第37卷第5期
2018年10月

红外与毫米波学报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 37, No. 5
October, 2018

文章编号: 1001-9014(2018)05-0572-06

DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2018.05.009

红外陷阱探测器的光谱辐射定标技术

张 磊[1*], 林志强[2]

(1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027;
2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 遥感信息定量化要求高精度的光谱辐射定标技术支撑, 使传感器获取数据可比较性、测量精度和长期稳定性得到保证, 溯源于低温绝对辐射计的定标技术是发展趋势. 为提高红外绝对光谱响应率定标精度, 在一种薄膜热电堆传感器上加装镀金反射半球, 研制了红外陷阱探测器作为标准传递探测器. 利用电替代技术, 测试了红外陷阱探测器光谱响应线性、空间响应均匀性和稳定性. 通过溯源于低温绝对辐射计的光谱辐射定标系统, 标定了其在 *1.1~3.0 μm* 短波红外波段的绝对光谱响应率, 合成不确定度小于 *1%*. 将红外陷阱探测器应用于红外光谱辐射定标, 可缩短低温绝对辐射计的红外光谱功率标准传递链路并提高定标精度.

关 键 词: 红外辐射定标; 红外陷阱探测器; 低温绝对辐射计; 不确定度
中图分类号: TH741; TP722.5 **文献标识码:** A

Calibration technique of spectral radiation for an infrared trap detector

ZHANG Lei[1*], LIN Zhi-Qiang[2]

(1. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The quantification of remote sensing information requires spectral radiometric calibration technology support with high accuracy. This technology can ensure the comparability, accuracy and long-term stability of sensor data acquisition. Now, the calibration technique traced to the cryogenic absolute radiometer is the trend of development. In order to improve the accuracy of infrared absolute spectral response, a gold-plated hemisphere reflector is added to a thermopile detector. So an infrared trap detector is developed as the standard transfer detector. The spectral response linearity, spatial response uniformity and stability of an infrared trap detector are tested by electric substitution technology. The authors also have established an infrared radiometric calibration system based on the cryogenic absolute radiometer. The combined relative uncertainty in the spectral responsivity of this detector from 1.1~3.0 μm is below 1%. The application of infrared trap detector to radiometric calibration can improve the calibration accuracy of sensors through its shorter calibration chain.

Key words: infrared radiometric calibration, infrared trap detector, cryogenic absolute radiometer, uncertainty
PACS: 07.57.Ty, 07.60.Dq

引言

定量化遥感的发展要求各类传感器有高精度的光谱响应率标准来标定, 从而使遥感数据可比较性、测量精度和长期稳定性得到保证. 遥感传感器的辐射定标技术是遥感信息定量化的关键技术之一. 依据不同的定标阶段, 遥感传感器的辐射定标可以分为卫星在发射前的实验室定标、发射后的在轨星上

收稿日期: 2017-12-25, 修回日期: 2018-01-29 Received date: 2017-12-25, revised date: 2018-01-29
基金项目: 国家自然科学基金(61775209)
Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61775209)
作者简介(Biography): 张 磊(1978-), 男, 安徽六安人, 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系讲师, 博士, 主要研究领域为红外辐射定标、光学精密测量.
* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: lzhlzh@ustc.edu.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定标以及场地替代定标. 其中,发射前的实验室定标是辐射定标的基础. 在实验室定标技术研究中,传统的方式都是溯源于黑体辐射源. 自上世纪 90 年代以来,随着低温技术以及超导技术的发展,为提高遥感器辐照度和辐亮度标准精度,一些国际标准组织和国外发达国家计量机构,如美国国家标准与技术研究院(NIST) 、英国国家物理实验室(NPL) 、德国物理技术研究院(PTB) 等以低温绝对辐射计为初级标准,研制出一系列标准传递探测器,建立了新型高精度光谱辐射定标系统[1-5]. 在国内,近些年来中科院安徽光学精密机械研究所、中国计量科学研究院、西安应用光学研究所等单位在溯源于低温绝对辐射计的辐射定标研究领域也进行了相关探索,取得了一定成果[6-8].

为提高遥感数据可靠性及有效性,适应我国空间遥感载荷定标的要求,安徽光学精密机械研究所于 1996 年在国内率先引进低温绝对辐射计,并将其用于高精度光辐射定标和标准传递,完成了基于探测器的可见光—近红外光辐射定标和标准传递,使用三片无窗光电二极管研制了反射式陷阱探测器[6,8]. 并且,为了将低温绝对辐射计的光谱辐射标准扩展至红外波段,逐步建立了基于红外单色仪的宽光谱比较系统.

由于地球上许多物质在短波红外波段具有独特的光谱特性, 在空间对地观测中,为了使得大气成分监测、农作物估产及土壤水分监测等遥感应用数据能够定量化,该波段的高精度光谱绝对辐射定标十分必要. 但是,在波长 1. 5 μm 以上,由于高稳定功率红外激光器的缺乏,造成低温绝对辐射计的红外光谱绝对功率标准传递链路复杂,实验不便[3].

为解决此难题,在上述工作和设备基础上,研究基于镀金反射半球结构的单片式红外陷阱探测器的设计方法和电替代定标原理,并通过系列化的实验测试,证明它具有良好的线性、空间响应均匀性和稳定性,可用作红外光谱辐射定标的标准传递探测器,缩短标准传递链路并提高红外辐射定标精度.

1　设计和定标方法

标准传递探测器的作用是在定标中建立和传递红外光谱相对和绝对响应刻度,要求具有较高的光谱灵敏度和较宽的光谱响应范围,并且其响应率不受入射光偏振态、功率及光敏面接收光位置等因素影响. 在可见光波段,基于三片无窗光电二极管的反射式陷阱探测器已被公认为最优标准传递探测器[6,9]. 但在红外波段,由于探测器研制及应用水平制约,标准传递探测器的选择和设计呈多样化.

设计的红外陷阱探测器采用薄膜热电堆传感器作为光敏元件,加装镀金半球的反射式陷阱结构,如图 1 所示,半球反射体内金层的光谱反射比如图 2 所示.

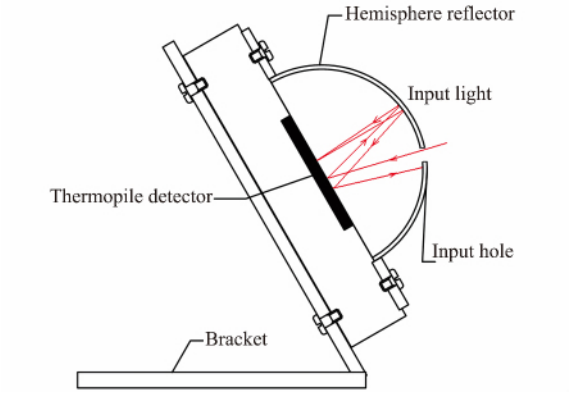


图 1　红外陷阱探测器结构
Fig. 1　Structure of infrared trap detector

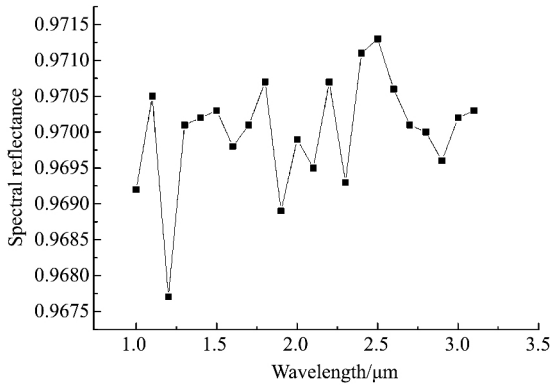


图 2　金层的光谱反射比
Fig. 2　Spectral reflectance of gold layer

薄膜热电堆传感器具有可进行电标定的电替代引脚,前期测试表明该传感器性能优良,改进后可作为标准传递探测器在红外光谱辐射定标中使用[10]. 在设计的红外陷阱探测器中,热电堆传感器安装于发黑处理的铝制腔体中,光敏面同水平面成 70°,顶部安装直径 20 mm 的镀金反射半球,传感器的光敏面中心点与半球上的入光孔中心点位于同一水平面上.

当一束功率为 P,波长为 λ 的红外光入射至传感器光敏面上时,若光敏面窗口反射率和金黑吸收层的反射率之和为 $r(\lambda)$,则热电堆传感器黑层的吸收率为 $1-r(\lambda)$. 此时,传感器对红外光功率的吸

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

收为:

$$P_{ab} = P[1 - r(\lambda)] \quad . \quad (1)$$

假设反射半球的反射率为 $R_{eff}(\lambda)$,当辐射功率为 P 的红外光射入带有反射半球的红外陷阱探测器时,首次反射时被光敏面黑层吸收的功率为 $P[1 - r(\lambda)]$,而被反射半球反射的红外光再次射入黑层的功率可表示为 $R_{eff}(\lambda)Pr(\lambda)$. 经多次反射之后,黑层所吸收的辐射功率 P_{abs} 为:

$$P_{abs} = [1 - r(\lambda)]P\{1 + R_{eff}(\lambda)r(\lambda) + [R_{eff}(\lambda)r(\lambda)]^2 + [R_{eff}(\lambda)r(\lambda)]^3 + \cdots\} \quad , \quad (2)$$

化简后即为:

$$P_{abs} = \frac{[1 - r(\lambda)]P}{1 - R_{eff}(\lambda)r(\lambda)} \quad , \quad (3)$$

由式(1)和式(3)可知,反射半球的增加而产生的增益 $G(\lambda)$ 为:

$$G(\lambda) = \frac{P_{abs}}{P_{ab}} = \frac{1}{1 - R_{eff}(\lambda)r(\lambda)} \quad . \quad (4)$$

根据式(4),增益 $G(\lambda)$ 可通过测量有无反射半球状态下传感器光谱响应电压之比得到. 因而,可先使用单色仪系统得到 $G(\lambda)$ 在各波长下的值,而后由式(4)计算出 $R_{eff}(\lambda)r(\lambda)$. 在已知 $R_{eff}(\lambda)$ 基础上,即可得到金黑吸收层的反射率. 由于金黑吸收层的光谱吸收特性决定了热电堆传感器在不同波长下响应率,因此,$1 - r(\lambda)$ 即为红外陷阱探测器的相对光谱响应率.

若已知 1.55 μm 波长下热电堆传感器的绝对光谱响应率为 $R_0(1550)$,红外陷阱探测器的相对光谱响应率为 $R_r(\lambda)$,则红外陷阱探测器绝对光谱响应率 $R_a(\lambda)$ 为:

$$R_a(\lambda) = \frac{R_0(1550) \cdot G(1550)}{R_r(1550)} R_r(\lambda) \quad . (5)$$

因此,对于基于镀金反射半球的红外陷阱探测器,既可以利用单片反射式陷阱结构消除单片热电堆传感器窗口透过率和反射率的影响,又可采用自定标方法,通过单色仪系统得到其在各个波长下的红外相对光谱响应率曲线; 进而将 1.55 μm 波长下绝对光谱响应 $R_0(1550)$ 代入式(5),得到单色仪扫描波长范围内红外陷阱探测器的绝对光谱响应率 $R_a(\lambda)$.

2 性能测试

标准传递探测器的线性、空间响应均匀性以及稳定性是其定标应用中的重要性能指标,其检测十分必要. 低温绝对辐射计作为初级标准,测量光辐射功率的动态范围有限. 因此,作为次级传递标准的红外陷阱探测器,其线性度需要检测评估. 为了完全消除红外陷阱探测器线性测量中的光源稳定性影响,利用薄膜热电堆传感器中集成的加热电阻对光敏面进行加热,以替代光源入射,其设备如图 3 所示. 实验中,热电堆传感器电替代引脚和 19 kΩ 高稳定标准电阻进行了串联. 将稳压电源的电压值设置为 U_D,设此时标准电阻电压输出为 U_Z,传感器输出电压为 U_T,则传感器响应率 R 为:

$$R = \frac{U_T}{P} = \frac{U_T}{\frac{U_Z}{19\,000}(U_D - U_Z)} \quad . \quad (6)$$

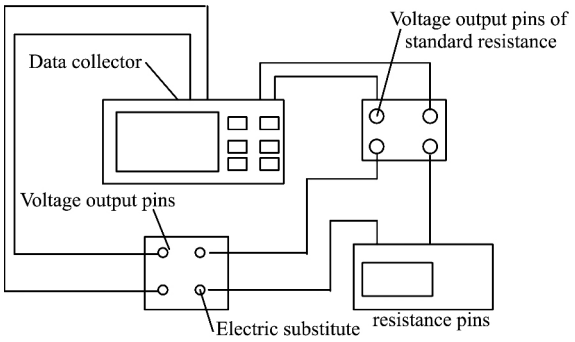


图3 线性测量系统示意图
Fig. 3 The layout of linearity measurement system

图 4 所示为红外陷阱探测器的线性检测结果,由于探测器本底噪声的影响,在电替代功率 40 μW 以下,线性拟合较差.

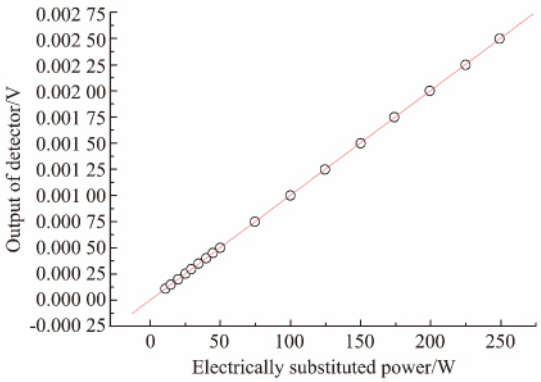


图4 红外陷阱探测器线性拟合图
Fig. 4 Line fitness of infrared trap detector($R = 0.99999$)

类似于线性检测,红外陷阱探测器稳定性检测也使用了热电堆传感器的电替代功能. 在红外陷阱探测器充分预热后,进行了一个小时的检测. 电替代

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

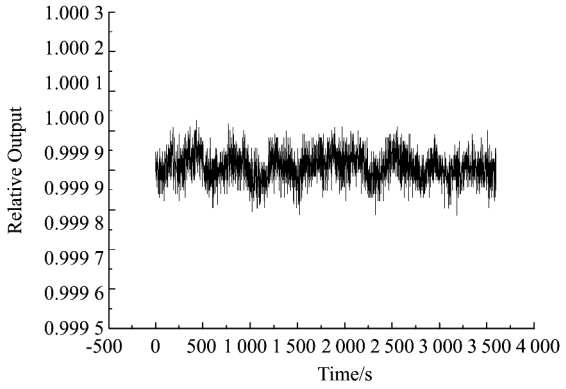


图 5　红外陷阱探测器稳定性
Fig. 5　Stability of infrared trap detector

功率设置为 50 μW，设备连接方式与线性检测相同，图 5 所示为红外陷阱探测器稳定性检测结果，响应均方根起伏为 0.036%.

光敏面材料的制造缺陷以及光敏面上油污灰尘影响了热电堆传感器响应的空间均匀性，其表现为不同区域光敏面响应率的差异，是红外陷阱探测器合成不确定度的主要来源[11]. 为了测量光敏面在不同坐标点下的响应率，实验中通过二维精密扫描平移台来精确移动红外陷阱探测器的位置. 测量结果表现为光源功率空间分布函数与光敏面响应均匀性的卷积. 图 6 所示为检测结果，其响应的空间非均匀性为 0.50%.

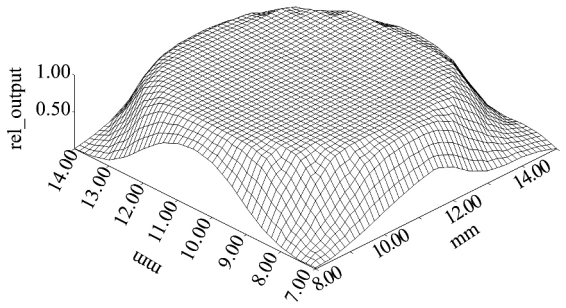


图 6　红外陷阱探测器空间均匀性
Fig. 6　Spatial uniformity of infrared trap detector

3　绝对光谱响应率定标实验

实验中，利用单色仪搭建了如图 7 所示的红外绝对光谱响应定标系统，测试了红外陷阱探测器在波长 1.1 ~ 3.0 μm 下的增益.

在红外绝对光谱响应定标系统中，卤钨灯辐射光被椭球反射镜汇聚于单色光入光狭缝处，而后通过单色仪内部光栅分光来实现单色光输出，并在出口狭缝处得到灯丝像. 单色仪外的离轴抛物反射镜同单色仪的光学系统严格匹配，将单色仪出光狭缝精确成像于红外陷阱探测器光敏面上. 在离轴抛物反射镜与探测器间安装有红外滤光片和光阑，其中滤光片可消除光栅分光导致的多级光谱，光阑用于滤除杂散光及使得光路调整更加方便. 在定标系统设计中，光源分光光路和狭缝成像光路各成独立模块，以利于精密调试定标光路. 增益的测量值及不确定度分别如图 8 和图 9 所示.

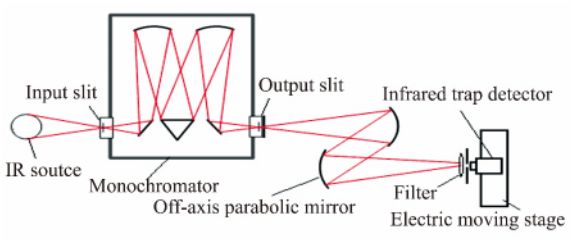


图 7　红外绝对光谱响应定标系统示意图
Fig. 7　Layout of infrared absolute spectral response calibration system

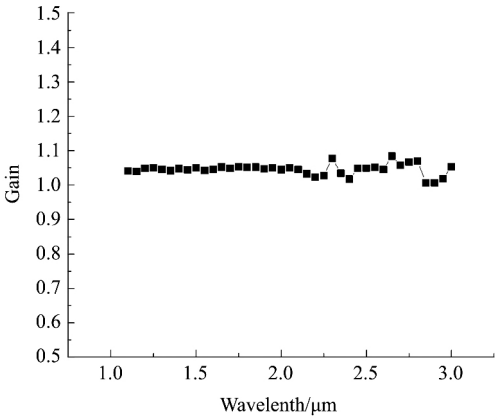


图 8　红外陷阱探测器的增益
Fig. 8　Gain of infrared trap detector

将镀金反射半球的反射率 0.97 代入式(4)中，所得的红外陷阱探测器相对光谱响应率如图 10 所示. 而后，利用近红外辐射定标系统，对传感器在 1.55 μm 波长处绝对光谱响应率进行了标定，并连同此波长处的增益代入式(5)，得到红外陷阱探测器在单色仪出射波长范围内的绝对光谱响应率，如图 11 所示.

由图 8 可知，红外陷阱探测器在各个波长点上的增益都大于 1，证明了镀金反射半球的红外陷阱结构的有效性. 图 9 中，增益不确定度在波长大于 2.2 μm 时较大，其原因是由单色仪出射光功率的减弱而造成

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

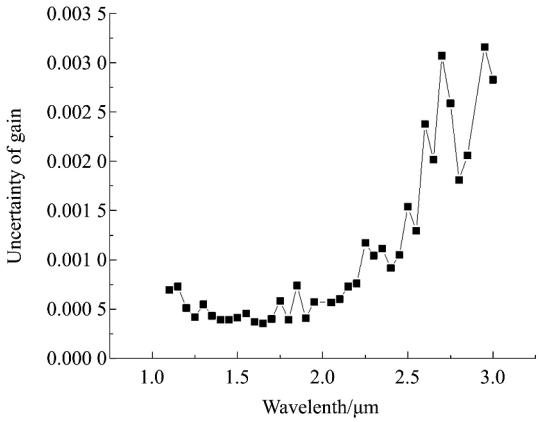


图9 增益测量的不确定度
Fig. 9 Uncertainty of gain

了探测器响应输出值较低,从而本底噪声对不确定度影响相对增大. 图11 则表明红外陷阱探测器的响应率随波长发生起伏变化,无一定规律. 当其作为红外标准传递探测器使用时,必须在红外绝对光谱响应定标系统中进行连续光谱功率响应标定.

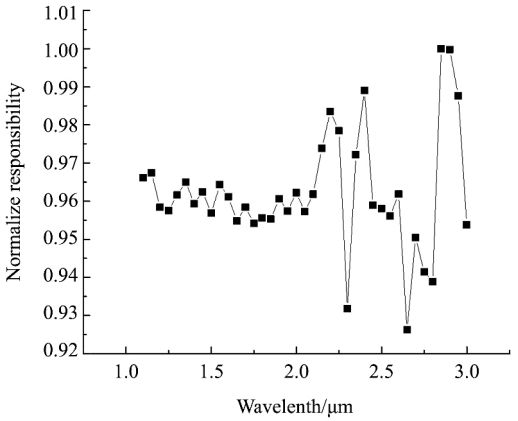


图10 红外陷阱探测器相对光谱响应率
Fig. 10 Normalize responsibility of infrared trap detector

4 不确定度分析

由式(5)可知,在红外陷阱探测器的所测功率范围内,其绝对光谱响应率的标准不确定度如下:

$$u^2[R_u(\lambda)] = \left[\frac{\partial R_a(\lambda)}{\partial R_0(1550)}\right]^2 u^2[R_0(1550)] + \left[\frac{\partial R_a(\lambda)}{\partial G(1550)}\right]^2 u^2[G_0(1550)] + \left[\frac{\partial R_a(\lambda)}{\partial R_r(1550)}\right]^2 u^2[R_r(1550)] + \left[\frac{\partial R_a(\lambda)}{\partial R_r(1550)}\right]^2 u^2[R_r(\lambda)] \quad , \quad (7)$$

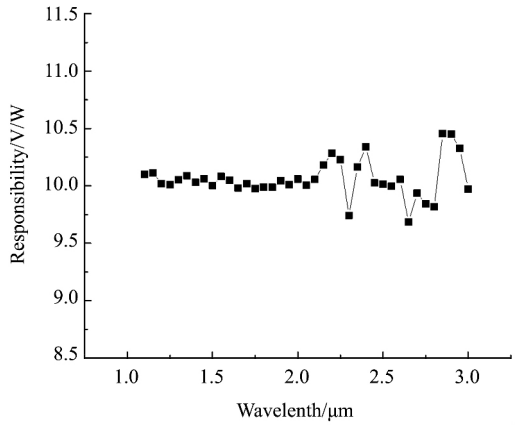


图11 红外陷阱探测器绝对光谱响应率
Fig. 11 Absolute responsibility of infrared trap detector

相对标准不确定度由式(7)可得:

$$u_r[R_a(\lambda)] = u[R_a(\lambda)]/R_a(\lambda) = \sqrt{u^2[R_a(\lambda)]/R_a^2(\lambda)} \quad . \quad (8)$$

设薄膜热电堆传感器在1.55 μm下绝对光谱响应率的相对测量不确定度为$\mu[R_a(1550)]/R_a(1550)$,即μ_1;1.55 μm下增益相对测量不确定度为$u[R_a(1550)]/G(1550)$,即u_2;红外陷阱探测器相对光谱响应率的相对测量不确定度为$u[R_r(\lambda)]/R_r(\lambda)$,即$u_3$;1.55 μm下相对光谱响应率的相对测量不确定度为$u[R_r(1550)]/R_r(1550)$,即u_4. 则式(8)简化为:

$$u_r[R_a(\lambda)] = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \quad , \quad (9)$$

对u_1、u_2、u_3和u_4进行计算结果如表1所示.

表1中的不确定度分量都是依据不确定度评估规范,通过对实验数据进行分析计算得到的. 从中看出影响红外陷阱探测器合成不确定度结果的因素主要有:

(1)作为初级标准的低温绝对辐射计自身不确定度,主要来源于其ZnSe窗口透过率的测量.

(2)由红外陷阱探测器响应的线性、空间均匀性和稳定性决定的不确定度,这一部分为合成不确定度的最大来源,是由热电堆传感器的自身器件研制水平决定的.

(3)红外绝对光谱响应定标系统测量不确定度,来源于离轴抛物镜加工面型误差和光源非稳定性.

(4)电信号测量的不确定度,由定标系统中的电信号测试设备精度决定.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　红外陷阱探测器定标不确定度评估

Table 1　Estimated uncertainty budgets of infrared trap detector

不确定度来源		不确定度组成			
		u_1	u_2	u_3	u_4
低温绝对辐射计	加热器功率	2.8×10^{-4}		–	
	窗口透过率散射光	3.2×10^{-4}		–	
	腔体吸收率	1.0×10^{-4}		–	
	非等效因子	1.3×10^{-5}		–	
光源	单色仪稳定性	–		4.0×10^{-3}	
	激光稳定性	3.0×10^{-4}		–	
红外陷阱探测器	线性	3.2×10^{-3}	3.2×10^{-3}	3.7×10^{-3}	3.2×10^{-3}
	空间响应均匀性		5.0×10^{-3}		
	稳定性		3.6×10^{-4}		
	输出电压	2.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	6.2×10^{-4}	3.0×10^{-4}
各组成的不确定度		3.3×10^{-3}	6.0×10^{-3}	6.3×10^{-3}	3.3×10^{-3}
合成不确定度			9.9×10^{-3}		

5　结语

研制了红外陷阱探测器，并在 1.1 ~ 3.0 μm 光谱范围内，搭建红外绝对光谱响应定标系统对其综合性能进行了标定，合成不确定度优于 1%. 热电堆传感器的本底噪声是合成不确定度的最大来源. 结果证明，研制的红外陷阱探测器具有优良的线性、空间响应均匀性和工作稳定性. 以红外陷阱探测器为基础，可以进一步将溯源于低温绝对辐射计的高精度红外标准传递至可测量微弱信号的红外光电探测器，从而研制高精度的红外光谱照度和亮度标准探测器. 作为一种全固化、体积和重量小、功耗低的高精度红外标准传递探测器，红外陷阱探测器在定量化红外遥感领域具有潜在的应用价值，可以解决目前由于高稳定功率的红外激光器的缺乏，而造成的波长 1.5 μm 以上低温绝对辐射计的红外光谱绝对功率标准传递不便的难题.

References

[1] EPPELDAUER G P, LARASON T C, HOUSTON J M, *et al*. IR-enhanced Si reference detectors for one-step scale transfers from 300 nm to 1 000 nm [J]. *Metrologia*, 2014, **49**: 252-257.

[2] KOWALEWSKI M G, JANZ S J. Comparison of spectral radiance responsivity calibration techniques used for backscatter ultraviolet satellite instruments [J]. *Metrologia*, 2015, **52**: 145-154.

[3] EPPELDAUER G P, YOON H W, ZENG J, *et al*. Extension of the NIST spectral power – responsivity calibration service to 2 500 nm [J]. *Metrologia*, 2012, **49**: 112-114.

[4] ZHANG Y, ZHENG ZH J, HU X Q, *et al*. Lake Qinghai: Chinese site for radiometric calibration of satellite infrared remote sensors [J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, **4**(4): 315-324.

[5] TIMO D O, TOMI P, TUOMAS P, *et al*. New source and detector technology for the realization of photometric units [J]. *Metrologia*, 2014, **51**: 276-281.

[6] LI Jian-Jun, ZHENG Xiao-Bing, LU Yun-Jun, *et al*. Accurate calibration of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 350 nm and 1 064 nm [J]. *Acta Physica Sinica* (李健军，郑小兵，卢云君，等. 硅陷阱探测器在 350 ~ 1 064 nm 波段的绝对光谱响应率定标. 物理学报), 2009, **58**(9): 6273-6278.

[7] CHEN Feng, ZHENG Xiao-Bing. The analysis that spectrum not matching of source affects remote sensor precision [J]. *Optics and Precision Engineering* (陈风，郑小兵. 光谱非匹配对于光学遥感器定标精度影响的分析. 光学精密工程), 2008, **16**(3): 415-419.

[8] PANG Wei-Wei, ZHENG Xiao-Bing, LI Jian-Jun, *et al*. Comparison experiment of cryogenic radiometer of different calibration optical path [J]. *Infrared and Laser Engineering* (庞伟伟，郑小兵，李建军，等. 低温绝对辐射计不同定标光路的比对实验. 红外与激光工程), 2016, **45**(3): 0317004.

[9] HEE J L, SEONGCHONGeong P, HEE S P, *et al*. Compact two-element transmission trap detector for 1 550 nm wavelength [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, **26**: 1-6.

[10] ZHANG Lei, ZHENG Xiao-Bing, LIN Zhi-Qiang, *et al*. Calibration of thermopile detectors based upon the information quantification of infrared remote sensing [J]. *Opto-Electronic Engineering* (张磊，郑小兵，林志强，等. 面向定量化红外遥感的热电堆探测器定标技术. 光电工程), 2007, **34**(2): 45-54.

[11] FERRER A, LOPEZ M, CAMPOS J, *et al*. Spatial characterization of cameras for low-uncertainty radiometric measurements [J]. *Metrologia*, 2014, **51**: 316-325.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net