

基于受激参量下转换的红外标准传递辐射计定标技术

盛文阳^{1,2}, 夏茂鹏¹, 李健军¹, 翟文超¹, 郑小兵^{1*}

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 基于受激参量下转换过程产生光子的相关特性, 构建了一套无需制冷且只利用可见光探测器即可实现红外标准传递辐射测量的系统。首先详细描述了该红外标准传递辐射计系统的工作原理, 接着利用标准黑体拟合获取了该系统的定标系数, 由此得到红外标准传递辐射计温度与待测黑体响应值的关系, 最后通过与水浴黑体在相同温度点的响应值所反演获取的辐射温度作比较, 进一步评估和验证了该红外标准传递辐射计系统的不确定度。实验结果表明: 该红外标准传递辐射计测量水浴黑体辐亮度的联合不确定度为 1.64%, 表明该红外标准传递辐射计可作为标准黑体到用户传感器的传递标准。

关键词: 定标; 受激参量下转换; 红外辐射计; 黑体; 辐射温度

中图分类号: O432.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1204001

Calibration technology of infrared standard transfer radiometer based on stimulated parametric down-conversion

Sheng Wenyang^{1,2}, Xia Maopeng¹, Li Jianjun¹, Zhai Wenchao¹, Zheng Xiaobing^{1*}

- (1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Based on the correlation properties of photons generated during the process of the stimulated parametric down-conversion, a system for infrared standard transfer radiation measurement was constructed, which required no refrigeration and only used visible light detector. Firstly, the operating principle of the infrared standard transfer radiometer system was described in detail. Then, the calibration coefficient of the system was acquired by using the standard blackbody fitting, and the relationship between the temperature of the infrared standard transfer radiometer and the response value of the blackbody to be measured was obtained. Finally, the uncertainty of the infrared standard transfer radiometer system was further evaluated and verified by being compared with the radiation temperature retrieved from the response value of water-bath blackbody at the same temperature. The experimental

收稿日期: 2019-07-05; 修订日期: 2019-08-15

基金项目: 中国科学院实验室基金(CXJJ-17S003); 国家自然科学基金(41805019)

作者简介: 盛文阳(1991-), 女, 博士生, 主要从事遥感器高精度定标方面的研究。Email: shengwy@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 郑小兵(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事高精度光学遥感器辐射定标技术、光学遥感等方面的研究。

Email: xzbheng@aiofm.ac.cn

results show that the joint uncertainty of the infrared standard transfer radiometer for measuring the radiation brightness of the water-bath blackbody is 1.64%, indicating that the infrared standard transfer radiometer can be used as the transfer standard of the blackbody to the user sensor.

Key words: calibration; stimulated parametric down-conversion; infrared radiometer; blackbody; radiance temperature

0 引言

随着红外辐射技术的快速发展,其在军事领域的红外侦察、红外雷达和天气预报、环境监测等民用领域都有着广泛的应用。红外辐射测量能力直接决定了红外遥感器能否获取有效数据,这就需要对红外遥感器进行绝对辐射定标^[1]。红外辐射定标就是建立进入辐射计的辐射通量和辐射计的输出值(电压或数字化信号)之间的定量关系,它也是红外遥感信息量化的关键技术之一,因此研制红外标准传递辐射计对黑体辐射源的辐亮度直接定标是目前红外定标发展的基本趋势^[2-4]。红外标准传递辐射计是指能够将红外标准从国家级红外辐射计、凝固点黑体、传输标准点温仪或者可变温度黑体或者标准探测器到用户黑体依次进行传递的仪器^[5],目前常见的红外标准传递辐射计有光谱式辐射计和通道式辐射计。其中光谱式辐射计-傅里叶光谱仪造价昂贵,体积庞大便携性差不适于外场标准传递;而通道式辐射计 TXR(Thermal-Infrared Transfer Radiometer)因其结构的小巧设计紧凑得到广泛的应用。近年来,各国纷纷开展通道式红外辐射计的研究,美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)针对卫星遥感器两个大气窗口(3~5 μm 和 8~12 μm)的红外定标通道研制的需液氮制冷的 TXR,中心波段在 5 μm 和 10 μm 分别采用的是光伏型 InSb 红外探测器和 HgCdTe(MCT)红外探测器,报道了 0.16% 的定标不确定度^[6]。德国 PTB 研制了真空低背景红外遥感亮度温度标准装置(RBCF),建立了温度在 100~703 K,波长为 1~1 000 μm 的红外亮度温度标准,得到低温变温黑体的合成不确定度为 ($k=1$)0.029 K@300 K/10 μm ^[7]。中国科学院安徽光学精密机械研究所自主研制的 TXR^[8],工作仓为真空仓液氮制冷且使用 InSb 红外探测器进行信号采集,报道了中心波段为 5 μm ,通道整体不确定度优于

0.39% 的定标结果,该结果溯源至国家计量研究院^[9]。中国计量科学研究院建立的真空低背景红外亮度温度计量标准装置^[10],形成符合我国红外遥感卫星量值溯源(100~400 K)的红外亮度温度量值传递体系^[11]。

传统定标方法分别是基于标准辐射源和基于标准探测器的辐射定标方法,但随着传递链路的增长不可避免的造成测量精度随着传递环节的增加和逐级降低,为了提高红外辐射定标精度,文中根据目前的非线性光学理论提出基于受激参量下转换效应的定标方案。与传统的红外辐亮度定标方法相比,该方法具有以下优点:(1) 利用 PMT 单光子探测器代替红外探测器,具有更高的探测效率且工作时无需致冷;(2) 不用对单光子探测器进行单独的定标,且不需要精确测量立体角、面积等几何因子^[12]。

文中根据其定标原理的线性响应关系及获取的红外波段输入与可见波段输出的线性关系,构建了一个红外标准传递辐射计系统。通过测量标准黑体的输出值,运用最小二乘法方法拟合得到定标系数,通过定标系数构建辐射亮温对应黑体响应值表,将红外标准传递辐射计所测黑体辐射源的响应值与响应值表数据进行匹配即可反演待测黑体的辐射亮温。文中完成了对水浴黑体辐射亮温的反演,并对其辐亮度的联合不确定度进行了评估。该红外标准传递辐射计可作为标准黑体到用户黑体的传递标准,无需制冷且使用精度更高的可见光探测器实现信号采集。目前采用受激参量下转换机理作红外标准传递辐射计定标黑体的文章尚未见报道。

1 定标原理

受激参量下转换过程实际上属于非线性光学中的差频过程。如图 1 所示,当一束泵浦激光入射到非线性晶体上时,会以一定的转换效率自发分裂为频率为 ω_s 的信号光子和频率为 ω_i 的闲频光子,这个过程是自发参下转换过程,满足能量和动量守恒条件,

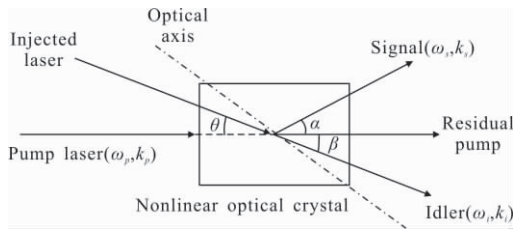


图 1 受激参量下转换示意图

Fig.1 Schematic diagram of stimulated parametric down-conversion

见公式(1)、(2)。待测红外辐射源波长与空闲光子波长相同，红外辐射源沿着空闲光出射方向入射晶体前端面与泵浦光耦合过程，产生受激放大的信号光子，此过程为受激参量下转换过程。

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

$$\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \quad (2)$$

式中： ω_p 、 ω_s 和 ω_i 分别代表抽运光、信号光和闲频光的频率； k_p 、 k_s 和 k_i 分别代表泵浦光、信号光和闲频光的波矢。图 1 中 θ 表示待测红外光源入射角度， α 和 β 分别表示信号光和闲频光出射角度。该实验基于共线相位匹配模式，即图 1 中 $\theta = \alpha = \beta = 0$ 。

红外标准传递辐射计观测红外辐射源的信号响应值 S 可以表示为：

$$S(T) = \int R(\lambda)L_\lambda(\lambda, T)d\lambda \quad (3)$$

式中： $L_\lambda(\lambda, T)$ 为待测红外辐射源的辐亮度； $R(\lambda)$ 为红外标准传递辐射计的绝对辐亮度响应度。

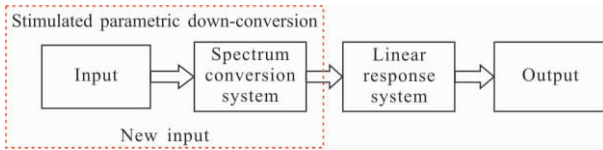


图 2 系统设计思路示意图

Fig.2 Schematic diagram of system design

系统设计的基本思路是假定受激参量下转换的系统是一个线性不变响应系统，只考虑仪器系统的输入与输出，通过测量输入与输出关系反演待定标黑体的辐亮温。

将入射的待测红外辐射源的辐亮度信号 L_i 转换为受激参量下转换产生的可见光的信号辐亮度 L_s ，可用下式表示^[13]：

$$L_s(\lambda_s) = C \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right) \cdot I_p \cdot \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_s}\right)^2 \cdot L_i \cdot \alpha \quad (4)$$

式中：耦合系数 $C = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 l^2}{n_p n_s n_i \epsilon_0 c \lambda_s}$ ； Δk 为相位失配量； L_i

为黑体辐射源的辐亮度； λ_p 、 λ_s 和 λ_i 分别表示泵浦源波长、受激下转换后产生的可见光波长和待测红外辐射源的波长； n_p 、 n_s 、 n_i 分别表示泵浦光、可见光和红外辐射源在晶体内的折射率； d_{eff} 为晶体的非线性系数； l 为晶体长度； ϵ_0 是真空中介电常数； c 是光在真空中的速度； α 表示泵浦光和红外辐射源在晶体内的耦合系数，由于实验中采用黑体辐射源，可以认为其光束直径大于泵浦光，则耦合系数 α 为 1。

考虑三波在晶体的相位失配和黑体辐射源的每个红外波段能够独立进行受激参量下转换过程，则红外标准传递辐射计测量黑体辐射源在光谱范围 $\lambda_{i1} \sim \lambda_{i2}$ 区间时响应值为^[14]：

$$S_s(T_s) = \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 l^2}{n_p n_s n_i \epsilon_0 c \lambda_i} \times \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right) \times \frac{P_p}{\pi \omega_0} \times \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_s}\right)^2 \times L_i d\lambda_i \quad (5)$$

式中： λ_{i1} 和 λ_{i2} 为待测红外辐射源光谱上下限； P_p 为入射泵浦光功率； ω_0 为泵浦光束腰。

在实验室环境下，红外标准传递辐射计对黑体进行观测时，在系统线性响应范围内探测器的输出信号值 $S(T)$ 可以由下式表示：

$$S(T) = R[L_i(\lambda_i) + L_j] \quad (6)$$

式中： R 为探测器的有效响应度；假设 $L_i(\lambda_i)$ 为待测黑体辐射源的辐亮度； L_j 为红外标准传递辐射计系统自身光机结构热辐射及背景辐亮度的总和。

黑体的有效发射率为 $\epsilon(\lambda)$ ，辐射温度为 T ，则黑体辐射源的辐射亮度 $L_i(\lambda_i)$ 可以表示为：

$$L_i(\lambda_i) = \epsilon(\lambda_i) B(\lambda_i, T) \quad (7)$$

其中， $B(\lambda_i, T)$ 为黑体的 Planck 公式^[13]，则：

$$B(\lambda_i, T) = \frac{c_1}{\lambda_i^5 \{\exp[c_2/(\lambda_i T)] - 1\}} \quad (8)$$

式中： c_1 为第一辐射常数 $(3.741 5 \pm 0.000 3) / \pi \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ； c_2 为第二辐射常数 $(1.438 79 \pm 0.000 19) \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

可将探测器信号值 $S(T)$ 简化成只与待测黑体辐射源温度 T 相关的形式，将公式(6)~(8)代入公式(5)，合并后得：

$$S(T) = a S_s(T_s) + b = a \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 l^2}{\epsilon_0 c} \cdot \frac{P_p}{\pi \omega_0} \cdot \frac{\text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)}{n_p n_s n_i \lambda_s^2} \cdot$$

$$\left(\frac{\lambda_s}{\lambda_i}\right)^2 \cdot L d\lambda_i + b = a \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 F^2}{\epsilon_0 c} \cdot \frac{P_p}{\pi \omega_0^2} \cdot \frac{\text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)}{n_i n_p n_s \lambda_s^2} \cdot \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_i}\right)^2 \cdot \frac{c_1}{\lambda_i^5 \{\exp[c_2/(\lambda_i T)] - 1\}} d\lambda_i + b \quad (9)$$

式中：系数 a 与背景辐射无关是红外标准传递辐射计系统的固有特性； b 是由 n 个发射率、温度的辐射源引起的红外辐亮度的总和，与待测红外辐射源温度无关，但不可忽略。

将上述定标模型简化为输出信号与黑体的辐射亮温成线性关系的函数，令 $f(T) = \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 F^2}{\epsilon_0 c} \cdot \frac{P_p}{\pi \omega_0^2} \cdot \frac{\text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)}{n_i n_p n_s \lambda_s^2} \cdot \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_i}\right)^2 \cdot \frac{c_1}{\lambda_i^5 \{\exp[c_2/(\lambda_i T)] - 1\}} d\lambda_i$ 则可将公式(9)可简化为：

$$S(T) = a \cdot f(T) + b \quad (10)$$

式中： $f(T)$ 表示上述模型在不同温度下积分函数。

2 定标装置

根据上述定标原理，搭建如图 3 所示的实验装置。本装置分为相关光子产生、相关光子探测和黑体辐射源辐射 3 个部分。

(1) 相关光子产生部分：532 nm 连续单波长激光器(相干公司 Verdi-v18, $P_{\text{max}}=18 \text{ W}$)作为泵浦源，氧化镁掺杂的周期极化铌酸锂 (MgO:PPLN) 晶体 (50 mm×3 mm×1.5 mm, 周期为 10.62 μm, 温度设置 25°) 为产生相关光子的非线性晶体，光电二极管 PMT 为单光子探测器。如图 3 所示，泵浦光依次经过小孔光阑 1、激光稳定器 LPC、小孔光阑 2 的作用是高反镜入射格兰泰勒棱镜中。其中小孔光阑 1 和 2 的作用是保证泵浦光的准直输出和消除部分非高斯成

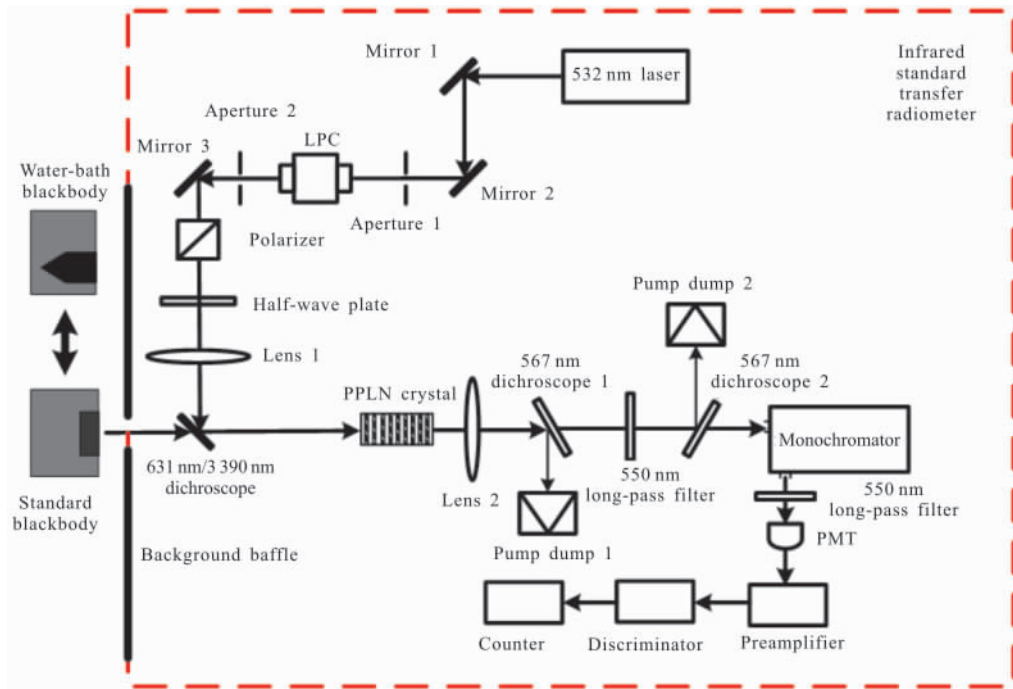


图 3 红外标准传递辐射计定标黑体系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of blackbody system for infrared standard transfer radiometer calibration

分，LPC 保证了激光器的稳定性。泵浦光进入格兰泰勒棱镜后，依次经过 532 nm 半波片、长焦透镜 1 ($f=120 \text{ mm}$)、631 nm/3390 nm 二向色镜反射到 PPLN 晶体中发生参量下转换过程，晶体后端面出射的光是

631 nm 波段、3390 nm 波段和残余的 532 nm 波段的组合光束。相关光子探测部分：组合光束经短焦透镜 2 ($f=80 \text{ mm}$)、567 nm 二向色镜、550 nm 长通滤光片、567 nm 二向色镜后入射单色仪，经单色仪(线宽设置

为 1 nm)、550 nm 长通滤光片、入射光电倍增管 PMT 中,后经前置放大器、甄别器、光子计数器后完成对 631 nm 信号波段光子的计数。其中,泵浦光经格兰泰勒棱镜起偏后变成垂直偏振,满足参量下转换准相位匹配要求;通过改变半波片旋转角度来改变泵浦光的偏振状态,用于背景扣除;631 nm/3 390 nm 二向色镜 45°放置,使黑体辐射源和泵浦源能够共线入射 PPLN 晶体;两个 567 nm 二向色镜和 550 nm 的长通滤光片用于消除残余泵浦光,并且镜片通过 45°放置,避免泵浦光在镜面间多次反射,起到进一步抑制杂散光的作用。

黑体辐射源辐射部分:标准黑体在 313.15~368.15 K 温度范围内选择 5 个温度点(40、55、70、85、95 °C),测量每个温度点光谱测量范围为 585~635 nm 的光子计数。黑体辐射源距离 631 nm/3 390 nm 二向色镜 100 mm,两者之间安装背景挡板,在保证有效通光孔径的前提下,减少其他红外辐射进入黑体腔。为了保证黑体在每一个温度设置点上的辐射温度稳定,需等待黑体运行 45 min 后开始测量。该红外标准传递辐射计采用全光学结构,无需液氮制冷,以可见信号测量替代红外信号测量。

3 红外标准传递辐射计定标系数拟合

标准黑体辐射源是宽光谱光源,其光谱中的每一波段都能够独立进行受激参量下转换过程,那么整个系统的输出信号是所有的光谱光子数求和。用在某一个温度下测量的光谱总光子计数作为该温度下系统的响应值,则:

$$C_r = C_t - C_s \tag{11}$$

式中: C_t 表示系统在受激参量下转换过程输出光谱的总响应值; C_s 表示在自发参量下转换过程输出光谱范围的总响应值; C_r 表示该系统在黑体辐射源某一温度下的实际响应值。

采用单色仪进行单波长扫描,扫描步长间隔设置为 1 nm,光子计数器的计数时间设置为 10 s。将整个测量光谱(585~635 nm)中所有波段的光子计数值求和值作为该温度下辐亮度信号响应值 $S(T)$ 。分别记录标准黑体不同温度点 T 和红外标准传递辐射计的信号响应值 $S(T)$ 的值。结果见表 1。

表 1 标准黑体在辐亮度计各温度点处的光子计数值

Tab.1 Photon counts of standard blackbody at different temperature of radiometer

Standard blackbody temperature/K	Photon counts/10 s
313.15	4.06×10 ⁶
328.15	8.50×10 ⁶
343.15	9.13×10 ⁶
358.15	9.95×10 ⁶
368.15	1.11×10 ⁷

采用最小二乘法建立标准黑体温度 T 和红外标准传递辐射计所测量到的黑体响应 $S(T)$ 之间的关系,通过反演获取的定标系数 a 、 b 值见表 2。

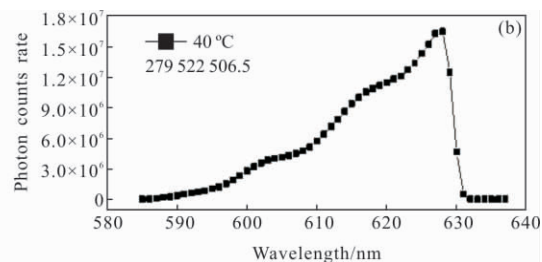
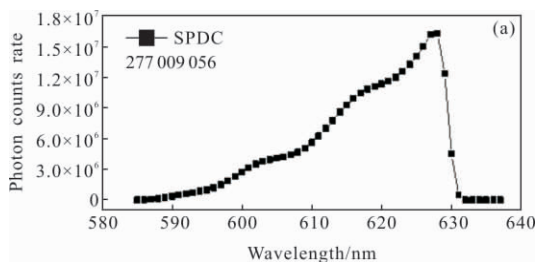
表 2 拟合定标系数 a 、 b 值

Tab.2 Fitting calibration coefficient a , b

Calibration coefficient	a	b
Value	2.00×10 ²⁰	1 023 260

4 定标水浴黑体

要获取待测黑体在该标准辐射计下实际的绝对响应值,需扣除整个系统的背景。将待测水浴黑体放置于原标准黑体的位置,同样的,在 313.15~368.15 K 温度范围内选择 5 个温度点(40、55、70、85、95 °C),测量每个温度点光谱测量范围为 585~635 nm 的光子计数,其光子速率光谱分布曲线如图 4 所示。



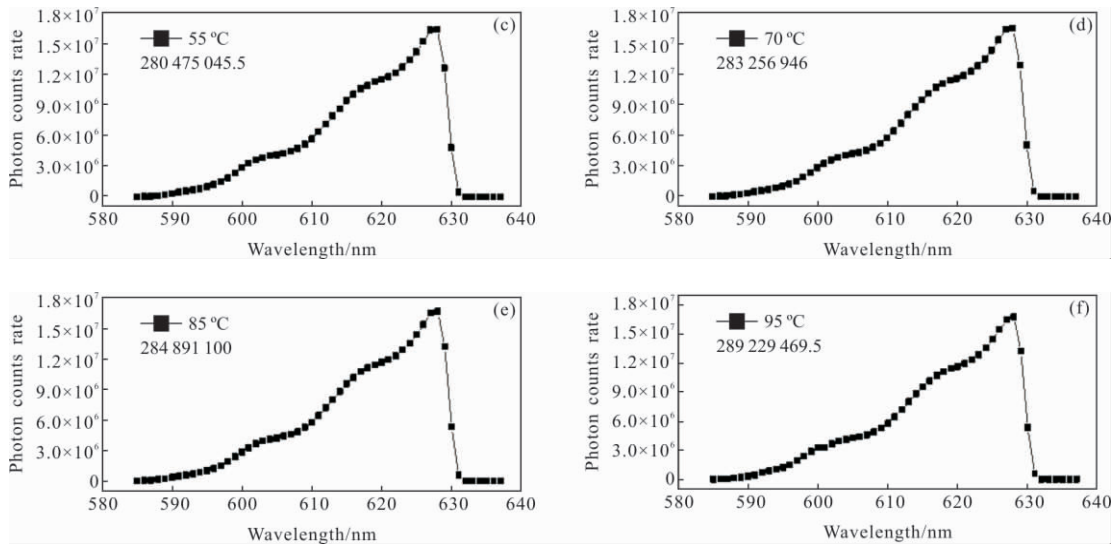


图 4 红外标准传递辐射计测量水浴黑体各温度下的输出光谱曲线

Fig.4 Output spectral curves of infrared standard transfer radiometer to measure different temperature water-bath blackbody

根据公式(11)对测量结果进行校正,校正后结果见表 3。

表 3 水浴黑体在幅亮度计各温度点处的光子计数值

Tab.3 Photon counts of water-bath blackbody at different temperature of radiometer

Water-bath temperature/K	Photon counts/10 s
313.15	4.03×10^6
328.15	7.93×10^6
343.15	9.02×10^6
358.15	9.71×10^6
368.15	1.07×10^7

通过表 2 所得定标系数 a, b , 构建辐射与绝对响应值关系表, 以水浴黑体的光子计数输出值为查找对象, 反演得到水浴黑体在不同温度下的辐射亮温见表 4。

表 4 反演水浴黑体的辐射亮温

Tab.4 Inversion of bright temperature of water-bath blackbody

Water-bath temperature/K	Temperature inversion/K	Temperature difference value/K
313.15	313.03	-0.21
328.15	326.83	-1.52
343.15	342.83	-0.37
358.15	357.53	-0.81
368.15	367.15	-1.15

5 不确定度分析

黑体辐射源定标红外标准传递辐射计不确定主要来源有:红外标准辐射计不确定度 u_R 、黑体辐射源辐亮度不确定度 u_L 。

红外标准辐射计不确定度 u_R 包括激光器输出稳定性 u_{R1} , 通道透过率不确定度 u_{R2} , 电测仪表不确定度 u_{R3} , 计数器测量不确定度 u_{R4} 和最小二乘法分度计算不确定度 u_{R5} 等。

$$u_R^2 = u_{R1}^2 + u_{R2}^2 + u_{R3}^2 + u_{R4}^2 + u_{R5}^2 \quad (12)$$

实验中可将整个系统在某一功率条件下所探测的光子计数值的稳定性不确定度作为 $u_{R1} \sim u_{R4}$ 的合成不确定度为 0.42%。

$$u_{R5} = \frac{\sigma_a}{a} \quad (13)$$

式中: σ_a 为用拟合得到系数 a 值的标准偏差, 可得分度计算 $u_{R5} = 0.35\%$ (328.15 K)。则根据公式(12)得到红外标准辐射计系统不确定度 $u_R = 0.54\%$ 。

黑体辐射源亮度不确定度的主要来源有:黑体辐射源温度测量的不确定度 u_{L1} ;黑体辐射源有效发射率的不确定度 u_{L2} ;环境温度引入的不确定度 u_{L3} 。环境温度对亮度温度的影响在 0.001 K 以内, 按照均匀分布计算, 环境引入的不确定度 $u_{L3} = 0.00$ [11]。则黑体辐射源辐亮度的相对不确定度 u_L 可用公式(14)计算 [8]:

$$u_L = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial L1}\right)^2 u_{L1}^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial L2}\right)^2 u_{L2}^2} \quad (14)$$

得到 $u_L=1.55\%$ 。

则红外标准传递辐射计定标水浴黑体联合不确定度 u_c 根据公式(15)计算,结果见表 5。

$$u_c^2 = u_R^2 + u_L^2 \quad (15)$$

表 5 红外标准传递辐射计定标水浴黑体联合不确定度

Tab.5 Combined uncertainty of water-bath blackbody's radiance measured by infrared standard transfer radiometer

Source of uncertainty	Symbol	Value
Transfer radiometer uncertainty	u_R	0.54%
Blackbody radiance uncertainty	u_L	1.55%
Combined uncertainty	u_c	1.64%

由表 5 可得, 红外标准传递辐射计定标水浴黑体辐射亮度的联合不确定度为 1.64%。

6 结 论

根据目前的非线性光学理论推导出了基于受激参量下转换方法的定标模型, 基于受激参量下转换产生光子的相关特性, 构建了一套无需制冷且能够利用可见光探测器实现红外辐射测量的系统。根据其定标原理的线性响应关系, 可将此红外标准传递辐射计当成一个线性响应系统, 只需获取红外输入与可见波段输出的线性对应关系, 即可完成黑体辐射亮度的定标工作, 因此该系统也可认为是一个红外标准传递辐射计系统。通过测量标准黑体的 5 个温度点的绝对响应值, 采用最小二乘法拟合系统的定标系数, 利用所求定标系数对红外标准传递辐射计构温度与响应值的关系建查询表, 将待定标黑体的绝对响应值与查询表数据进行匹配可反演待定标黑体的辐射亮温。结果表明: 红外标准传递辐射计定标水浴黑体的联合不确定度优于 1.64%。该红外标准传递辐射计的研制, 为新一代高精度红外辐射定标技术未来的发展方向提供了新的设计思路。

参考文献:

[1] Xu Jun, Meng Binghuan, Zheng Xiaobing, et al. Calibration of common temperature blackbody based on thermal-infrared standard radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 43(3): 716-721. (in Chinese)

[2] Zhang Zhao, Wan Zhi, Sun Jingxu, et al. Development and calibration of dual-waveband infrared radiometer for jones calibration method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36 (6): 0623002. (in Chinese)

[3] Yuan Xiaochun, Yang Zhixiong, Yu Chunchao, et al. Study of radiation calibration for LWIR hyper spectral imager spectrometer [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37 (5): 431-434. (in Chinese)

[4] Gong Luyu, Hao Xiaopeng, Sun Jianping, et al. Development of H500 type high precision vacuum blackbody used as a calibration standard for infrared remote sensing [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017, 38(2): 129-134. (in Chinese)

[5] Li Yingwen, Chen Fusheng, Yang Changcheng, et al. Introduction to infrared test standard transfer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 119-123. (in Chinese)

[6] Rice J P, Johnson B C. The NIST EOS thermal infrared transfer radiometer[J]. *Metrologia*, 2003, 35(4): 505-509.

[7] Monte C, Gutschwager B, Morozova J S P, et al. Radiation thermometry and emissivity measurements under Vacuum at the PTB [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2009, 30(1): 203-219.

[8] Xu Jun. Research on calibration of ambient temperature blackbodies based on a thermal-infrared standard Radiometer [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

[9] Xie Chenyu, Li Jianjun, Pang Weiwei, et al. Reseach on calibration method of double-channel thermal-infrared standard radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0404002. (in Chinese)

[10] Hao X P, Song J, Sun J P, 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.

[11] Shu Xin, Hao Xiaopeng, Song Jian, et al. Research of 100-400 K vacuum infrared radiance temperature standard blackbody source[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(1): 13-19. (in Chinese)

[12] Xue Xiangqun, Li Jianjun, Zheng Xiaobing, et al. Investigation of mid-infrared radiance calibration based on parametric amplification [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(5): 358-365. (in Chinese)

[13] Jeppe Seidelin D, Christian P, Peter T L. Theory for up-conversion of incoherent images[J]. *Optics Express*, 2012, 20 (20): 1475-82.

[14] Brida G, Genovesea M, Novero C. On the measurement of photon flux in parametric down-conversion [J]. *The European Physical Journal D*, 2000, 8(2): 273-275.