

噪声等效光谱辐亮度定标系统的性能测评

黄思佳¹, 袁银麟², 翟文超², 郑小兵^{2*}, 雷正刚³, 林宇³

- (1. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽合肥 230026;
2. 中国科学院合肥物质研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031;
3. 昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘要: 噪声等效光谱辐亮度 (NESR) 是代表红外遥感器极限探测能力的关键性指标。高灵敏红外遥感器的 NESR 定标需要高稳定、高均匀和充满视场的红外辐射光源, 其光谱辐亮度的不确定度应当显著低于红外遥感器的 NESR。针对一种新型的级联积分球型大孔径 NESR 定标系统, 开展了 NESR 定标不确定度的实验测试研究, 评定了绝对光谱辐亮度的量值溯源、积分球输出的均匀性和稳定性等 11 种不确定性因素的影响。测试结果表明, 在规定的 303~308 K 亮温范围内, 主积分球光谱辐亮度的相对不确定度优于 0.34%, 6~15 μm 波段的 NESR 定标不确定度优于 $0.1\sim 0.0037 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, 验证了新型定标系统应用于高性能红外遥感器 NESR 定标的可行性。

关键词: 噪声等效光谱辐亮度; 红外辐射定标; 积分球; 不确定度

中图分类号: O432.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220509

Performance evaluation of noise equivalent spectral radiance calibration system

Huang Sijia¹, Yuan Yinlin², Zhai Wenchao², Zheng Xiaobing^{2*}, Lei Zhenggang³, Lin Yu³

- (1. School of Environment Science and Optoelectronic, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Noise equivalent spectral radiance (NESR) is a significant index representing the ultimate detection capability of infrared remote sensors. NESR calibration of highly sensitive infrared remote sensor requires an infrared radiation source with high stability, high uniformity and full field of view, and the uncertainty of its spectral radiance should be significantly lower than that of NESR of infrared remote sensor. Aiming at a new large aperture cascade integrating sphere NESR calibration system, this paper carried out experimental testing and research on the calibration uncertainty of NESR, and evaluated the influence of 11 uncertainty factors, such as the magnitude traceability of absolute spectral radiance, the uniformity and stability of integrating sphere output. The test results show that the relative uncertainty of the spectral radiance of the primary integrating sphere is better than 0.34% within the specified brightness temperature range of 303-308 K; the NESR calibration uncertainty is better than $0.1\sim 0.0037 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ within the wavelength range of 6-15 μm , which verifies the feasibility of applying the new calibration system to the NESR calibration of high-performance infrared remote sensor.

Key words: noise equivalent spectral radiance; infrared radiation calibration; integrating sphere; uncertainty

收稿日期: 2022-07-21; 修订日期: 2022-08-11

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0504602); 国家自然科学基金 (41805019)

作者简介: 黄思佳, 男, 博士生, 主要从事红外遥感器定标方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 郑小兵, 男, 教授, 博士, 主要从事光辐射精确测量、卫星遥感器的辐射定标技术、光学遥感技术等方面的研究。

0 引言

以红外傅里叶变换光谱仪和成像仪为代表的红外遥感器,是大气、陆地和海洋环境监测的重要手段,在目标跟踪识别等领域也有重要的应用^[1-2]。噪声等效光谱辐亮度 (Noise Equivalent Spectral Radiance, NESR) 是红外遥感器的关键技术指标,反映红外遥感器能够分辨的最小光谱辐亮度变化。近年来,国内外研发的高性能红外傅里叶变换光谱仪,其典型 NESR 值已达到或小于 $0.1 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ^[3]。

NESR 定义为红外遥感器的信噪比为 1 时的入瞳处光谱辐亮度^[4]。为了准确评估红外遥感器的 NESR,需要建立高精度、高稳定和充满视场的红外定标光源。对于信噪比高于 $1000@10 \mu\text{m}$ 的高性能红外遥感器,通常要求定标光源光谱辐亮度的不确定度优于 $7 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}@10 \mu\text{m}$ (计算方式见第 2.1 节)。

目前,国内外 NESR 定标通常采用可变温黑体辐射源,基于两个温度点的光谱辐亮度之差和红外遥感器观测黑体辐射的信噪比,获取 NESR 定标结果 (见第 2 节)。这种方法一般适用于视场较小的非成像红外辐射计,定标光源可采用出光孔径小于 100 mm 的腔式黑体。例如,中国计量科学研究院建立的红外遥感亮度温度国家计量标准装置中,真空标准黑体腔的开口直径为 30 mm ,温度不确定度为 $50 \text{ mK}@300 \text{ K}/10 \mu\text{m}$ ($k=2$)^[5-6],相当于光谱辐亮度不确定度 $0.8 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ($k=2$)。美国标准与技术局 (National Institute of Standards and Technology) 研制的导弹防御传递辐射计 (The Missile Defense Transfer Radiometer) 系统中,将 1 mm 孔径的黑体辐射扩束为 70 mm 的准直光束,采用基于低温辐射计的真空红外傅里叶变换光谱仪,在 193 K 温度下, $4\sim 15 \mu\text{m}$ 光谱范围内可实现优于 0.3% 不确定度的相对光谱测量^[7-9],其中 $10 \mu\text{m}$ 的绝对光谱辐亮度定标不确定度为 1% 。

近年来,采用阵列焦平面器件的红外成像遥感器,一般要求 NESR 定标光源的出光孔径大于 200 mm 且光谱辐亮度动态可调,以实现全视场和宽动态范围定标。受到发光面温度均匀性和发射率均匀性的限制,腔式或平面型黑体出光孔径的增大将显著降低辐亮度的均匀性和稳定性,增大辐亮度的不确定度。此外,普朗克定律决定了黑体温度调节将同时改变其辐

亮度的光谱分布,这意味着宽动态范围 NESR 定标将引入定标光源光谱变化的不确定性。为满足成像和非成像类红外遥感器的 NESR 定标需求,采用自主研发的宽动态范围级联式红外积分球,研制了一种定标光源出光孔径 250 mm 的 NESR 定标系统^[10-11],利用溯源于国家计量标准的内置低温腔式黑体,可实现 $3\sim 15 \mu\text{m}$ 的 NESR 定标,兼具黑体的高精度和积分球的大口径、高均匀性和宽动态范围可调的功能特点。

为确认 NESR 定标系统能够满足红外遥感器的 NESR 定标要求,开展了定标系统的不确定度测试研究,依据 NESR 的测量方程,分析了绝对光谱辐亮度的量值溯源、积分球输出的均匀性和稳定性等 11 种不确定性影响因素,实验验证了 $6\sim 15 \mu\text{m}$ 波段 NESR 定标不确定度可满足高性能红外遥感器的 NESR 定标要求。

1 NESR 定标方法

NESR 定标方法一般有电子学和光学两种。电子学方法^[12-14]分析和测试红外遥感器的电子学噪声,计算设定入射光谱辐亮度下的 NESR。光学方法利用红外遥感器观测设定光谱辐亮度的光源,由输出信号得到 NESR。光学方法是一种直接测量法,需要高准确性的定标光源。文中采用光学方法,按照 NESR 的定义,其测量方程表述为:

$$NESR(\lambda) = \frac{L_1(\lambda) - L_2(\lambda)}{SNR(\lambda)} \quad (1)$$

式中: $L_1(\lambda)$ 和 $L_2(\lambda)$ 分别为规定测试条件下的定标光源高值和低值光谱辐亮度; λ 为波长; $SNR(\lambda)$ 为红外遥感器观测定标光源时的信噪比。重复多次观测定标光源,取红外遥感器输出信号的平均值与标准偏差的比值作为信噪比^[15]。

根据 NESR 的定义, NESR 的定标技术流程^[16-18]如图 1 所示。利用标准黑体校准定标光源,确定高值和低值光谱辐亮度 $L_1(\lambda)$ 和 $L_2(\lambda)$ 的量值。红外遥感器多次观测定标光源,由其输出信号的平均值和标准偏差,获得信噪比 $SNR(\lambda)$ 。根据公式 (1) 计算红外遥感器的 NESR(λ)。

红外遥感器的 NESR 定标系统主要由光源仓、工作仓、定标仓以及真空低温控制系统组成,如图 2 所示。光源仓内安装的级联镀金积分球是定标光源^[10-11],由四个内置碳纤维灯的子球和一个内径 600 mm 、出

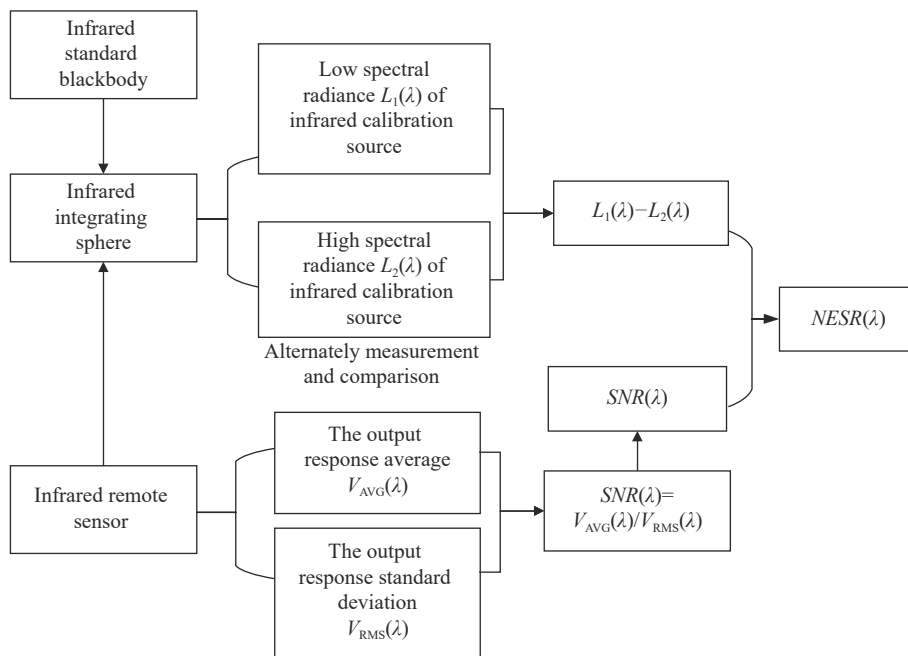


图 1 NESR 定标技术流程图

Fig.1 Flow chart of NESR calibration

光口直径 250 mm 的主积分球组成。子球发出的红外辐射通过可调光阑进入主积分球。调节子球的碳纤维灯点亮数量和可调光阑的通光孔径,主积分球可实

现 140~1 600 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 的宽动态范围光谱辐亮度输出。工作仓配置了电动三维平移台,用于调整待定标红外遥感器的位置,使其光轴对准主积分球出光口中心。

定标仓内部安装了低温 (283~363 K) 腔式黑体,作为光谱辐亮度的溯源标准。一台红外傅里叶变换光谱仪通过旋转反射镜交替观测黑体和主积分球的输出,实现光谱辐亮度的量值传递,确定主积分球的光谱辐亮度。

真空低温控制系统可实现光源仓、工作仓和定标仓的真空度和温度的独立控制,真空度可调范围为 10^{-5} Pa~常压,温度可调范围为 190~320 K,工作仓热沉温度稳定性优于 1 K。为了降低主积分球背景辐射波动,主积分球的控温精度优于 0.15 K。

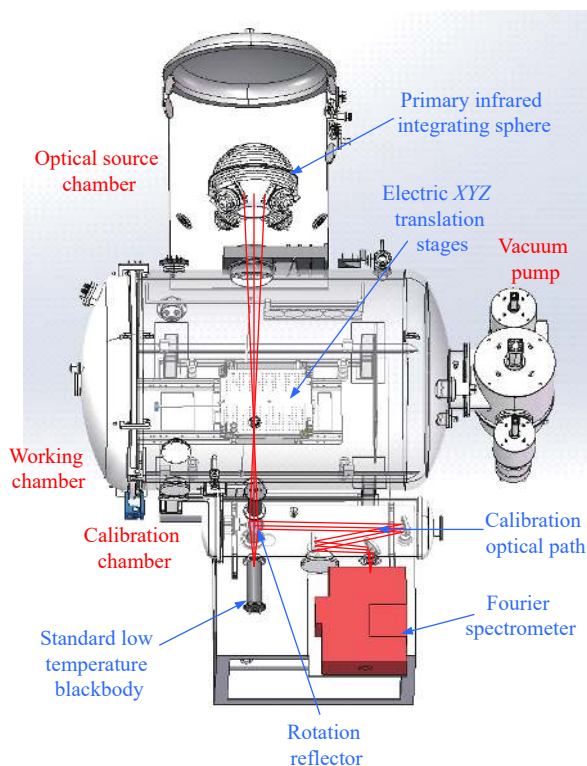


图 2 红外遥感器 NESR 定标系统组成示意图

Fig.2 Diagram of an infrared remote sensor NESR calibration system

2 NESR 定标系统的性能评测

2.1 NESR 定标的不确定性因素

依据 NESR 的测量方程式 (1) 和不确定度评定规范^[19], NESR 测量不确定度可表示为:

$$u[NESR(\lambda)] = \frac{\sqrt{u^2[L_1(\lambda)] + u^2[L_2(\lambda)]}}{SNR(\lambda)} \quad (2)$$

式中: $u[NESR(\lambda)]$ 为 NESR 的定标不确定度,是判断 NESR 定标系统是否满足使用要求的主要参数;

$u[L_1(\lambda)]$ 和 $u[L_2(\lambda)]$ 分别为主积分球高值和低值光谱辐亮度的不确定度。在规定的入射光谱辐亮度 $L_1(\lambda)$ 和 $L_2(\lambda)$ 下, 信噪比 $SNR(\lambda)$ 主要由红外遥感器自身的特性 (例如读出电路噪声、热噪声以及 $1/f$ 噪声) 决定^[2], 可视作为常量。这样 $u[NESR(\lambda)]$ 取决于主积分球的光谱辐亮度不确定度 $u[L_1(\lambda)]$ 和 $u[L_2(\lambda)]$ 。

因 $L_1(\lambda)$ 和 $L_2(\lambda)$ 的测量过程完全相同, 它们的不确定度可认为是相同的, 则公式 (2) 可写为:

$$u[NESR(\lambda)] = \frac{\sqrt{2u^2[L_1(\lambda)]}}{SNR(\lambda)} \quad (3)$$

对于信噪比 $SNR > 1000@10 \mu\text{m}$ 的高性能红外遥感器, 如果要求 NESR 的定标不确定度 $u[NESR(\lambda)] < 0.01 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}@10 \mu\text{m}$, 则要求定标光源的光谱辐亮度不确定度 $u[L_1(\lambda)] < 7 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}@10 \mu\text{m}$ 。

根据图 1, 主积分球的光谱辐亮度不确定度来源于以下 11 种不确定性因素:

- (1) 标准黑体的光谱辐亮度不确定度 $u_1(\lambda)$;
- (2) 旋转反射镜角度重复性引起的标准黑体和主积分球光谱辐亮度测量不确定度 $u_2(\lambda)$ 和 $u_3(\lambda)$;
- (3) 定标仓的温度波动引起的背景辐射测量不确定度 $u_4(\lambda)$;
- (4) 傅里叶变换光谱仪测量标准黑体和积分球的重复性 $u_5(\lambda)$ 和 $u_6(\lambda)$;
- (5) 傅里叶变换光谱仪的非线性 $u_7(\lambda)$ 和非稳定性 $u_8(\lambda)$;
- (6) 积分球的非稳定性 $u_9(\lambda)$ 、面非均匀性 $u_{10}(\lambda)$ 和角度非均匀性 $u_{11}(\lambda)$ 。

2.2 不确定度的测评

实验评测了不确定度 $u_1(\lambda)\sim u_{11}(\lambda)$ 所使用的仪器, 结果如表 1 所示。设定光谱辐亮度范围为 $1040\sim 1130 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, 对应于 $303\sim 308 \text{ K}$ 黑体在 $10 \mu\text{m}$ 处的光谱辐亮度输出, 这是红外成像光谱仪 NESR 定标的一种典型条件。

表 1 光谱辐亮度定标不确定度测量仪器

Tab.1 Measuring instruments of spectral radiance calibration uncertainty

No.	Instruments	Parameters
1	Standard Fourier spectrometer (Bruker VERTEX 80 V)	Spectral resolution: $\geq 0.06 \text{ cm}^{-1}$; Spectral range coverage: $3\text{-}14.5 \mu\text{m}$
2	Standard low temperature blackbody	Temperature range: $283\text{-}363 \text{ K}$; Blackbody cavity emissivity: ≥ 0.999
3	Infrared radiometer (KT15.99 IIP)	Spectral range: $9.6\text{-}11.5 \mu\text{m}$; Instability: $< 0.01\%$ /month
4	Rotation reflector	Rotation angle range: $0^\circ\text{-}270^\circ$; Rotation angle repeatability: 0.003° ; Adjustment precision: 0.2°

2.2.1 $u_1(\lambda)$ 的评测

根据普朗克定律, 标准黑体的光谱辐亮度由其温度和发射率决定。标准黑体材质和腔形结构在不改变的前提下, 其发射率可视作为不变量。标准黑体的控温精度为 50 mK ^[20], 在此控温精度下, 标准黑体的光谱辐亮度相对不确定度为:

$$u_1(\lambda) = \frac{L(T + \Delta T, \lambda) - L(T, \lambda)}{L(T, \lambda)} \quad (4)$$

式中: L 为标准黑体的光谱辐亮度; $T = 302\sim 310 \text{ K}$ 为设定温度; $\Delta T = 50 \text{ mK}$ 为控温精度。标准黑体的光谱辐亮度由普朗克公式计算^[1]:

$$L(T, \lambda) = \frac{c_1}{\pi\lambda^5[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1]} \quad (5)$$

式中: $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2$; $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$;

T 为标准黑体的设定温度, K ; λ 为波长, μm 。如图 3 所示, 在设定的温区和温控精度下, 标准黑体的光谱辐亮度不确定度 $u_1(\lambda) < 0.08\%$, 考察波长 $\lambda = 10 \mu\text{m}$ 。

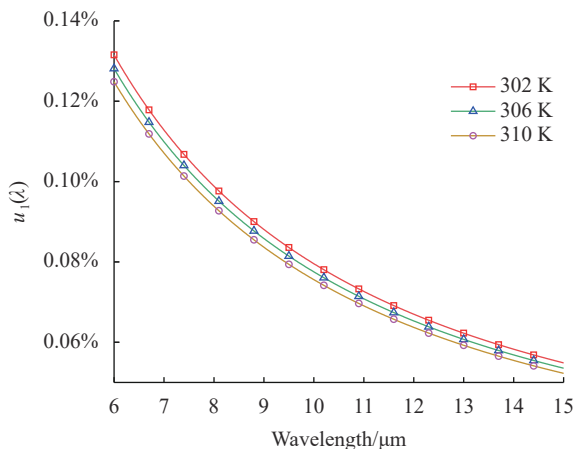


图 3 标准黑体的光谱辐亮度不确定度

Fig.3 Uncertainty of spectral radiance of standard blackbody

2.2.2 $u_2(\lambda)$ 和 $u_3(\lambda)$ 的评测

傅里叶变换光谱仪通过旋转反射镜, 交替观测标准黑体和红外主积分球, 实现绝对光谱辐亮度的量值传递, 如图 4 所示。通过傅里叶变换光谱仪的实测数据, 可以获得交替观测引入的不确定度 $u_2(\lambda)$ 和 $u_3(\lambda)$, 它们实际上取决于旋转反射镜的角度重复性。

以傅里叶光谱仪对准标准黑体中心时的角度为 0° , 改变旋转反射镜的角度, 傅里叶光谱仪的输出信号变化如图 5(a) 所示。旋转反射镜对准黑体的最大角度允差为 0.2° , 引入的标准黑体观测不确定度为:

$$u_2(\lambda) = \frac{S(T_B, 0.2^\circ, \lambda) + S(T_B, -0.2^\circ, \lambda) - 2S(T_B, 0^\circ, \lambda)}{2S(T_B, 0^\circ, \lambda)} \quad (6)$$

式中: S 为傅里叶光谱仪的输出信号。实验测量结果

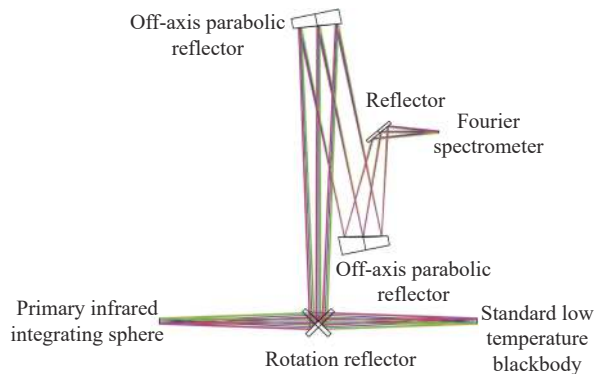
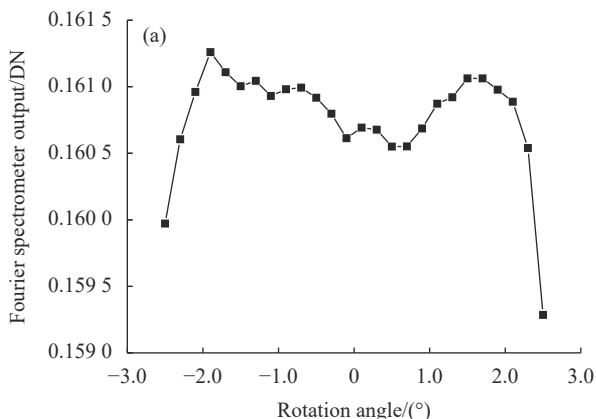


图 4 定标光路示意图

Fig.4 Schematic diagram of calibration optical path

见图 5(b), 可知 $6\sim 15 \mu\text{m}$ 波段范围内, $u_2(\lambda) < 0.025\%$ 。

利用同样的方法, 可以得到傅里叶光谱仪观测主积分球的不确定度, 如图 6 所示。因主积分球距傅里

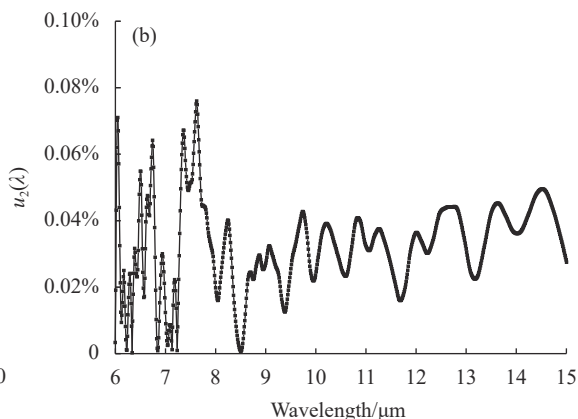


图 5 (a) 傅里叶变换光谱仪观测标准黑体的输出信号随反射镜旋转角度的变化, $T=303 \text{ K}, \lambda=10 \mu\text{m}$; (b) 旋转反射镜角度重复性引入的不确定度 $u_2(\lambda)$

Fig.5 (a) Fourier transform spectrometer output changing with the rotation angle of reflector when observing standard blackbody @ $T=303 \text{ K}, \lambda=10 \mu\text{m}$; (b) Uncertainty $u_2(\lambda)$ due to angle repeatability of rotating mirror

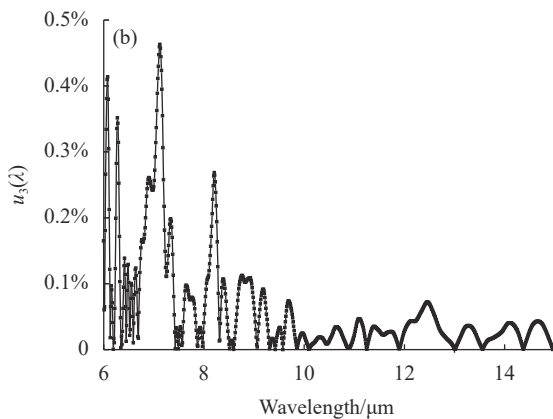
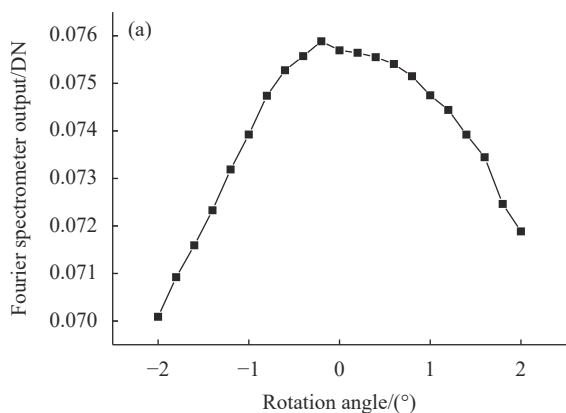


图 6 (a) 傅里叶变换光谱仪观测红外积分球的输出信号随反射镜旋转角度的变化, $T=153 \text{ K}, \lambda=10 \mu\text{m}$; (b) 旋转反射镜角度重复性引入的不确定度 $u_3(\lambda)$

Fig.6 (a) Fourier transform spectrometer observation of output signal of infrared integrating sphere changing with the rotation angle of reflector, $T=153 \text{ K}, \lambda=10 \mu\text{m}$; (b) The uncertainty $u_3(\lambda)$ affected by angle repeatability of rotating mirror

叶光谱仪的光程更长, 为保证主积分球出光口充满傅里叶光谱仪的视场, 旋转反射镜对准主积分球的最大角度允差为 0.1° 。

$$u_3(\lambda) = \frac{S(T_1, 0.1, \lambda) + S(T_1, -0.1, \lambda) - 2S(T_1, 0, \lambda)}{2S(T_1, 0, \lambda)} \times 100\% \quad (7)$$

其中, 主积分球的温度设定为 $T_1=153\text{ K}$, 由制冷系统控制^[8], 红外积分球的输出信号随反射镜旋转角度变化如图 6(a) 所示, $u_3(\lambda)$ 的测试结果如图 6(b) 所示。

2.2.3 $u_4(\lambda)$ 的评测

$u_4(\lambda)$ 是定标仓的温度波动引起的背景辐射不确

定度。改变定标仓的设置温度, 利用傅里叶光谱仪输出信号的相对变化评估 $u_4(\lambda)$, 即

$$u_4(\lambda) = \frac{S(T_{C1}, \lambda) - S(T_{C2}, \lambda)}{S(T_{C1}, \lambda)} \times \frac{\Delta T}{T_{C1} - T_{C2}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $T_{C1} = 173\text{ K}$, $T_{C2} = 153\text{ K}$ 为定标仓的设置温度区间, 在该区间内的任意温度, 控温精度 $\Delta T=0.15\text{ K}$ 。图 7(a) 为设置温度为 153 K 时定标仓的温度波动情况。 $S(T_{C1}, \lambda)$ 和 $S(T_{C2}, \lambda)$ 为傅里叶变换光谱仪连续测量 36 次的输出信号的平均值。图 7(b) 为定标仓温度波动引入的背景辐射不确定度, 可知 $u_4(\lambda) < 0.036\%$ 。

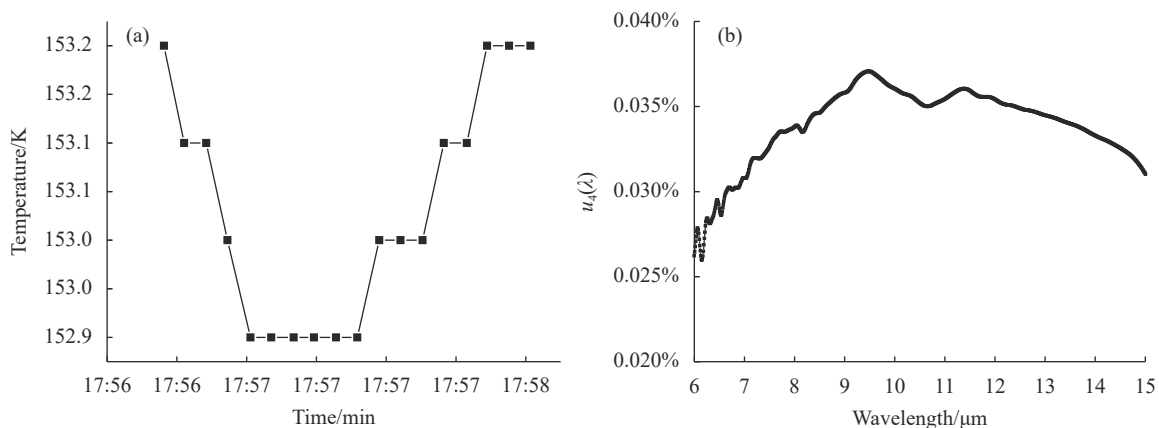


图 7 (a) 定标时段温度变化曲线; (b) 背景辐射引起的不确定度 $u_4(\lambda)$

Fig.7 (a) Temperature curve of calibration period; (b) Uncertainty $u_4(\lambda)$ effected by the background radiation

2.2.4 $u_5(\lambda)$ 和 $u_6(\lambda)$ 的评测

傅里叶变换光谱仪测量标准黑体的重复性 $u_5(\lambda)$ 见公式 (9), 真空低温定标仓的工作温度设置为

153 K , 傅里叶变换光谱仪测量标准黑体 36 次, 第 i 次 (i 从 1~36) 测量响应值为 $S(T_B, \lambda, i)$ 。 $u_5(\lambda)$ 的测量结果如图 8 所示。

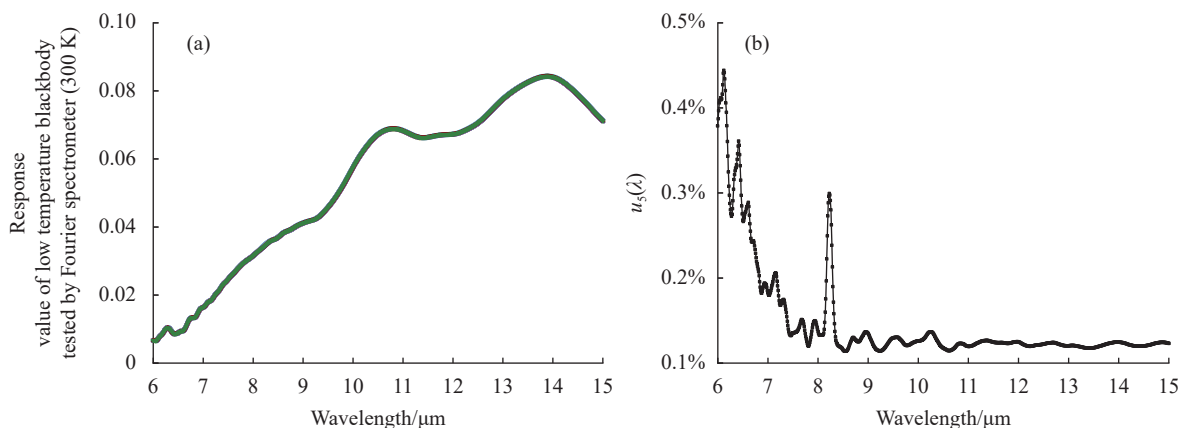


图 8 (a) 傅里叶变换光谱仪测量标准低温黑体 (300 K) 响应值曲线; (b) 重复性测量结果 $u_5(\lambda)$

Fig.8 (a) Response curve of standard low temperature blackbody (300 K) measured by Fourier transform spectrometer; (b) Repeatability measurement results $u_5(\lambda)$

$$u_5(\lambda) = \frac{1}{\langle S(T_B, \lambda, i) \rangle} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M [S(T_B, \lambda, i) - \langle S(T_B, \lambda, i) \rangle]^2}{M-1}} \times 100\% \quad (9)$$

傅里叶变换光谱仪测量主积分球的重复性 $u_6(\lambda)$ 的数据处理方法与 $u_5(\lambda)$ 相同。 $u_6(\lambda)$ 的测量结果如图 9

所示,其中标准光源的四个内置碳纤维灯子积分球同时点亮输出^[7]。

2.2.5 $u_7(\lambda)$ 的评测

根据 NESR 的测量要求,主积分球和标准黑体的温度范围均设置为 303~308 K@10 μm 。在此狭窄的温度范围内,傅里叶变换光谱仪的非线性 $u_7(\lambda)$ 可忽略,即 $u_7(\lambda) \approx 0$ 。

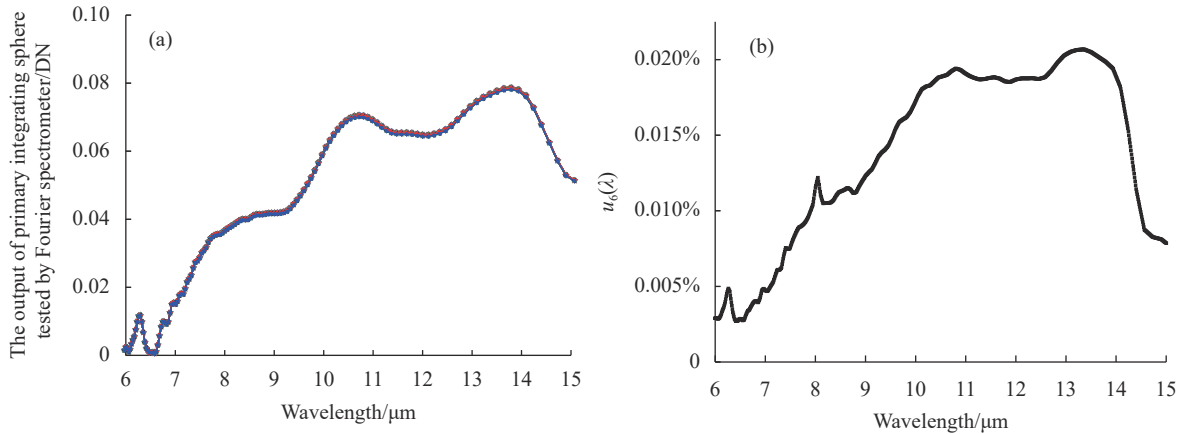


图 9 (a) 傅里叶变换光谱仪测量主积分球的输出信号; (b) 主积分球重复性的测量结果 $u_6(\lambda)$

Fig.9 (a) Output signal of primary integrating sphere tested by Fourier spectrometer; (b) Repeatability of primary integrating sphere $u_6(\lambda)$

2.2.6 $u_8(\lambda)$ 的评测

傅里叶变换光谱仪输出信号随时间的波动用非

稳定性 $u_8(\lambda)$ 表征,见公式 (10):

$$u_8(\lambda) = \frac{1}{\langle S(T_B, \lambda) \rangle} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M [S(T_B, \lambda, i) - \langle S(T_B, \lambda) \rangle]^2}{M-1}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: $u_8(\lambda)$ 为规定时间段内的非稳定性; $S(T_B, \lambda, i)$ 为第 i 次测量的输出信号; $\langle S(T_B, \lambda) \rangle$ 为时间段内多次测

量的输出信号平均值; M 为总的测量次数。 $u_8(\lambda)$ 的测量结果如图 10 所示。

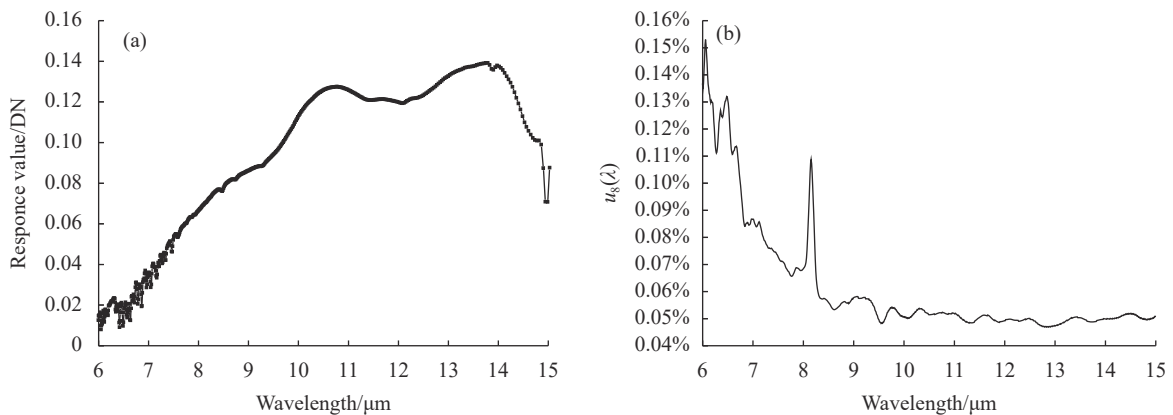


图 10 (a) 傅里叶变换光谱仪的输出信号平均值; (b) 非稳定性 $u_8(\lambda)$

Fig.10 (a) Average of Fourier spectrometer output signal; (b) Instability $u_8(\lambda)$

2.2.7 $u_9(\lambda)$ 的评测

$u_9(\lambda)$ 表示主积分球的光谱辐亮度随时间的变化, 评测方法见参考文献 [6], 计算公式同公式 (10)。图 11 所示为红外辐射计观测主积分球 30 min 的辐亮度相对变化, 计算可得非稳定性为 0.052%@10 μm 。

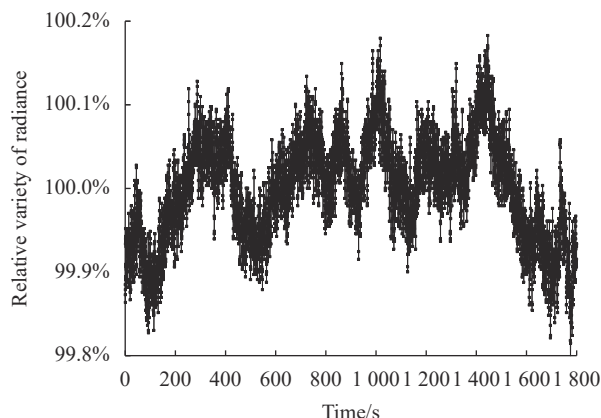


图 11 主积分球 30 min 的辐亮度相对变化

Fig.11 Relative radiance of primary integrating sphere during 30 min

2.2.8 $u_{10}(\lambda)$ 的测评

$u_{10}(\lambda)$ 表示主积分球的面非均匀性, 评测方法见参考文献 [6]。将红外辐射计放置于测试平台, 分别沿水平和垂直方向进行网格测量, 各采样点测量四次并取均值, 同时开启四个子积分球。测量结果如图 12 所示, 可知面非均匀性为 0.25%@10 μm 。

2.2.9 $u_{11}(\lambda)$ 的测评

$u_{11}(\lambda)$ 表示主积分球的角度非均匀性, 评测方法见参考文献 [8]。将红外辐射计放置于测试平台, 以 1°为间隔旋转, 测量角度范围为-20°~20°, 每个角度测量四

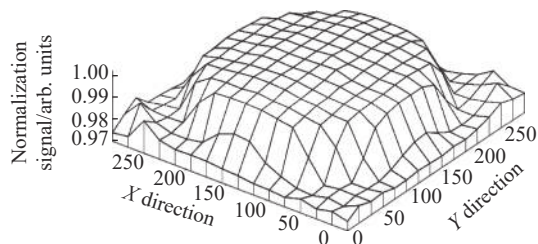


图 12 主积分球的面均匀性测量结果

Fig.12 Surface uniformity measurement result of primary integrating sphere

次并取均值作为该角度下测量值。图 13 所示为主积分球角度非均匀性测量结果, 可知 $u_{11}(\lambda)=0.15\%@10 \mu\text{m}$ 。

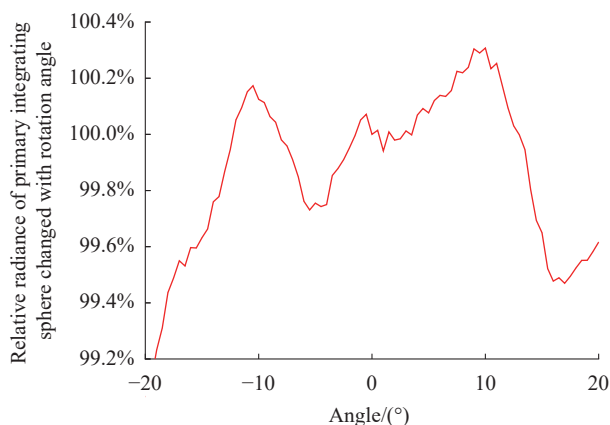


图 13 主积分球随测量角度变化的相对光谱辐亮度

Fig.13 Relative spectral radiance of primary integrating sphere changed with measurement angle

根据上述不确定度影响因素 $u_1(\lambda) \sim u_{11}(\lambda)$ 的测量分析和测量结果, 取 10 μm 处的不确定度贡献数值进行汇总, 见表 2, 计算得到红外积分球的光谱辐亮度输出合成不确定度为 0.34%。

表 2 NESR@10 μm 定标不确定度因素表

Tab.2 The uncertainty scale of NESR@10 μm calibration

Uncertainty factors	Symbol	Relative uncertainty@10 μm
Uncertainty of spectral radiance output of standard blackbody	$u_1(\lambda)$	0.081%
Uncertainty of standard blackbody spectral radiance (by Fourier spectrometer)	$u_2(\lambda)$	0.025%
Uncertainty of integrating sphere spectral radiance (by Fourier spectrometer)	$u_3(\lambda)$	0.020%
Background radiation testing uncertainty in optical source chamber and calibration chamber	$u_4(\lambda)$	0.036%
Repeatability of standard blackbody (by Fourier spectrometer)	$u_5(\lambda)$	0.13%
Repeatability of infrared integrating sphere (by Fourier spectrometer)	$u_6(\lambda)$	0.017%
The nonlinearity of Fourier spectrometer	$u_7(\lambda)$	0
The instability of Fourier spectrometer	$u_8(\lambda)$	0.051%
The instability of infrared integrating sphere	$u_9(\lambda)$	0.052%
The plane inhomogeneity of infrared integrating sphere	$u_{10}(\lambda)$	0.25%
The angular nonuniformity of infrared integrating sphere	$u_{11}(\lambda)$	0.15%
Uncertainty of spectral radiance calibration	$U(\lambda)$	0.34%

作为 NESR 定标的示例,以傅里叶变换光谱仪作为待定标的仪器,观测主积分球光谱辐亮度值 $L_1(\lambda)$ 和 $L_2(\lambda)$,相当于观测 308 K 和 303 K 的黑体辐射,测量结果如图 14(a) 所示。信噪比 SNR 的结果如图 14(b) 所示,其中 10 μm 处的信噪比为 1473。

根据图 14 的测量数据和公式 (1), 计算得到傅里叶变换光谱仪的 NESR, 如图 15(a) 所示。依据公式 (3),

NESR 的测量不确定度可写为:

$$u[\text{NESR}(\lambda)] = \frac{\sqrt{2u^2[L_1(\lambda)]}}{\text{SNR}(\lambda)} = \frac{\sqrt{2[L_1(\lambda)U(\lambda)]^2}}{\text{SNR}(\lambda)} \quad (11)$$

其中,相对不确定度 $U(\lambda) = 0.34\%$, 由表 2 的最后一行给出。根据公式 (11) 测评傅里叶变换光谱仪的 NESR 定标不确定度,如图 15(b) 所示。可以看出,10 μm 处的 NESR 不确定度为 $3.7 \times 10^{-3} \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

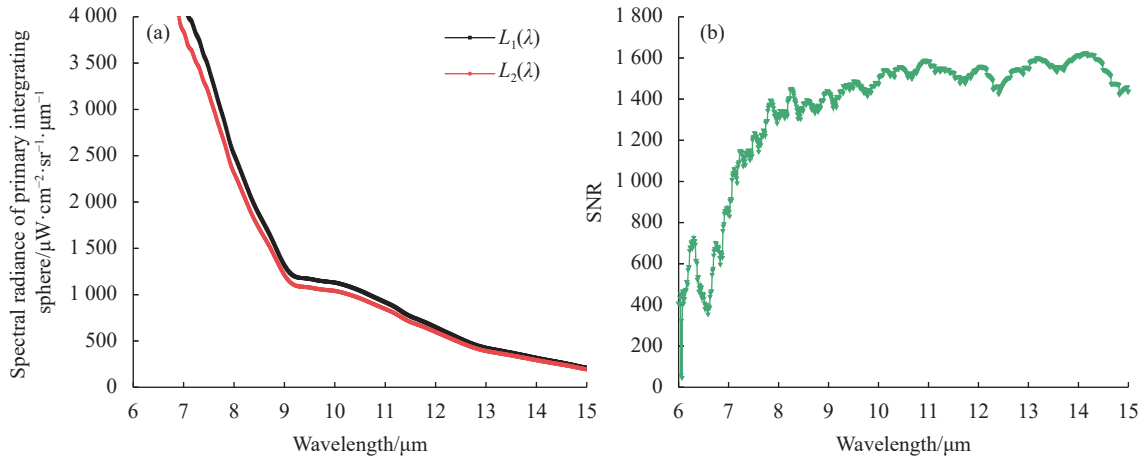


图 14 (a) $L_1(\lambda)$ 和 $L_2(\lambda)$ 的实测结果; (b) 傅里叶变换光谱仪的信噪比

Fig.14 (a) Measurement result of $L_1(\lambda)$ and $L_2(\lambda)$; (b) SNR of Fourier spectrometer

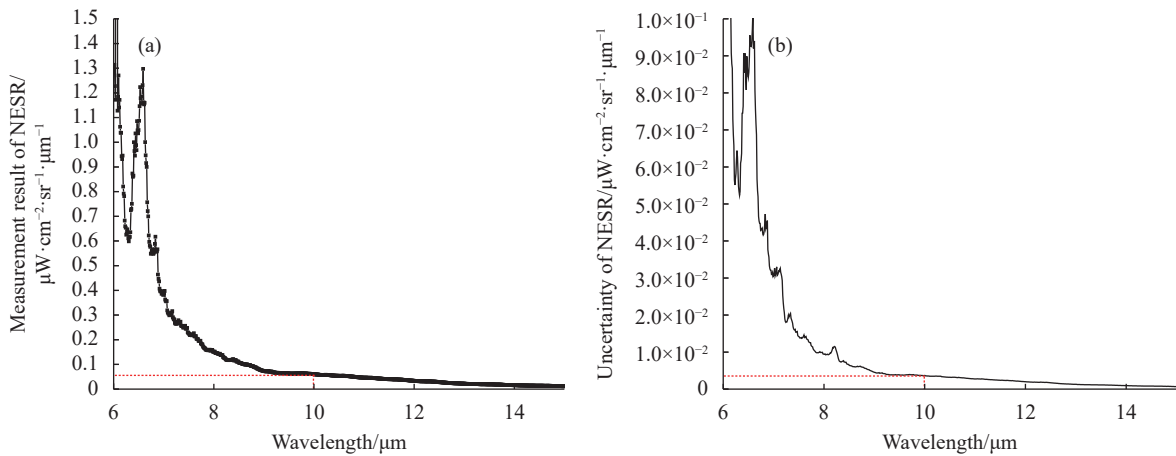


图 15 (a) NESR 定标结果; (b) NESR 的定标不确定度

Fig.15 (a) Calibration result of NESR; (b) Uncertainty of NESR

3 结论

高性能红外遥感器的 NESR 定标需要稳定、高精度和宽动态范围定标系统的支持。针对一种采用级联式红外积分球作为定标光源的新型定标系统,开展了 NESR 定标不确定度的实验测量研究,为评估定标

系统的性能提供依据。

定标系统内置溯源于国家计量标准的低温黑体,通过傅里叶变换光谱仪交替观测低温黑体和主积分球,实现光谱辐亮度 $L(\lambda)$ 的绝对量值传递。主积分球的光谱辐亮度不确定度是 NESR 定标系统的关键参数。文中基于 NESR 的测量方程,梳理了影响主积分球

光谱辐亮度的 11 项不确定性因素, 通过实验测量逐一确定了它们对光谱辐亮度不确定度的贡献。实验结果表明, 在规定的 303~308 K 亮温范围内, 主积分球光谱辐亮度的相对不确定度优于 0.34%, 6~14 μm 的 NESR 定标不确定度为 $0.1\sim 0.0037 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, 平均值为 $0.015 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。这一数值比目前典型高性能红外遥感器的 NESR 大约小一个量级。

实验结果验证了级联积分球作为红外定标光源的应用可行性。它具有黑体的高精度和稳定性, 同时具有大孔径均匀性和亮温不变条件下的宽动态范围光谱辐亮度调节的优势, 广泛适用于红外遥感器的相对和绝对辐射定标、NESR 定标, 以及线性和稳定性等多项指标检测。

因傅里叶光谱仪内置的硫化铅探测器尚未完成调试, 3~6 μm 的 NESR 定标结果将在后续工作中进行报道。此外, 后期将尝试红外调谐激光导入级联积分球, 通过波长扫描实现光谱定标的功能扩展。

参考文献:

- [1] Lu Wanzhen, Yuan Hongfu, Xu Guangtong. Modern Near Infrared Spectroscopy Technology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2000: 37-45. (in Chinese)
- [2] Li J H, Xue F, Xue L, et al. Performance test of fourier transform infrared imaging spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 201-207. (in Chinese)
- [3] 中国科学院自主研制科学仪器 2022. 傅里叶变换红外光谱辐射分析仪 [EB/OL]. [2022-08-11]. https://www.rhzh.net/others/zky_pdf/zgkxy2022-z1-066.pdf.
- [4] Rentz J H, Engel J R. Passive spectro-radiometer calibration: Radiance responsivity, sensitivity, and radiation reference [C]// Fourier Transform Spectroscopy: New Methods and Applications, OSA Technical Digest, 1999: FWE13.
- [5] Song Jian. Research on the traceability and the on-orbit emissivity measurement method of space primary standard blackbody[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [6] Hao Xiaopeng, Song Jian, Sun Jianping, et al. Vacuum radiance temperature national standard facility for Infrared remote sensors of Chinese Fengyun meteorological satellites [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1845-1851. (in Chinese)
- [7] Kaplan S G, Woods S I, Carter A C. Calibration of IR test chambers with the missile defense transfer radiometer [C]// Proceedings of SPIE, 2013, 8707: 870709.
- [8] Jung T M, Carter A C, Woods S I. Calibration and deployment of a new NIST transfer radiometer for broadband and spectral calibration of space chambers (MDXR) [C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8015: 80150C.
- [9] Chamberland M, Farley V, Giroux J, et al. Development and testing of a hyper-spectral imaging instrument for field spectroscopy [C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5546: 19-36.
- [10] Zhang Mengya, Yuan Yinlin, Zhai Wenchao, et al. Design and test of infrared integrating sphere radiation source with wide dynamic range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0612006. (in Chinese)
- [11] Huang Sijia, Yuan Yinlin, Zhai Wenchao, et al. Design optimization and performance test of infrared integrating sphere radiation source with wide dynamic range (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20210516. (in Chinese)
- [12] Li Xunniu, Zheng Weijian, Lei Zhenggang, et al. Analysis for signal-to-noise ratio of hyper-spectral imaging FTIR interferometer [C]//Proceedings of SPIE, 2013, 8910: 89101P.
- [13] Zheng Weijian, Jin Weiqi, Su Junhong. NESR of long-distance passive infrared telemetering systems [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(9): 512-514. (in Chinese)
- [14] Revercomb H E, Buijs H, Hugh B, et al. Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: Solution to a problem with the high-resolution interferometer sounder [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(15): 3210-3218.
- [15] Wei Dandan, Gan Fuping, Zhang Zhenhua, et al. A study of SNR index setting of infrared imager based on spectrum simulation [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2016, 28(4): 18-23. (in Chinese)
- [16] Wurst N P, Meola J, Perry D L, et al. Measurement and modeling of longwave infrared directional downwelling spectral radiance [C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9611: 96110X.
- [17] Farley V, Villemaire A, Martin C, et al. Performance of the FIRST, a longwave infrared hyperspectral imaging sensor [C]// The International Society for Optical Engineering, Proceedings of SPIE, 2006, 6398: 689487.
- [18] Villemaire A, Martin C, Giroux J, et al. Radiometric calibration of FT-IR remote sensing instrument [C]//Proceedings of SPIE, 1997, 3082: 86-91.
- [19] Liu Zhimin, Liu Feng. Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement JJF1059.1-2012 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2012. (in Chinese)
- [20] 标准低温黑体校准证书. OSR-1608003 [Z]. 北京: 中国计量科学研究院, 2016-08-18.