

基于光通量倍增法的傅里叶红外探测系统光谱响应度非线性测量

宋旭尧¹, 端木庆铎^{1*}, 董伟^{2*}, 原遵东², 李志彬¹, 卢小丰², 曲岩¹

(1. 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国计量科学研究院热工计量科学研究所, 北京 100029)

摘要:在宽动态范围、高分辨力、宽频谱红外辐射测量中,傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)是常用的探测单元,其光谱响应度的非线性是宽动态范围红外光谱测量的不确定度主要贡献项之一。基于光通量倍增原理,建立傅里叶红外光谱探测系统的非线性测量实验系统。实验研究了在非线性和典型时间段内的黑体辐射源和 FTIR 红外光谱探测系统的漂移特性,设计了测量序列变换模型来消除测量过程中的一阶线性漂移影响。在 200~1 000℃ 范围内,实验测量了 FTIR 红外光谱探测系统的非线性特征,给出了在典型波长 3.9 μm 和 10.6 μm 处的非线性测量结果及相应的不确定度。

关键词:计量学;非线性;光通量倍增原理;双光阑法;傅里叶变换红外光谱仪;黑体辐射源

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

Nonlinearity measurements of spectral responsivity of Fourier transform infrared spectrometer measurement system based on flux superposition principle

SONG Xu-Yao¹, DUANMU Qing-Duo^{1*}, DONG Wei^{2*}, YUAN Zun-Dong², LI Zhi-Bin¹,
LU Xiao-Feng², QU Yan¹

(1. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Div. of Thermophysics and Process Measurements, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: In infrared radiation temperature measurements of wide-dynamic, high-resolution and wide-spectrum, Fourier Transform infrared (FTIR) spectrometer is a commonly used measurement unit. The nonlinearity of the spectral responsivity is one of the main uncertainty contributions to wide dynamic infrared spectrum measurements of radiation sources. Based on the flux superposition principle, nonlinearity measurement system of FTIR spectrometer measurement system was established. The experimental research on the drift characteristics of the blackbody radiation source and FTIR spectrometer measurement system during the representative nonlinearity measurement time were carried out. The quasi-linear drift effects on the nonlinearity measurement were eliminated by permuting the aperture measurement order. The nonlinear characteristics of FTIR spectrometer measurement system were experimentally measured at 200~1 000℃. The nonlinearity measurement results and associated uncertainties at 3.9 μm and 10.6 μm are reported respectively.

Key words: metrology, nonlinearity, flux superposition principle, double-aperture method, Fourier Transform infrared spectrometer, blackbody radiation source

PACS:. 06. 20. -f, 44. 40. +a, 42. 79. -e

收稿日期: 2019- 10- 17, 修回日期: 2019- 12- 09

Received date: 2019- 10- 17, Revised date: 2019- 12- 09

基金项目: 国家自然科学基金(11772318)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11772318)

作者简介(Biography): 宋旭尧(1989-), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 主要研究领域为辐射特性测量、光谱发射率测量. Email: songxuyao@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): duanmu@cust.edu.cn, dongw@nim.ac.cn

引言

以傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 为核心探测单元的 FTIR 探测系统具有高光通量、高信噪比、高光谱分辨率、测量速度快等特点, 在精密红外辐射测量相关的航空航天、功能材料研发、目标识别、红外隐身等领域中具有广泛的应用。然而由于傅里叶红外探测系统的光谱响应度存在非线性^[1-2], 在宽动态范围红外光谱测量中对测量的影响可达 1% 量级, 对于高精度测量而言该因素必需进行精确的刻画与标定, 以减小红外辐射测量的不确定度。

国际温度咨询委员会辐射测温工作组将非线性通常归因于探测器及关联放大电路的非理想特性^[2]。国内外的相关研究机构如英国国家物理实验室 (NPL)^[3-4]、美国标准与技术研究院 (NIST)^[5]、日本国家计量院 (NMIJ)^[6]、中国计量科学研究院 (NIM)^[7]、中科院上海技术物理研究所^[8]等已开展了相关的工作。

NPL 的 THEOCHAROUS 等^[3-4]基于双光阑法分别对碲镉汞 (MCT) 探测器和硫化铅 (PbS) 探测器的非线性进行了测量, 报道了 MCT 探测器在 3.8 μm 和 10.3 μm 以及 PbS 探测器在 1.3 μm 和 2.2 μm 的线性度, 并说明了非线性是关于入射光谱辐射亮度的函数, 与探测器在不同区域上的光谱辐射照度无关, 且在不同波长上呈现出不同非线性特征。NIST 的 ZHANG 等^[5]通过绝对响应度测量, 修正了 FTIR 中 MCT 探测器的非线性误差, 并报道了基于 MCT 探测器测量的几种不同材料的透过率与基于氘化三甘氨酸硫酸酯 (DTGS) 探测器的透过率测量结果的偏差, 由 MCT 探测器非线性引入的透过率误差修正量大于 10%。NMIJ 的 ISHII 等^[6]对基于 FTIR 的光谱发射率测量不确定度进行了评价, 并报道了在低温测量条件下基于双黑体法的配置了 MCT 探测器的 FTIR 非线性测量结果, 给出了对光谱发射率测量的不确定度。NIM 的 YUAN 等^[7]基于双黑体法测量了基于光栅单色仪的采用 MCT 探测器的红外光谱发射率测量装置的非线性, 该装置样品温度范围 100~700℃、测量波长范围 2~15 μm, 报道了在温度范围 200~550℃、波长 3~15 μm 上的非线性测量结果, 并指出该方法可有效降低设备漂移对测量的影响, 以及其非线性测量模型的适用性。中国科学院上海技术物理研究所的杨敏珠等^[8]在卷积法和迭代法的基础上提出了一种更适用于实际数

据的新方法, 对配备 MCT 探测器的 FTIR 模拟干涉图谱进行了非线性校准。从公开发表的文献来看, 研究对象主要集中在 MCT 探测器上, 对于 DTGS 探测器的非线性结果报道较少。

本文基于光通量倍增原理的双光阑法, 以黑体辐射源为光源, 建立了 FTIR 探测系统的非线性测量系统, 并对分别采用 DTGS 探测器和 MCT 探测器的 FTIR 探测系统非线性进行了测量。讨论并实验研究了 FTIR 探测系统自身漂移特性和黑体辐射源漂移特性, 提出了利用测量序列变换消除光源准线性漂移影响的非线性模型。在 200~1 000℃ 范围上实验测量了 FTIR 探测系统的非线性, 并以在辐射测温研究领域较为关注的接近波长范围 3~5 μm 和 8~14 μm 的大气窗口中心波长的 3.9 μm 和 10.6 μm 处的测量结果为例, 描述了 FTIR 探测系统的非线性特征。

1 实验原理

以黑体辐射源为探测目标的 FTIR 探测系统光谱输出 S 关于光谱辐射通量 ϕ 的数学表达式可认为^[9],

$$S(\lambda) = R(\lambda)\phi(\lambda) + S_0(\lambda) + S_a(\lambda) \quad (1)$$

式中, λ 为波长, R 为光谱响应度, S_0 为来自于 FTIR 仪器内部的背景辐射光谱输出, 与仪器内部温度和探测器温度有关, S_a 为来自于辐射源和仪器外部的背景辐射输出。背景辐射 S_{bg} 表示为,

$$S_{bg}(\lambda) = S_0(\lambda) + S_a(\lambda) \quad (2)$$

本文测量的非线性 NL 是指辐射源发出红外辐射 1 和红外辐射 2 同时投射到测量系统时测量的响应与测量系统测量红外辐射 1 响应加测量系统测量红外辐射 2 响应的比值与 1 的偏差, 国际上通常采用光通量倍增法测量, 其数学表达式为^[1],

$$NL(\lambda) = \frac{R(\lambda, \phi_{12})\phi_{12}(\lambda)}{R(\lambda, \phi_1)\phi_1(\lambda) + R(\lambda, \phi_2)\phi_2(\lambda)} - 1 \quad (3)$$

根据定义, φ 关于光谱辐射亮度 L 的表达式为,

$$\phi(\lambda, T) = \int_{\Omega} L(\lambda, T) A \cos\theta d\Omega \quad (4)$$

式中, Ω 为立体角, T 为黑体辐射源温度, A 为被测量面积, θ 表示测量方向。根据普朗克辐射定律,

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

式中, c_1 为第一辐射常数, c_2 为第二辐射常数。将式 (5) 代入式 (4),

$$\phi(\lambda, T) = \int_{\Omega} \frac{c_1 A \cos\theta}{\lambda^5 [\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1]} d\Omega \quad (6)$$

因此可知,对于已知温度 T 的黑体辐射源在波长 λ 上的光谱辐射通量 ϕ 在相同的测量条件下,即立体角 Ω 和测量方向 θ 不变, ϕ 仅与被测面积 A 有关。

文中 FTIR 探测系统的非线性测量方法是基于光通量倍增原理的双光阑法,如图 1 所示,即通过测量光路中光阑面积叠加使探测器接收到的辐射通量实现倍增,即已知温度 T 的黑体辐射源的总光谱辐射通量为 ϕ_{12} ,分别通过两个尺寸相同的光阑限制,使 ϕ_{12} 被限制为两相等光谱辐射通量 ϕ_1 和 ϕ_2 , ϕ_1 和 ϕ_2 之和等于 ϕ_{12} 。根据式(3), $R\phi_{12}$ 与 $R\phi_1$ 、 $R\phi_2$ 之和的偏离程度表示为 FTIR 探测系统非线性。在基于光通量倍增法的非线性测量中,来自于辐射源和仪器外部的辐射背景辐射也经过了辐射通量倍增过程。由于被测目标为高温黑体辐射源,其光谱辐射亮度远高于背景辐射光谱辐射亮度,认为背景光谱辐射亮度的变化量可以忽略。因此,非线性 NL 关于光谱输出的数学描述为,

$$NL(\lambda) = \frac{S_{12}(\lambda) - [S_0(\lambda) + S_{a,12}(\lambda)]}{[S_1(\lambda) - (S_0(\lambda) + S_{a,1}(\lambda))] + [S_2(\lambda) - (S_0(\lambda) + S_{a,2}(\lambda))]} - 1$$

$$= \frac{S_{12}(\lambda) - S_{bg,12}(\lambda)}{[S_1(\lambda) - S_{bg,1}(\lambda)] + [S_2(\lambda) - S_{bg,2}(\lambda)]} - 1 \quad (7)$$

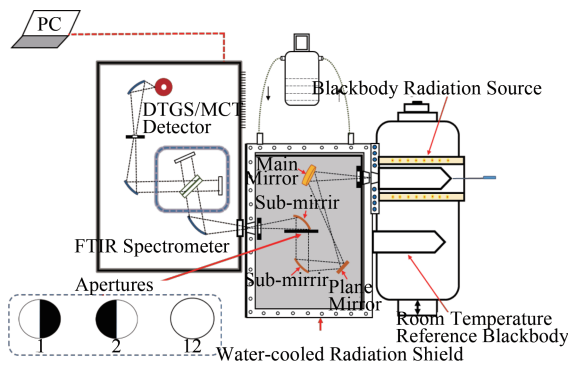


图1 非线性测量原理图以及辐射通量倍增光阑示意图
Fig. 1 Schematic of the nonlinearity measurement and the radiation flux superposition apertures

当在宽动态多量级辐射亮度范围上测量时,被测辐射源的总辐射通量从测量起点 $\phi_{12,1}$ 经 i 步倍增至 $\phi_{12,n}$,即辐射源的辐射亮度从 L_1 经 i 步倍增至 L_n ,其非线性 NL_i 也进行了 i 步累积,引入递推公式计算累积非线性 INL_i ^[1],表示为,

$$INL_i(\lambda) = \prod_{j=1}^i [NL_j(\lambda) + 1] - 1 \quad (8)$$

2 实验系统

FTIR 探测系统非线性测量系统主要由黑体辐射源、光学系统、FTIR、辐射通量倍增精密光阑等组成。

黑体辐射源为 NIM 自制的三段加热式变温腔式黑体,腔口直径 30 mm,腔深 350 mm,温度覆盖范围 100~1 200℃。黑体腔材料为碳化硅,内壁喷涂有红外光谱发射率在波长范围 3~14 μm 上均高于 0.9 的高温高发射率黑漆^[10]。基于不等温腔的 Monte-Carlo 光线追迹法对该黑体辐射源的发射率进行了理论模拟^[11],模拟结果表明该黑体辐射源在 200~1 000℃ 温度范围上光谱发射率高于 0.995。采用在该腔式黑体前附加喷黑 ($\epsilon \geq 0.95$) 水冷光阑方式,获取近似等效黑体辐射面源,且该黑体辐射源已溯源至我国高温基准。

外置的光学系统为以凹面镜为主镜,椭球离轴镜为次镜的反射式红外光学系统。所有光学元件通过笼式结构定位,以确保各光学元件之间的同轴度。FTIR 和黑体之间搭建水冷杂散辐射屏蔽仓(水冷温度与室温 23℃ 相同)^[12],将光学系统置于其中以抑制由光路引起的非理想因素带来的杂散辐射,并使附加高黑水冷光阑的腔式黑体辐射源目标紧密面向水冷高黑 ($\epsilon \geq 0.95$) 的屏蔽仓壁,以抑制辐射源的二次反射。

FTIR 为德国 Bruker 公司的 VERTEX 70 型,设定光谱分辨率为 4 cm^{-1} ,到达探测器处的光斑面积不小于 3 mm^2 。FTIR 可分别配置 DTGS 探测器和 MCT 探测器。DTGS 探测器是非制冷的热释电型探测器,测量光谱波数覆盖范围 $160 \sim 12\,000 \text{ cm}^{-1}$, D^* 不小于 $2 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,探测器尺寸为 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 。MCT 探测器是液氮制冷的光电导探测器,测量光谱波数覆盖范围 $420 \sim 12\,000 \text{ cm}^{-1}$, D^* 不小于 $5 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,探测器尺寸为 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 。由于探测面积小于光斑面积,即光斑可完全覆盖探测器,因此,可忽略探测器均匀性对测量的影响。

辐射通量倍增光阑由 3 个自制光阑(图 1 中 1、2 和 12)组成,室温参考黑体用作测量背景辐射^[13]。光阑 12 为全通光阑,半径 20 mm,光阑 1 为左侧半通光阑,半径 20 mm,光阑 2 为右侧半通光阑,半径 20 mm,光阑 1 与光阑 2 可通过的面积之和等于光阑 12。光阑放置于光学系统中的平行光路处,平行光

路处的光斑半径大于25 mm,大于光阑半径,并通过笼式结构对其定位,光阑表面喷涂反射比小于0.05的红外高吸收涂层以抑制多次反射影响。

3 实验结果和讨论

3.1 黑体辐射源和FTIR探测系统漂移特性实验与修正

在非线性测量研究中,需要考虑并修正测量过程中的非理想因素对结果的影响。非理想因素主要来源于黑体辐射源漂移特性、FTIR探测系统自身漂移特性以及如由光阑尺寸引起的其他非理想因素等,以上即是测量不确定度的主要贡献分量。本文采用测量波长0.9 μm线性光电基准辐射温度计(LP4)研究黑体辐射源的漂移特性。在黑体辐射源控温稳定30 min后,在600~1 000 °C温度范围内测量了黑体辐射源在1 600 s内的LP4光电流相对漂移,LP4在测量时间内每1 s记录一次数据。黑体辐射源漂移特性测量时间1 600 s大于FTIR探测系统非线性单次测量时间,如图2所示。

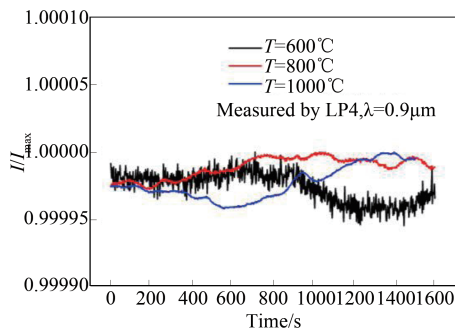


图2 使用LP4测量的黑体辐射源漂移特性

Fig. 2 Drift characteristic of the blackbody radiation source measured by LP4

测量结果表明,黑体辐射源在控温稳定30 min后的1 600 s内,通过LP4测量的光电流的相对漂移优于0.005%。由于LP4在波长0.9 μm处的测量下限为600°C,具有较差信噪比,因此黑体辐射源在600°C时呈现的亮度温度光电流信号波动特征较明显。另外需要说明的是,LP4的零点光电流信号相比于黑体辐射源的测量光电流信号低了4个数量级,因此,LP4自身的零点漂移可以忽略。LP4输出光电流 I 基于光谱辐射亮度的定义式可表示为^[14],

$$I(\lambda, T) = A\Omega\tau(\lambda)K(\lambda)\varepsilon(\lambda, T)L(\lambda, T), \quad (9)$$

式中, A 为测量目标面积, Ω 为测量立体角, λ 为测量波长, T 为被测辐射源的温度, ε 为被测辐射源发射

率, τ 为干涉滤光片的光谱透过率, K 为光谱响应度, L 为被测辐射源辐射亮度。因此,在相同的测量条件下得到的光电流的漂移即可表示为黑体辐射源辐射亮度的漂移。黑体辐射源漂移特性在非线性测量时间内呈非线性变化特征,通过在时间 t 内连续测量获得的经不同光阑限制的黑体辐射源光谱输出进行积分运算,修正黑体辐射源漂移特性对非线性测量的影响。式(7)中的 NL 表示为 NL_1 ,

$$NL_1(\lambda) = \int_{t_2}^{t_1} NL(\lambda) dt \quad (10)$$

同时本文又基于FTIR对黑体辐射源的漂移特性进行了研究。在黑体辐射源控温稳定30 min后,测量了黑体辐射源在1 800 s内的FTIR光谱相对漂移,FTIR在测量时间内每150 s对黑体辐射源进行一次测量。以黑体辐射源名义温度600°C和1 000°C为例,给出了在3.9 μm和10.6 μm处分别经DTGS探测器和MCT探测器测量的漂移特性测量结果,如图3所示。

测量结果表明,黑体辐射源在控温稳定30 min后的1 800 s内,通过FTIR探测系统测量的光谱相对漂移优于0.8%。通过FTIR探测系统测量的黑体辐射源辐射亮度相对漂移与通过LP4测量的结果相差了2个数量级,因此,通过FTIR探测系统测量的黑体辐射源漂移特性可近似认为是FTIR探测系统自身的漂移特性。对测量数据进行了线性拟合,各测量数据基于线性拟合结果的残差均在-2~2区间上,认为FTIR探测系统漂移特性在非线性测量时间内呈近似线性变化特征。因此,通过经光阑12、光阑1、光阑2的光谱辐射通量正序测量和倒序测量,建立测量序列变换模型,修正FTIR探测系统漂移特性对非线性测量的影响。式(10)中的 NL_1 表示为 NL_2 ,

$$NL_2(\lambda) = \frac{NL_{11}(\lambda) + NL_{12}(\lambda)}{2}, \quad (11)$$

式中, NL_{11} 为正序非线性测量结果, NL_{12} 为倒序非线性测量结果。

3.2 辐射通量倍增光阑尺寸误差引起的非理想因素与修正

在基于光通量倍增原理的双光阑法的非线性测量研究中,最重要的原则是通过光阑12的辐射通量应该严格等于通过光阑1和光阑2的辐射通量之和,即光阑12的面积需要严格等于光阑1和光阑2面积之和。但在实际的光阑制作中,机械加工误差是不可避免的,因此,需要对在测量过程中由实际

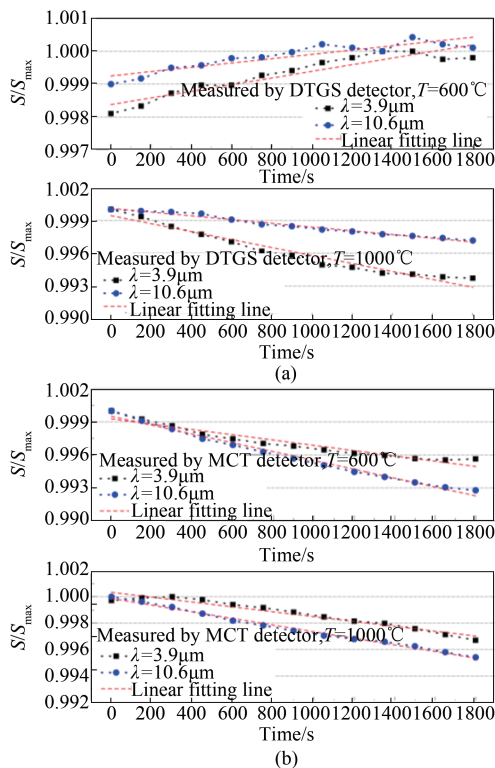


图3 使用FTIR测量的黑体辐射源漂移特性(a)使用DTGS探测器测量结果,(b)使用MCT探测器测量结果

Fig.3 Drift characteristic of the blackbody radiation source measured by FTIR (a) relative drifts of spectrums measured by DTGS detector, (b) relative drifts of spectrums measured by MCT detector

光阑尺寸误差引起的非理想因素进行修正。委托NIM的长度计量科学与精密机械测量技术研究所对光阑尺寸基于扫描法进行了精密测量,结果如表1所示。光阑12的面积略大于光阑1和光阑2的面积之和,偏差约为0.4%,即通过光阑12的辐射通量与通过光阑1和光阑2的辐射通量之和的偏差约为0.4%,因此,实际非线性测量结果应为 $(1-0.004)NL_2(\lambda)$ 。

表1 辐射通量倍增光阑尺寸测量结果

Table 1 Measurement results of size of the radiation flux superposition aperture

光阑	直径/mm	面积/mm ²
12	40.012	1 269.443
1	40.103	629.274
2	40.203	634.935

3.3 FTIR探测系统非线性测量结果与测量不确定度

在波长3.9 μm和10.6 μm处的分别采用DTGS

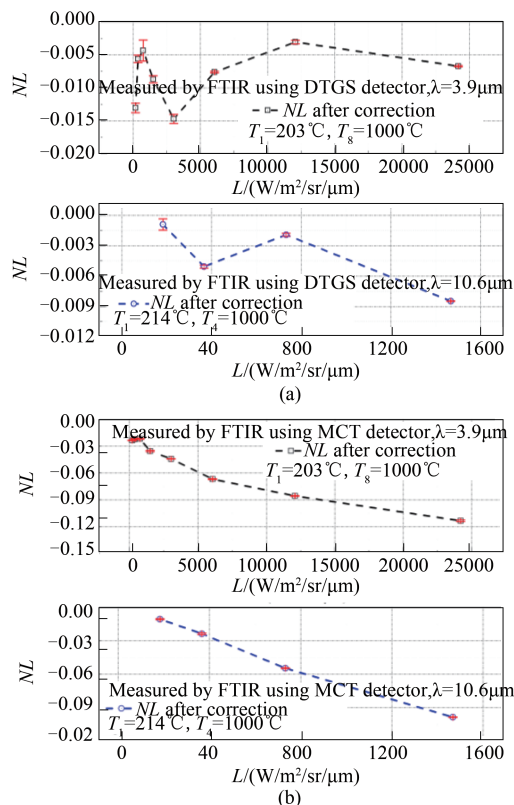


图4 波长3.9 μm和10.6 μm处的非线性测量结果及不确定度(a)使用DTGS探测器的测量结果及不确定度,(b)使用MCT探测器的测量结果及不确定度

Fig.4 Nonlinearity measurement results and uncertainties at wavelengths of 3.9 μm and 10.6 μm (a) measurement results and uncertainties measured by DTGS detector, (b) measurement results and uncertainties measured by MCT detector

探测器和MCT探测器的FTIR探测系统非线性测量结果及不确定如图4所示,图中的测量结果为3次测量的平均值。设定的黑体辐射源测量温度值为光谱辐射亮度倍增点。黑体辐射源在200~1 000℃温度范围内,在波长3.9 μm处,光谱辐射亮度从约200 W/m²/sr/μm 逐次倍增至25 000 W/m²/sr/μm,跨越2个数量级,在波长10.6 μm处,光谱辐射亮度从约100 W/m²/sr/μm 逐次倍增至1 500 W/m²/sr/μm,跨越1个数量级。FTIR在3~14 μm波长范围上对黑体辐射源的单次光谱测量时间约为1 s,设定对于通过每个光阑的辐射通量的连续测量时间为5 min。

测量结果表明:在黑体辐射源温度范围200~1000℃内,使用DTGS探测器的FTIR探测系统在波长3.9 μm处的非线性在-0.003~-0.015区间上,在波长10.6 μm处的非线性在-0.001~-0.009区间上。使用MCT探测器的FTIR探测系统在波长3.9 μm处的非线性在-0.02~-0.12区间上,在波长

10.6 μm 处的非线性在-0.01~-0.1 区间上。NPL 的报道中指出^[3-4],多数红外探测器(如MCT探测器、PbS探测器、InSb探测器等)的非线性拟合曲线近似为式(12)。

$$y = 1 - a_1x - a_2x^2 \quad (12)$$

式中, a_1 和 a_2 为拟合系数。测量结果表明,在使用MCT探测器的FTIR探测系统的非线性特征满足上述拟合曲线变化特征,然而,在使用DTGS探测器的FTIR探测系统的非线性随辐射源光谱辐射亮度升高,非线性变化特征并没有呈现此规律性,在较低光谱辐射亮度区间呈现先升后降的变化趋势。通过3次测量对该现象进行了验证,每次测量间隔为1周,结果表明3次测量结果具有较好重复性且变化趋势相同,以波长3.9 μm 处的测量结果为例,如图5所示,出现该现象原因需要通过进一步研究。

非线性测量标准不确定度 u_{NL} 的主要来源为测量重复性带来的不确定度、黑体辐射源漂移特性测量带来的不确定度、FTIR探测系统漂移特性测量带来的不确定度以及其他的不确定度来源,其中,测量重复性认为是A类不确定度,可通过计算多次非线性测量结果的标准偏差获得。其他不确定度主要来源于测量过程中实验设备仪器的测量不确定度,认为是B类不确定度,通过仪器送检校准获得。不确定贡献来源及评价如表2所示。

累积非线性 INL_i 的测量结果及不确定度如图6所示,其测量不确定度 u_{INL_i} 实际上也是非线性测量不确定度逐次累积放大的过程,可通过式(13)得到,

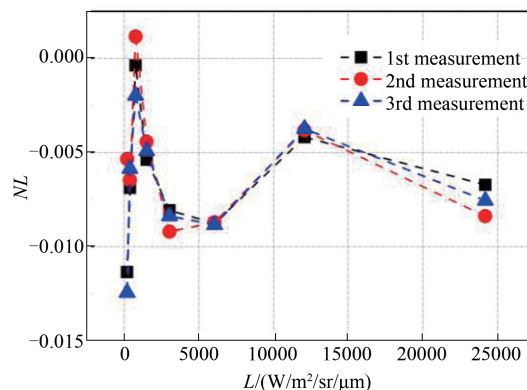


图5 波长3.9 μm 处使用DTGS探测器的非线性测量重复性

Fig. 6 Repeatability of nonlinearity measurement results at the wavelength of 3.9 μm measured by DTGS detector

$$u_{INL_i} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{NL_i}^2} \quad (13)$$

本文中评价非线性测量结果的方法是基于光通量倍增原理的测量值与1的偏离程度,因此可知,在宽动态辐射亮度范围上,FTIR探测系统使用DTGS探测器的累积非线性明显优于使用MCT探测器的累积非线性。在黑体辐射源温度范围200~1000 $^{\circ}\text{C}$ 内,使用DTGS探测器的FTIR探测系统累积非线性变化量与使用MCT探测器的FTIR探测系统累积非线性变化量的相对偏差达到80%,接近一个数量级。使用DTGS探测器的FTIR探测系统在波长3.9 μm 处的累积非线性在-0.003~-0.09 区间上,在波长10.6 μm 处的累积非线性在-0.001~-0.017 区间上。使用MCT探测器的FTIR探测系统

表2 不确定来源及评价

Table 2 Summary of measurement uncertainties

不确定度来源		标准不确定度/%
重复性	波长3.9 μm 处使用DTGS探测器的NL	<0.05
	波长10.6 μm 处使用DTGS探测器的NL	<0.035
	波长3.9 μm 处使用MCT探测器的NL	<0.015
	波长10.6 μm 处使用MCT探测器的NL	<0.02
黑体辐射源漂移特性	黑体辐射源亮度温度	0.15
	LP4 噪声	0.02
	LP4 量程系数	0.03
FTIR探测系统漂移特性	波数示值	0.01
	波数重复性	0.0003
	FTIR 噪声	0.01
光阑尺寸	光阑12 面积	0.0006
	光阑1 面积	0.002
	光阑2 面积	0.0012
合成标准不确定度 u_{NL}		<0.3

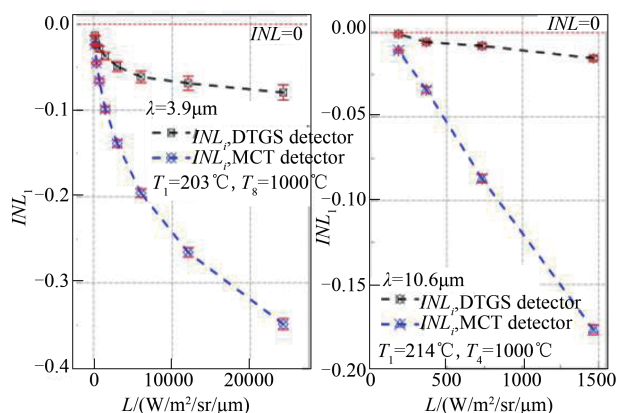


图6 累积非线性测量结果与比较以及不确定度

Fig. 6 Integral nonlinearity measurement results, comparisons and uncertainties

在波长 $3.9 \mu\text{m}$ 处的累积非线性在 $-0.02 \sim -0.35$ 区间上,在波长 $10.6 \mu\text{m}$ 处的非线性在 $-0.01 \sim -0.2$ 区间上。根据上述测量结果,在实际辐射测量中,对于较窄光谱辐射亮度测量范围(光谱辐射亮度变化区间内最大值和最小值相差倍数小于 2^2),使用 DTGS 探测器的 FTIR 探测系统的非线性对测量不确定度贡献优于 0.1% 量级,具有弱非线性特征;在宽光谱辐射亮度测量范围时,对于使用不同探测器的 FTIR 探测系统均应评价非线性对于测量不确定度的贡献。

另外需要说明的是,本文测量的非线性近似但并不是测量装置的绝对非线性。本文测量的非线性是表征 FTIR 探测系统在宽动态亮度温度范围上对于辐射亮度响应的变化特征。许多已报道的基于光通量倍增原理的非线性测量研究并没有对于此点进行明确地指出。此外,在后续工作中仍需要对 FTIR 探测系统非线性的光谱选择性进行进一步研究。

4 结论

本文对分别基于 DTGS 探测器和 MCT 探测器的 FTIR 红外光谱探测系统的非线性特性进行了研究。基于光通量倍增原理的双光阑法以黑体为辐射源建立了 FTIR 探测系统非线性测量系统。研究了在非线性和测量时间内黑体辐射源和 FTIR 探测系统的漂移特性,建立了引入光阑尺寸误差的测量序列变换消除准线性漂移修正模型。FTIR 探测系统非线性实验测量结果表明,在黑体辐射源温度范围 $200 \sim 1000^\circ\text{C}$ 内,使用 DTGS 探测器的 FTIR 探测系统非线性优于使用 MCT 探测器的非线性,使用

DTGS 探测器的 FTIR 探测系统在波长 $3.9 \mu\text{m}$ 处的非线性在 $-0.003 \sim -0.015$ 区间上,在波长 $10.6 \mu\text{m}$ 处的非线性在 $-0.001 \sim -0.009$ 区间上。使用 MCT 探测器的 FTIR 探测系统在波长 $3.9 \mu\text{m}$ 处的非线性在 $-0.02 \sim -0.12$ 区间上,在波长 $10.6 \mu\text{m}$ 处的非线性在 $-0.01 \sim -0.1$ 区间上。基于上述实验结果,研究计算了 FTIR 探测系统累积非线性,结果表明,在高宽动态亮度温度范围上对于高温目标的辐射测量,使用 DTGS 探测器的 FTIR 探测系统相比于使用常用的 MCT 探测器有着较好的非线性特征。使用 DTGS 探测器的 FTIR 探测系统非线性在波长 $3.9 \mu\text{m}$ 处的测量不确定度小于 0.0016 ,在 $10.6 \mu\text{m}$ 处的测量不确定度小于 0.0006 。使用 MCT 探测器的 FTIR 探测系统非线性在波长 $3.9 \mu\text{m}$ 处的测量不确定度小于 0.001 ,在 $10.6 \mu\text{m}$ 处的测量不确定度小于 0.0008 。文中所有测量结果均可溯源至我国辐射温度国家基准。

References

- [1] DUAN Yu-Ning, YUAN Zun-Dong, WU Ji. A new non-linearity measurement system for radiation thermometer in NIM [J]. *ACTA METROLOGICA SINICA*, (段宇宁, 原遵东, 吴继. 光电比较仪(或高温计)系统非线性测量装置. 计量学报), 2000, **21**(1): 51-58.
- [2] FILTZ J-R, HAY B, HAMEURY J. Thermophysical properties of materials: new metrology challenges at LNE to reduce and uncertainties [J]. *Int J Thermophys*, 2011, **32**: 2741-2751.
- [3] Theocharous E, Ishii J, Fox N P. Absolute linearity measurements on HgCdTe detectors in the infrared region [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(21): 4182-4188.
- [4] Theocharous E. Absolute linearity measurements on a PbS detector in the infrared [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(11): 2381-2386.
- [5] Zhang Z M, Zhu C J, Hanssen L M. Absolute detector calibration applied to nonlinearity error correction in FT-IR measurements [J]. *Applied Spectroscopy*, 1997, **51**(4): 576-579.
- [6] Ishii J, Ono A. Uncertainty estimation for emissivity measurements near room temperature with a Fourier transform spectrometer [J]. *Measurement Science And Technology*, 2001, **12**: 2103-2112.
- [7] Yuan Z, Zhang J, Zhao J, et al. Linearity study of a spectral emissivity measurement facility [J]. *Int J Thermophys*, 2009, **30**: 227-235.
- [8] YANG Min-Zhu, ZOU Yao-Pu, ZHANG Lei, et al. Non-linear effects of the Fourier transform spectrometer detector and its correction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (杨敏珠, 邹耀璞, 张磊, 等. 傅里叶变换光谱仪探测器非线性的影响及其校正方法. 红外与激光工程), 2017, **46**(10): 1023001.
- [9] Dai J, Wang X, Yuan G. Fourier transform spectrometer

- for spectral emissivity measurement in the temperature range between 60 and 1500 °C [C]. 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Journal of Physics: Conference Series **13**, 2005: 63–66.
- [10] Song X, Huan K, Dong W, *et al.* Research on infrared radiation characteristics of Pyromark1200 high-temperature coating; International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, Beijing, 2014 [J]. *Proc. SPIE*, 2014, **9300** : 93001S.
- [11] Prokhorov A, Hanssen L. Effective emissivity of a cylindrical cavity with an inclined bottom: II. Non-isothermal cavity [J]. *Metrologia*, 2010, **47**: 33–46.
- [12] Ren D, Tan H, Xuan Y, *et al.* Apparatus for measuring spectral emissivity of solid materials at elevated temperatures [J]. *Int J Thermophys*, 2016, **37**: 51.
- [13] Hay B, Hameury J, Fleurence N, *et al.* New facilities for the measurements of high-temperature thermophysical properties at LNE [J]. *Int J Thermophys*, 2014, **35**: 1712–1724.
- [14] DONG Wei, YUAN Zun-Dong, LU Xiao-Feng. Research on the nonlinearity of photoelectric pyrometer based on light-emitting diode light sources [J]. *ACTA OPTICA SINICA*, (董伟, 原遵东, 卢小丰. 基于发光二极管光源的光电高温计非线性研究. *光学学报*), 2010, **30**(8): 2412–2416.