, NESR 平均相对不确定度为 3.2235%, 三者均小于 10%, 如表 1 所示。由此说明黑体控温精度和仪器系统误差带来的不确定度对辐射定标的影响较小, 辐射定标后得到的光谱辐亮度、亮温和 NESR 数据重复性

好, 分散程度小, 具有较高的测量精度, 故后续实验结果讨论中, 选取 4 组测量数据可反应实验结果的整体水平。

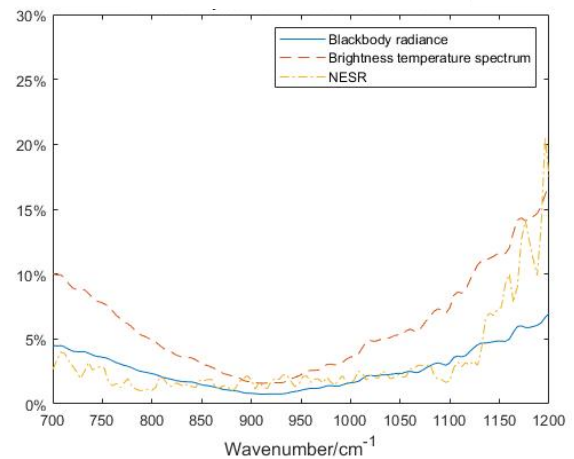


图4 NESR 辐射定标标准不确定度

Fig.4 Standard uncertainty of NESR radiation calibration

表 1 平均相对不确定度

Table 1 Average relative uncertainty

Classification	Average relative uncertainty/(%)
Blackbody radiance	2.718
Brightness temperature spectrum	6.1522
NESR	3.2235

### 3.3 结果分析

#### 3.3.1 NESR 测试结果分析

如图 5 所示, 为 NESR 数据立方体中心  $64 \times 64 \times 126$  区域的测试结果。对每帧  $64 \times 64$  个像素点的 NESR 值进行算术平均, 获得其均值曲线。分析该曲线可知, 仪器正常工作状态下, NESR 测量值均低于标称参数值。

在  $10 \mu\text{m}$  波长处 NESR 中心区域幅面的像素分布

如图 6(a)所示, 图像大小为  $64 \times 64$ ; 对中心区域幅面的像素图进行 NESR 直方图统计, 以分析各个噪声水平的像素数, 如图 6(b)所示。从实验结果可得,  $10 \mu\text{m}$  处 NESR 幅面均值为  $2.01943 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ ,

且 NESR 像素分布接近高斯分布, 说明仪器正常工作时, NESR 全幅面像素的值也在 NESR 标称参数范围内, 系统噪声小, 该测试方法可靠。

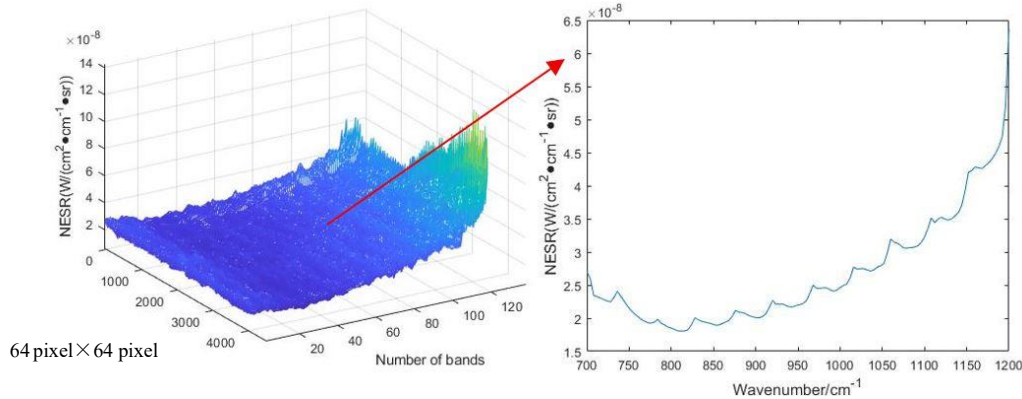
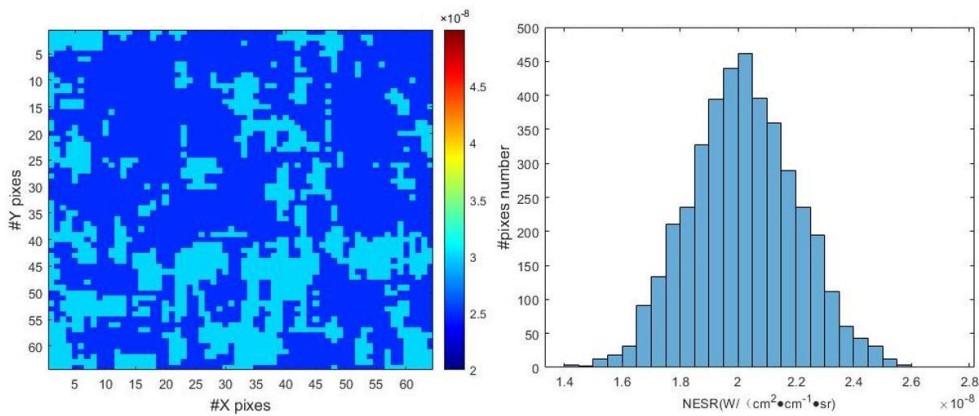


图5 中心像素区域的 NESR 测试结果  
Fig.5 NESR test results of the central pixel region



(a) NESR 中心区域像元分布  
(a) NESR central region pixel distribution  
(b) NESR 中心区域像元统计直方图  
(b) Histogram of NESR values for central region pixels

图6 NESR 中心区域像素分布图与统计直方图

Fig.6 Distribution map and histogram of NESR values for central region pixels

### 3.3.2 NESR 判定辐射定标测试结果分析

在重复性实验中, 选取其中 4 组 NESR 测量值小于 NESR 标称参数的数据进行展示和讨论。在  $10 \mu\text{m}$  波长处 4 组 NESR 中心区域幅面均值分别为  $2.01943 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ 、 $1.8952 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ 、 $1.9739 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$  和  $1.9033 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ , 与其对应的标定后的亮温光谱中心区域像元分布图如图 7 所示。

已知标准黑体温度为  $30^\circ\text{C}$  时, 亮温光谱数据的理想值应为  $303 \text{ K}$ , 故通过亮温光谱数值可验证辐射定标的有效性。从图 7 的纵向坐标可以看出, 4 组亮温光谱的像素图温度集中在  $303 \sim 304 \text{ K}$  之间, 每个幅面温度变化小于  $2 \text{ K}$ ; 再对亮温光谱数据立方体进行光谱维度的分析, 如图 8 所示, 为中心区域全波段亮

温均值曲线图, 4 条曲线温度浮动变化均小于  $2 \text{ K}$ ; 故这 4 组标定后亮温光谱数据立方体与  $303 \text{ K}$  的理想值接近, 辐射定标有效。因此, 在  $10 \mu\text{m}$  波长切片处, 当 NESR 的测量均值小于 NESR 标称参数要求时, 辐射定标有效, 采集获得的亮温光谱数据准确。

与上述实验相反, 选取其中 4 组 NESR 测量值大于 NESR 标称参数的数据进行进一步验证。在  $10 \mu\text{m}$  波长处 4 组 NESR 中心区域幅面均值分别为  $7.71996 \times 10^{-6} \text{ W}/\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ 、 $2.0875 \times 10^{-6} \text{ W}/\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ 、 $3.0675 \times 10^{-6} \text{ W}/\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$  和  $2.2401 \times 10^{-6} \text{ W}/\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ 。如图 9(a)所示, 为其中一组 NESR 的全幅面像元分布图, 从该图可以看出全幅面 NESR 数值浮动大且分布无规律, 如图 9(b)所示, 为中心区域单像元 NESR 全波段均值曲线, 该曲线可反应出

NESR 在不同波长切片处均值的波动性，数值均大于 NESR 标称参数要求。与其对应的标定后的亮温光谱

中心区域像元分布图如图 10 所示。

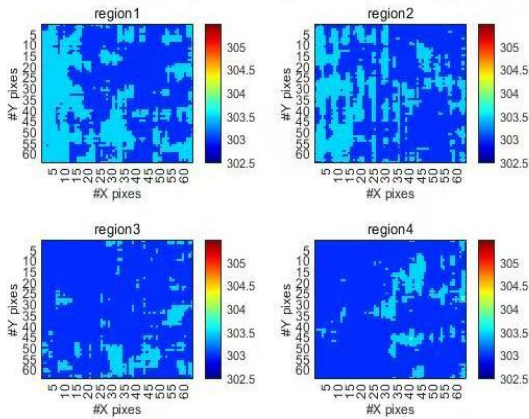


图7 亮温光谱像元分布 (温度变化小于 2 K)

Fig.7 Brightness temperature spectral pixel distribution (temperature fluctuation less than 2 K)

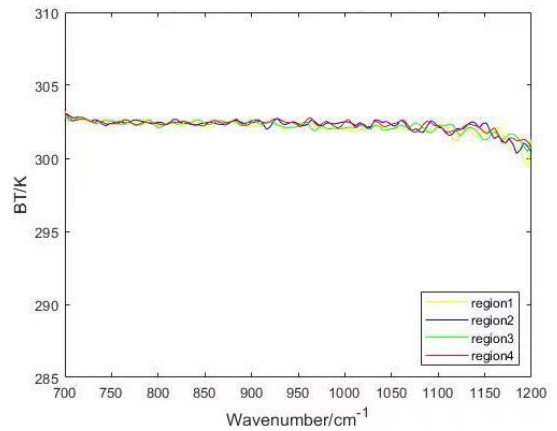
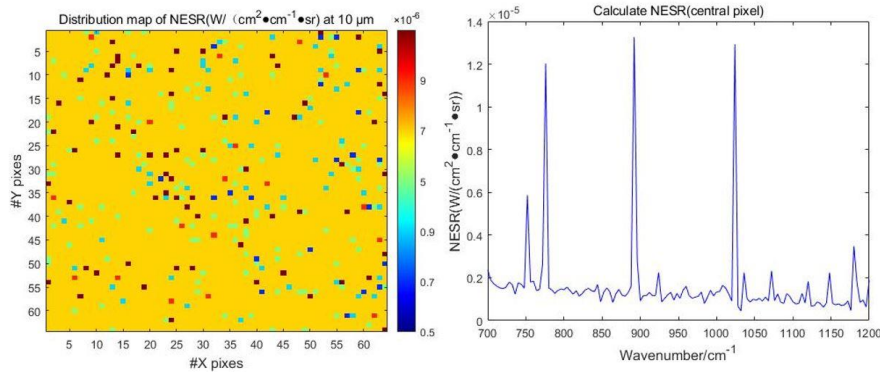


图8 亮温光谱均值曲线 (温度变化小于 2 K)

Fig.8 Brightness temperature spectral mean curves (temperature fluctuation less than 2 K)



(a) NESR 中心区域像元分布 (a) NESR central region pixel distribution map (b) 单像元 NESR 曲线 (b) Single-pixel NESR curve

图9 NESR 中心区域计算 (温度跳动大于 2 K)

Fig.9 Calculation of the central region of NESR(The temperature fluctuation is greater than 2 K)

由图 10 的纵向坐标可以看出，全幅面温度变化幅度很大，跳动幅度约为 100K；如图 11 所示，4 组全波段亮温均值曲线温度变化均为 150K 左右，杂乱无规律，故这 4 组标定后亮温光谱数据立方体远离 303 K 的理想温度值，待鉴别的目标特征峰会被淹没在背景辐射温度基线中，辐射定标无效。因此，在 10 μm 波长切片处，当 NESR 的测量均值大于 NESR 标称参数要求时，采集获得的亮温光谱数据偏差大，辐射定标无效。

#### 4 结论

本文从 NESR 的定义入手，利用 SNR 方法计算得到的 NESR 测量值可以快速、量化地判定辐射定标结果的准确性。详细介绍了辐射定标和 NESR 理论方法，给出了自研成像遥测系统 NESR 标称参数设计

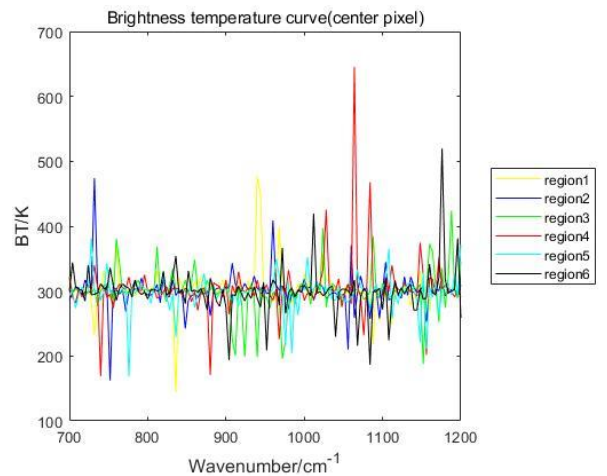


图10 像元亮温光谱曲线 (温度变化大于 100 K)

Fig.10 Brightness temperature spectral curves of central pixel (temperature fluctuation greater than 100 K)

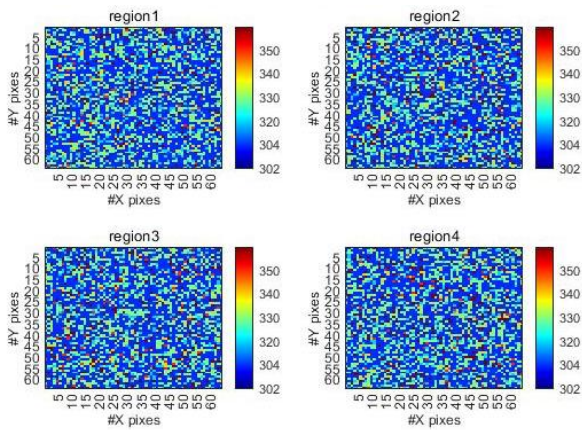


图 11 亮温光谱像元分布 (温度变化大于 100 K)

Fig.11 Brightness temperature spectral pixel distribution  
(temperature fluctuation greater than 100 K)

值,详细介绍了基于NESR的辐射定标结果判定方法。在实验中,通过100组实测数据计算得到光谱辐亮度、亮温和NESR数据的不确定度,由此分析出实验数据重复性好、分散程度小,具备较高的测量精度;选取其中4组实验数据进行测试结果展示和讨论,得出结论:在 $10\mu\text{m}$ 波长处,当NESR中心区域像元均值小于标称参数要求时,采集获得的亮温光谱数据立方体与真实温度偏差小于2K,辐射定标有效;反之,当NESR中心区域像元均值大于标称参数要求时,采集获得的亮温光谱数据立方体远离真实温度,辐射定标无效。

综上所述,利用NESR测量值可以快速、量化地判定红外辐射定标结果的准确性。将此方法应用于红外高光谱成像遥测系统辐射定标的判定,可以提高亮温光谱数据质量,为后续红外高光谱气体识别奠定基础。

### 参考文献:

[1] 袁小春, 杨智雄, 余春超, 等. 长波红外高光谱成像光谱仪的辐射定标[J]. 红外技术, 2015, 37(5): 431-434.  
YUAN Xiaochun, YANG Zhixiong, YU Chunchao, et al. Study of radiation calibration for LWIR hyperspectral imager spectrometer[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(5): 431-434.

[2] 庞鑫宇. 基于黑体定标提高地基红外辐射特性测量系统精度的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2023.  
PANG Xinyu. Research on Improving the Accuracy of Ground-based Infrared Radiation Characteristics Measurement System Based on Blackbody Calibration[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics,

Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2023.

[3] Paule Lapeyre, Rodrigo Brenner Miguel, Kyle Daun. A Bayesian error model for quantifying methane and carbon dioxide column densities from hyperspectral measurements[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2024, 323: 109022-109029.

[4] Renhorn I G E, Svensson T, Boreman G D. Performance of an uncooled imaging interferometric spectrometer with intrinsic background radiation[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(3): 033106.

[5] YANG Z, YU C, ZHENG W, et al. Research on ground-based LWIR hyperspectral imaging remote gas detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(2): 599-606.

[6] 黄思佳, 袁银麟, 翟文超, 等. 噪声等效光谱辐亮度定标系统的性能测评[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(12): 81-90.  
HUANG Sijia, YUAN Yinlin, ZHAI Wenchao, et al. Performance evaluation of noise equivalent spectral radiance calibration system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(12): 81-90.

[7] 沈腊梅. 目标红外辐射特性测量定标关键技术研究[D]. 西安: 中科院西安光学精密机械研究所, 2022.  
SHEN Lamei. Research on Key Technologies for Measurement and Calibration of Target Infrared Radiation Characteristics[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics, Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2022.

[8] 吴越, 朱之贞, 方勇华. 非制冷型长波红外光谱仪的辐射定标方法[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0904001-0904007.  
WU Yue, ZHU Zhizhen, FANG Yonghua. Radiation calibration method using uncooled long-wave infrared spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0904001-0904007.

[9] 吕金光, 梁静秋, 赵百轩, 等. 干涉调制傅里叶变换光谱成像技术[J]. 光学学报, 2024, 45(2): 0200002.  
LV Jinguang, LIANG Jingqiu, ZHAO Baixuan, et al. Interference modulation Fourier transform spectroscopy imaging technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 45(2): 0200002.

[10] Farley V, Chamberland M, Vallières A, et al. Radiometric calibration stability of the FIRST: a long - wave infrared hyperspectral imaging sensor [J]. *Infrared Technology and Applications*, 2007, 6542: 123-130.

[11] ZHENG Weijian, LEI Zhenggang, YU Chunchao, et al. Research on ground-based LWIR hyperspectral imaging remote gas detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(2): 600-605.

[12] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1-2012[S]. 2012.12.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement: JJF 1059.1-2012[S]. 2012.12.