

基于缓变假设的多光谱辐射法发射率测量误差分析与仪器参数配置研究

栾一飞^{1,2}, 王翔¹, 顾罗¹, 林玥^{1,2}, 杨秋杰^{1,2}, 何志平^{1,2*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 发射率作为表征物体辐射特性的关键参量, 其准确测量对于高温目标识别、材料改性表征、金属冶炼过程调控等领域具有重要价值。多光谱辐射法测量发射率因其非接触和测量速度快等优势而成为研究热点, 其测量精度由欠定方程组的求解精度决定。目前对欠定方程组求解精度的研究主要关注方程求解算法误差, 忽略了光谱仪自身的测量误差, 导致未能合理地控制系统误差。本文基于适用范围广、测量精度高的缓变假设, 通过模拟不同条件下光谱通道数和信噪比对发射率测量误差的影响, 确定了相应条件下光谱仪的参数配置, 并对发射率测量效果进行实验验证。实验结果表明, 使用基于缓变假设的多光谱辐射法, 为使黑体发射率测量误差小于 1%, 光谱仪的光谱通道数应不小于 400, 信噪比不低于 1 000; 对发射率变化复杂的目标而言, 为使测量误差小于 1%, 应至少具有 1 000 个光谱通道数及 1 200 以上的信噪比。综合考虑算法误差和光谱仪参数匹配关系, 是合理控制系统误差的关键, 可以获得更精确的发射率测量结果, 这为多光谱辐射法精确测量发射率的应用提供了新的依据和解决方案, 对于高温目标的准确识别和相关领域的应用具有重要意义。

关键词: 发射率; 多光谱辐射法; 欠定方程组; 傅里叶光谱仪

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Analysis of emissivity measurement error and instrument parameter configuration for multispectral radiometric method based on slow-change assumption

Luan Yi-Fei^{1,2}, Wang Xiang¹, Gu Luo¹, Lin Yue^{1,2}, Yang Qiu-Jie^{1,2}, He Zhi-Ping^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-electronic Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a key parameter for characterizing the radiation characteristics of objects, emissivity has significant value in accurate measurement for high-temperature target identification, material modification, and regulation of metal smelting process. The multispectral radiation method for measuring emissivity has become a research hotspot due to its non-contact and fast measurement speed advantages, and its measurement accuracy is determined by the solution accuracy of the underdetermined equation system. At present, the research on the solution accuracy of the underdetermined system of equations mainly focuses on the error of the equation solving algorithm, ignoring the measurement error of the spectrometer itself, which leads to the failure of controlling the system error in a reasonable way. In this paper, based on the assumption of retardation with wide application range and high measurement accuracy, the influence of the number of spectral channels and signal-to-noise ratio on the emissivity measurement error under different conditions is simulated. The parameter configurations of the spectrometer under the corresponding conditions are determined and the effect of emissivity measurement is experimentally verified. The experimental results show that, using the multispectral radiation

收稿日期: 2024-02-03, 修回日期: 2024-04-16

Received date: 2024-02-03, Revised date: 2024-04-16

基金项目: 国家杰出青年科学基金(62125505), 上海市“科技创新行动计划”启明星培育(扬帆专项)(22YF1416900)

Foundation items: the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (62125505), Shanghai "Science and Technology Innovation Action Plan" Star Cultivation (Yangfan Special Program) (22YF1416900)

作者简介 (Biography): 栾一飞 (1997-), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 主要研究领域为红外傅里叶光谱仪研制及光谱数据应用研究. E-mail: luanyifei@mail.sitp.ac.cn

*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: hzping@mail.sitp.ac.cn

method based on the slow-change assumption, the number of spectral channels of the spectrometer should be not less than 400 and the signal-to-noise ratio should not be less than 1000 in order to make the blackbody emissivity measurement error less than 1%. For the targets with complex emissivity changes, the spectrometer should have at least 1 000 spectral channels and signal-to-noise ratios of more than 1 200 in order to make the measurement error less than 1%. Taking into account the matching relationship between algorithm errors and spectrometer parameters is the key to effectively controlling system errors and obtaining more accurate emissivity measurement results. This provides a new basis and solution for the precise measurement of emissivity using multispectral radiation methods, which is of great significance for the accurate identification of high-temperature targets and related applications.

Key words: emissivity, multispectral radiometry, underdetermined system of equations, FTIR

引言

发射率是物体辐照度与同温度理想黑体辐照度的比值,是表征物体辐射特性的物理参量。高温目标(700~2 500 °C)的发射率的准确测量对目标识别、陶瓷改性表征、金属冶炼过程调控等领域具有重要价值。目前,发射率测量方法主要有直接测量法和多光谱辐射法。

直接测量法需要精确测量目标的温度。在已知温度的基础上使用光谱仪测量目标光谱辐照度,然后与同温度理想黑体辐照度作比值,即利用发射率的定义直接求解发射率。2 000年,Ishii等^[1-2]研制了一种发射率高精度测量装置,测量温度为-20~100 °C,光谱范围为5~16 μm。同年,戴景民^[3]等研制出具有8个通道的棱镜分光测量温度的设备。2004年,Hanssen^[4]开发了一种主要用于测量透明材料测量系统,测量温度范围为600~1 400 K,光谱范围1~20 μm。2008年,Teodorescu等^[5]描述了一种在真空中测量悬浮金属的光谱法向发射率的装置。2016年,Ren等^[6]研制出用于测量发射率的系统,配有800~1 600 °C的加热炉,测量波段为2~25 μm;2019年,Guo等^[7]开发了一种定向光谱发射率测量系统,方向角范围为0°~60°,温度范围为300~1 000 K。这种方法研究时间相对较早,发射率计算的系统误差与测温控温仪器和光谱仪本身的测量误差有关,弊端在于必须使用精准测温控温设备并特制样品,因此该方法主要应用于实验室内。

多光谱辐射法不直接测量温度。温度作为未知量,使得发射率的定义方程组会变为未知数比方程数多的欠定方程组。多光谱辐射法通过算法引入约束条件,辅助求解欠定方程组,利用光谱辐照度数据同时计算出温度和发射率^[8-11]。2 020年,Shi等^[12]将距离作为额外未知量置入欠定方程组中,利用牛顿迭代法进行求解,实现了对目标物体的温度和距离的测量。2 020年,Xing等^[13]提出了一种广

义逆矩阵归一化算法,通过逆矩阵引入约束条件进行发射率求解,然而该方法随着光谱通道数增加,计算量会呈指数增长。同年,Wang等^[14]基于发射率随波长变化趋势的先验知识作为约束条件,据此实现对目标温度和发射率的优化反演,对1 800~3 000 K的钨丝进行计算后发射率误差约为4.80%~9.50%。2 022年,Zhang^[10]等人提出了多段线性模型对温度和发射率进行二次反演,为发射率测量提供了一种新的思路。近年来,多光谱辐射法由于其测量速度快、非接触测量的优点引发了广泛关注和研究。随着研究不断深入,具有逐渐取代直接测量法的趋势。

在重复性测量下,对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差叫做系统误差。在本文中,系统误差不仅包括算法引入约束条件假设带来的理论误差,还包括光谱仪本身的误差即测量误差。然而,目前多光谱辐射法测量发射率精度的相关研究主要关注算法的理论误差,忽略了算法与仪器参数配置之间的关系及仪器本身的测量误差,未能合理地控制系统误差。缓变假设适用范围广、测量精度高,是多光谱辐射法测量发射率的一种新型解决方案^[15]。本文基于缓变假设仿真模拟了不同环境下发射率测量精度随光谱通道数和信噪比的变化关系,依据仿真结果选择特定参数配置的光谱仪,并通过实验验证了基于缓变假设的多光谱辐射法在不同信噪比和光谱通道数下的发射率反演精度。实验结果表明,为使黑体发射率测量误差小于1%,光谱仪的光谱通道数应不小于400,信噪比不低于1 000;对发射率变化复杂的目标而言,为使测量误差小于1%,应至少具有1 000个光谱通道数及1 200以上的信噪比。本文结合缓变假设引入的约束条件特点和目标发射率特性给出光谱仪参数配置方案,为多光谱辐射法精确测量发射率提出了一种新的思路。

1 缓变假设计算发射率原理方法及误差分析

1.1 缓变假设介绍

普朗克黑体辐射定律可用式(1)表示。

$$M(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_1) \frac{1}{\lambda_1^5} \frac{2hc^2}{e^{\frac{hc}{k\lambda_1 T}} - 1}, \quad (1)$$

其中, $M(\lambda_1, T)$ 为目标的光谱辐射出射度, ε 是目标的发射率, 随波长变化; h 为普朗克常量, $6.626 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$; c 为真空中的光速 $2.997925 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; k 为玻尔兹曼常量, $1.38054 \times 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$ 。对于采集到的 N 组光谱辐亮度数据, 代入式(1)后会形成一个理论上难以精确求解的非欠定方程组(2), 该方程组中 N 个方程内包含 N 个发射率和 1 个温度共计 $N+1$ 个未知数。

$$\begin{cases} M(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_1) \frac{1}{\lambda_1^5} \frac{2hc^2}{e^{\frac{hc}{k\lambda_1 T}} - 1} \\ M(\lambda_2, T) = \varepsilon(\lambda_2) \frac{1}{\lambda_2^5} \frac{2hc^2}{e^{\frac{hc}{k\lambda_2 T}} - 1} \\ M(\lambda_3, T) = \varepsilon(\lambda_3) \frac{1}{\lambda_3^5} \frac{2hc^2}{e^{\frac{hc}{k\lambda_3 T}} - 1} \\ \dots\dots\dots \\ M(\lambda_N, T) = \varepsilon(\lambda_N) \frac{1}{\lambda_N^5} \frac{2hc^2}{e^{\frac{hc}{k\lambda_N T}} - 1} \end{cases} \quad (2)$$

缓变假设可用于求解该欠定方程组。图 1 概括介绍了基于缓变假设的多光谱辐射法的原理和流程。首先需要使用光谱采集光谱辐照度。该方法第一步为分组, 将连续的 m 个光谱辐照度数据划分为等间距的光谱窗口, 如图 1 红框内所示。第二步

引入缓变假设, 假设同一个光谱窗口的发射率是相同的, 即 $\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2) = \dots = \varepsilon(\lambda_m)$ 。这为上述非欠定方程组的求解引入了约束条件。第三步则是根据第二步引入的约束条件精确求解每个光谱窗口的温度, 并根据每个光谱窗口的温度计算出目标的温度和发射率。

1.2 缓变假设的误差来源分析

对于通过光谱辐照度数据同时测量温度和发射率的多光谱辐射法, 其系统误差主要包含两部分: 一部分是光谱仪的测量误差; 另一部分则为算法的误差, 即由约束条件产生的误差。对于基于缓变假设的多光谱辐射法而言, 如图 1 所示, 其算法误差来源是第二步的缓变假设, 即光谱窗口内的发射率视作定值所导致的误差。这个误差由光谱通道数和光谱分辨率共同决定。而光谱仪的测量误差则由光谱辐照度数据的信噪比体现。因此, 对多光谱辐射法的误差分析可通过改变光谱仪的光谱分辨率和信噪比这两个变量进行仿真模拟。

仿真采用四种模型——直线模型、二次函数模型、三角函数模型、对数函数模型, 分别代表现实中的黑体和发射率随波长变化明显的物体。直线模型发射率恒为 0.99。采用的二次函数模型为 $\varepsilon(\lambda) = a + (b - a) \times \frac{(\lambda - \lambda_a)^2}{(\lambda_b - \lambda_a)^2}$, 采用的三角函数模型为 $\varepsilon(\lambda) = a + (b - a) \times \sin \frac{\pi(\lambda - \lambda_a)}{(\lambda_b - \lambda_a)}$, 采用的对数函数模型为 $\varepsilon(\lambda) = a + (b - a) \times \ln \left[\frac{(e - 1)(\lambda - \lambda_a)}{(\lambda_b - \lambda_a)} \right]$, 其中 $a=0.6$, $b=0.8$, $\lambda_a=1$, $\lambda_b=2.5$ 。仿真过程中, 光谱通道数的变化通过固定光

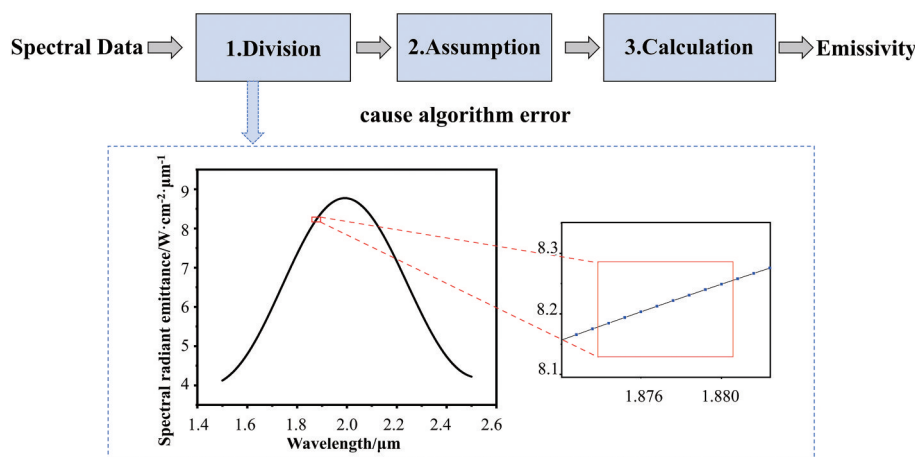


图 1 基于缓变假设的多光谱辐射法的原理和流程

Fig. 1 Flow of the slow-change spectral window method

谱范围,改变光谱分辨率实现。信噪比的变化通过改变掺杂在光谱辐射度数据的白噪声强度实现。

将光谱通道数 N 和信噪比 SNR 设置好后,根据上文介绍的具体流程,将每 5 个通道设置为缓变光谱窗口,计算发射率。在 $N=1\ 000$ 、 $\text{SNR}=300$ 时 $N=300$ 、 $\text{SNR}=100$ 及 $N=4\ 000$ 、 $\text{SNR}=500$ 的发射率计算值和设定值如图 2 所示。其中,设定值发射率为黑线,红线蓝线绿线分别为三种情况下计算出的发射率。发射率计算误差根据式 (3) 计算分别为 1.88%,3.43% 和 0.572%。

$$e_e = \frac{\sum_i^N \frac{|\varepsilon_{i\text{设定}} - \varepsilon_{i\text{计算}}|}{\varepsilon_{i\text{设定}}}}{N} \quad (3)$$

在不同光谱通道数和信噪比下做了大量仿真实验计算得到发射率误差后实验数据汇总于表 1-2 和表 3 并做出等高线图,图 3 清晰描述了两个独立变量信噪比和光谱通道数对发射率计算误差的影响。

图 3(a) 为使用基于缓变假设的多光谱辐射法对黑体测量发射率的仿真结果。由图 3(a) 可知,黑体测量误差与信噪比变化趋势大致相同,而光谱通

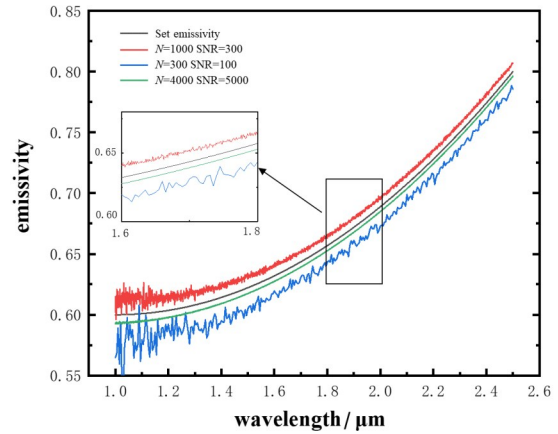


图 2 三种不同条件下发射率计算值与设定值对比

Fig. 2 Comparison of calculated and set values of emissivity under three different conditions

道数的增加对黑体发射率测量精度提升不大,即在测量黑体时多光谱辐射法的误差主要为光谱仪的测量误差。主要原因在于黑体的发射率为定值,算法中缓变假设带来的误差可以忽略不计。图 3(b) (c) (d) 为使用缓变假设的多光谱辐射法对三种复杂目标测量发射率的仿真结果,三个不同模型的仿真结果类似。与黑体不同,对复杂目标测量发射率

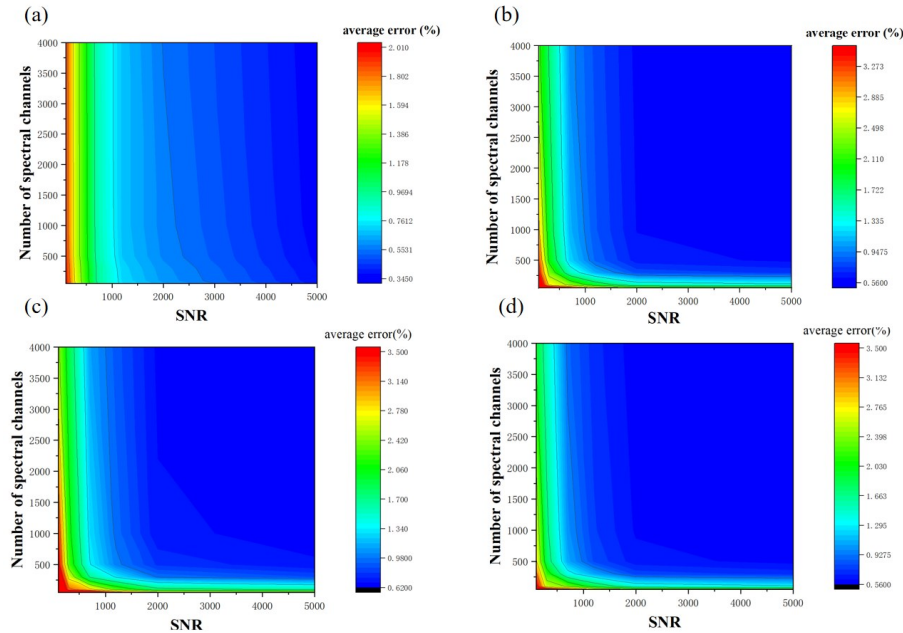


图 3 两种典型目标下发射率计算平均误差与光谱通道数和信噪比之间的关系:(a)黑体目标发射率计算结果;(b)复杂发射率目标计算结果(二次函数模型);(c)复杂发射率目标计算结果(三角函数模型);(d)复杂发射率目标计算结果(对数函数模型)

Fig. 3 Relationship between the average error of emissivity calculation and the number of spectral channels and signal-to-noise ratio for two typical targets: (a) blackbody target emissivity calculation results; (b) complex emissivity target calculation results (quadratic function model); (c) complex emissivity target calculation results (trigonometric model); (d) complex emissivity target calculation results (logarithmic model)

表1 复杂发射率模型仿真结果(二次函数模型)

Table 1 Simulation results of complex emissivity model (quadratic function model)

二次函数数	SNR=100	SNR=300	SNR=700	SNR=1200	SNR=2000	SNR=5000
N=50	5.27%	3.92%	3.47%	2.83%	2.46%	2.28%
N=100	3.87%	2.79%	2.43%	1.92%	1.49%	1.39%
N=300	3.43%	2.37%	1.49%	1.08%	0.796%	0.738%
N=500	3.24%	2.02%	1.19%	0.867%	0.657%	0.609%
N=1000	2.93%	1.88%	1.10%	0.826%	0.621%	0.584%
N=4000	2.18%	1.69%	0.986%	0.796%	0.602%	0.572%

表2 复杂发射率模型仿真结果(三角函数模型)

Table 2 Simulation results of complex emissivity model (trigonometric model)

三角函数数	SNR=100	SNR=300	SNR=700	SNR=1200	SNR=2000	SNR=5000
N=50	6.13%	4.68%	4.10%	3.37%	2.95%	2.71%
N=100	4.46%	3.21%	2.89%	2.31%	1.79%	1.63%
N=300	4.02%	2.69%	1.68%	1.32%	0.967%	0.861%
N=500	3.59%	2.28%	1.35%	1.01%	0.786%	0.687%
N=1000	3.38%	2.15%	1.28%	0.953%	0.692%	0.659%
N=4000	2.49%	1.90%	1.11%	0.892%	0.662%	0.638%

表3 复杂发射率模型仿真结果(对数函数模型)

Table 3 Simulation results of complex emissivity model (logarithmic model)

对数函数	SNR=100	SNR=300	SNR=700	SNR=1200	SNR=2000	SNR=5000
N=50	4.97%	3.82%	3.34%	2.76%	2.41%	2.21%
N=100	3.62%	2.58%	2.36%	1.89%	1.45%	1.32%
N=300	3.21%	2.19%	1.38%	1.07%	0.78%	0.721%
N=500	2.81%	1.82%	1.08%	0.795%	0.646%	0.598%
N=1000	2.63%	1.72%	1.01%	0.754%	0.612%	0.581%
N=4000	1.94%	1.51%	0.883%	0.709%	0.583%	0.564%

时,光谱通道数和信噪比的提高均会提升发射率测量精度,即测量复杂物体时发射率不仅存在算法误差,也存在光谱仪的测量误差。两种情况均说明在使用多光谱辐射法时光谱仪的测量误差会影响发射率测量的误差。因此,有必要研究光谱仪的性能参数来控制发射率测量的误差。

2 光谱仪参数分析及配置

2.1 光谱仪参数分析

根据普朗克黑体辐射定律,500℃、1000℃、1500℃、1800℃理想黑体的辐射出射度如图4所示。在0~1 μm波段,不同温度的辐射信号相对较

弱,特征和区分度不明显;而2.5~3.5 μm波段,是大气辐射透射率较低的波段;在1~2.5 μm波段,不仅不同温度间的特征和差异明显,还是大气窗口,是光谱仪理想的光谱范围。

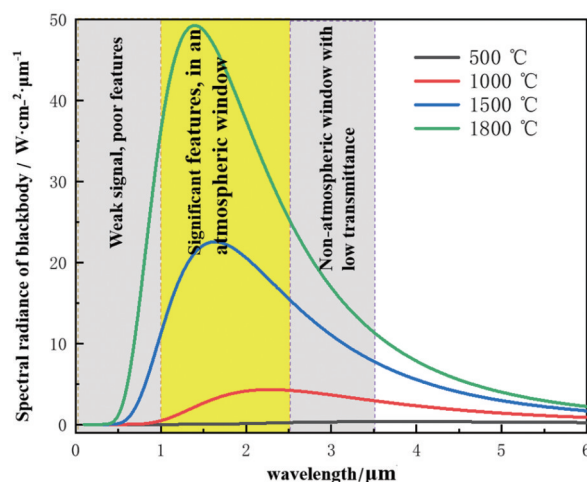


图4 500℃、1000℃、1500℃、1800℃理想黑体的辐射出射度
Fig. 4 Radiation emanations from an ideal blackbody at 500℃, 1000℃, 1500℃ and 1800℃

结合上文,光谱仪对发射率测量而言最重要参数为光谱通道数和信噪比。现有用作光谱分析的光谱仪器主要有光栅光谱仪和傅里叶光谱仪两种。光栅光谱仪的分光原理主要基于光栅将不同波长的光分散于不同方向的功能。傅里叶光谱仪的分光原理是将经过干涉后的光进行傅里叶变换后计算得到光谱。

光谱仪器的信噪比SNR可由公式(4)表示。其中, Φ 为光谱仪的光通量, η 为光学效率, δ 为探测器的量子效率, ν 为用波数表示的光谱分辨率, t 为积分时间,NEP为噪声等效功率。在光源相同,光学效率相同,探测器相同的情况下,光栅光谱仪和傅里叶光谱仪的信噪比差异主要来自于光通量 E 和积分时间 t 以及噪声等效功率NEP。

$$\text{SNR} = \frac{M(\nu, T) \eta \delta \nu t^{1/2}}{\text{NEP}} \quad (4)$$

光栅光谱仪的光通量 Φ_c 与光谱分辨率 R 和通光面积 A 的关系如式(5),其中 f 是准直镜有效焦距, l 是狭缝长度。傅里叶光谱仪光通量 Φ_{FTS} 与光谱分辨率 R 和通光面积 A 的关系如式(6)。在相同通光面积和分辨率的情况下,傅里叶光谱仪的光通量 E_{FTS} 与光栅光谱仪的光通量 Φ_c 关系如式(7)所示。

$$E_c = \frac{lA}{fR} \quad , \quad (5)$$

$$E_{\text{FTS}} = \frac{2\pi A}{R}, \quad (6)$$

$$E_{\text{FTS}} = \frac{2\pi f}{l} E_G. \quad (7)$$

一般的光栅光谱仪 f/l 大于 30, 因此一般情况下傅里叶光谱仪的光通量是光栅光谱仪的 200 倍以上。对于光谱范围为 $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的光谱仪, 一般情况下, 光栅光谱仪采集一次数据约为 100 ns , 而傅里叶光谱仪采集一次数据约为 1 s 。光栅光谱仪的噪声等效功率约为 $10^{-13} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 而傅里叶光谱仪的噪声等效功率约为 $10^{-10} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。结合式 (3) 和式 (6), 容易得到傅里叶光谱仪的信噪比约为光栅光谱仪的 600 倍。综上, 选用光谱范围为 $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的可调节光谱分辨率的傅里叶光谱仪作为多光谱辐射法配置的仪器。

2.2 傅里叶光谱仪参数配置

根据 1.2 节的仿真计算结果, 基于缓变假设的多光谱辐射法针对不同目标发射率测量时, 通道数和信噪比对测量误差的影响趋势不同, 因此该方法在应用时要综合考虑通道数目与信噪比关系。针对复杂目标的发射率要达到 1% 以上的发射率测量精度, 光谱仪需要至少 1 000 个通道, 信噪比高于 1 000 以上, 且应具备调节通道数和信噪比的功能。在 $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$, 选择通道数目为 1 500, 即光谱分辨率为 1 nm , 对应波数为 4 cm^{-1} 。在上述条件下, 结合式

(1) 和 (3), 为使测量 800°C 黑体时达到 1 000 以上的信噪比, 采用光谱仪结构参数如表 4 所示, 结构示意图如图 5(a) 所示。采用两个中空回射器围绕转轴摆扫的方式, 通过在光路中加入两块反射镜, 加倍光程差的变化, 减少音圈电机的行程, 从而提高音圈电机的精度, 保持干涉仪稳定性。焦平面处于干涉强度如图 5(b) 所示。使用线度为 1 mm 的 InGaAs 光电二极管接收干涉信号, 其响应率如图 5(c) 所示。

3 实验验证

3.1 实验平台搭建和过程

实验设备置于光学平台上, 经调整后, 将可调温黑体辐射对准干涉仪入瞳, 在干涉仪内完成干涉后, 辐射经过离轴抛物面反射镜进入探测器, 随后由控制和采集模块将采集到的数据传输到电脑。实验照片如图 6 所示。将黑体加热至 600°C , 待黑体温度维持恒定保持 5 分钟时, 即认为温度稳定, 随后使用光谱仪 1 cm^{-1} 、 2 cm^{-1} 、 4 cm^{-1} 、 8 cm^{-1} 、 16 cm^{-1} 的光谱分辨率, 每次改变光谱分辨率时先采集背景光谱, 随后多次采集数据。分别采集连续光谱辐照度数据和连续两次光谱辐照度测量之比即 100% 线, 为尽量使数据直观, 截取部分片段分别如图 7(a)、(b) 所示。可以看到, 光谱分辨率越高, 光谱通道数越多, 100% 线越平滑, 光谱辐照度的信噪比越低。后将

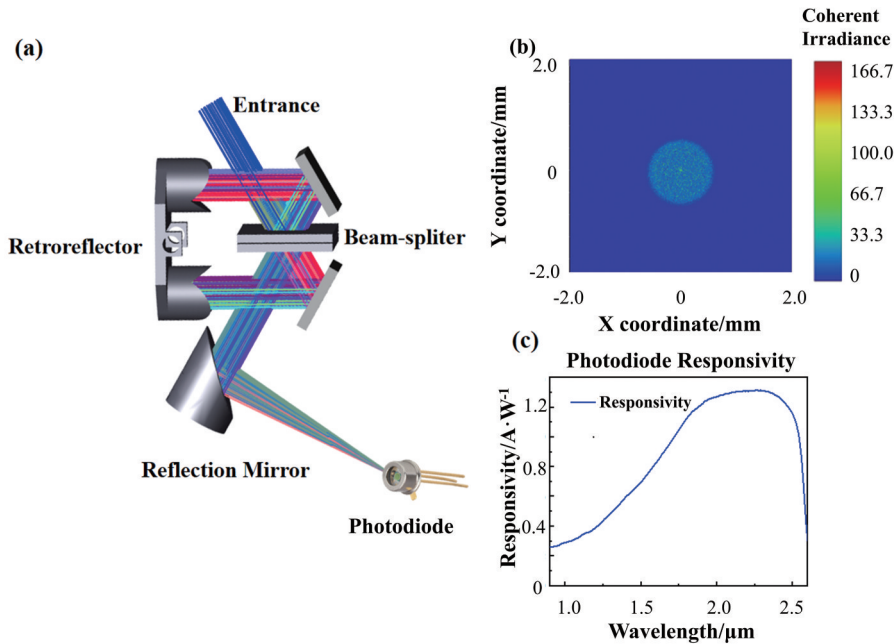


图5 傅里叶光谱仪干涉仪和探测器:(a)干涉仪结构示意图;(b)焦平面处干涉强度;(c)探测器响应率

Fig. 5 Fourier spectrometer interferometer and detector: (a) schematic of the interferometer structure; (b) interference intensity at the focal point; (c) detector responsivity

黑体温度调节至 650 °C、700 °C、750 °C、800 °C、850 °C、900 °C 后分别测量 100% 线和光谱辐照度数据。

3.2 实验结果

同条件下连续多次采集的 100% 线可用于信噪比的测量。参考国标 GB/T 21186-2007^[16]中对傅里叶光谱的信噪比测量标准,通过 100% 线(8)来计算信噪比,如式(8)所示。

$$\begin{cases} N(\tilde{\nu}) = 1 - \frac{T_a(\tilde{\nu})}{T_b(\tilde{\nu})} \\ N_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N(\tilde{\nu})^2} \\ R_{\text{SN}} = \frac{100\%}{N_{\text{rms}}} \end{cases}, \quad (8)$$

式中, $T_a(\tilde{\nu})$ 和 $T_b(\tilde{\nu})$ 分别是同一光谱仪两次测量获得的光谱, $\frac{T_a(\tilde{\nu})}{T_b(\tilde{\nu})}$ 为连续两次测量之比即 100% 线。 N_{rms} 为 $N(\tilde{\nu})$ 的均方根误差。在计算发射率之

后,通过光谱辐照度数据计算黑体的发射率,结合光谱分辨率和计算得出的信噪比得出实验结果,如表 4 所示。

表 4 干涉仪参数

Table 4 System parameters

指标	参数
口径	20 mm
光谱范围	1~2.5 μm
光谱分辨率	1 cm^{-1}
光电二极管材料	InGaAs
噪声等效功率	$1.0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$

表 5 中,发射率误差以百分比表示,括号内为该条件下光谱辐照度的信噪比。将表 5 实验结果整理后作等高线图,如图 8 所示。

实验结果与仿真结果类似,以黑体为目标时发射率测量误差与通道数相关性不强,而与信噪比的相关性较强,即在测量黑体时,系统误差主要为光谱仪的测量误差。原因为黑体的发射率十分接近

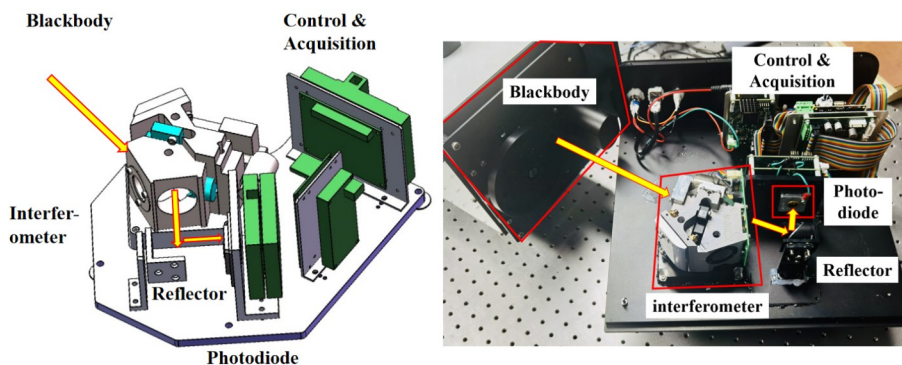


图 6 实验平台实物图

Fig. 6 Experimental platform

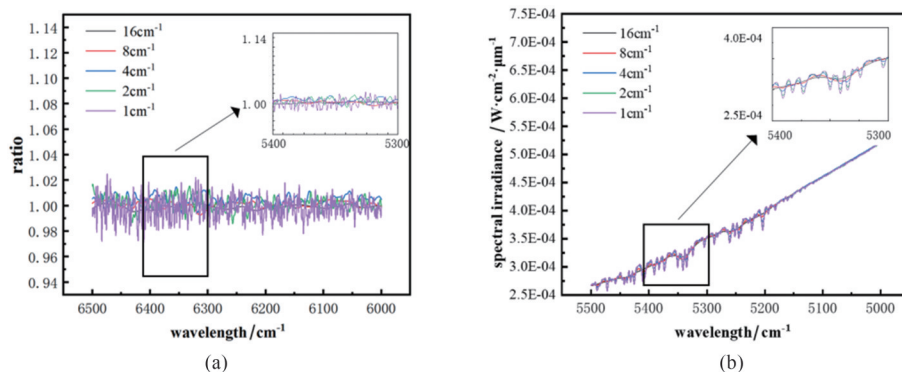


图 7 600°C 时相同条件下不同光谱分辨率采集的 100% 线和光谱辐照度图: (a) 100% 线; (b) 光谱辐照度图

Fig. 7 100% line and spectral irradiance maps collected at the same conditions with different spectral resolutions at 600°C: (a) 100% line; (b) spectral irradiance

表5 黑体发射率实验计算结果

Table 5 Blackbody emissivity experimental calculation results

Emissivity calculation error	1cm ⁻¹	2cm ⁻¹	4cm ⁻¹	8cm ⁻¹	16cm ⁻¹
600.00 °C	2.81%(124.5)	2.56%(198.5)	2.11%(284.8)	1.92%(413.6)	1.28%(645.2)
650.00 °C	2.39%(254.4)	2.18%(380.0)	1.85%(559.1)	1.19%(743.6)	1.06%(1051)
700.00 °C	2.03%(373.6)	1.54%(647.8)	1.16%(877.0)	0.97%(1481)	0.89%(1872)
750.00 °C	1.72%(567.0)	1.01%(943.6)	0.91%(1324)	0.86%(1859)	0.71%(3165)
800.00 °C	1.06%(737.0)	0.93%(1109)	0.80%(2132)	0.78%(2499)	0.69%(3310)
850.00 °C	0.93%(1101)	0.82%(2219)	0.76%(2482)	0.70%(2836)	0.65%(3742)
900.00 °C	0.86%(1504)	0.78%(2370)	0.67%(3710)	0.55%(4702)	0.38%(6814)

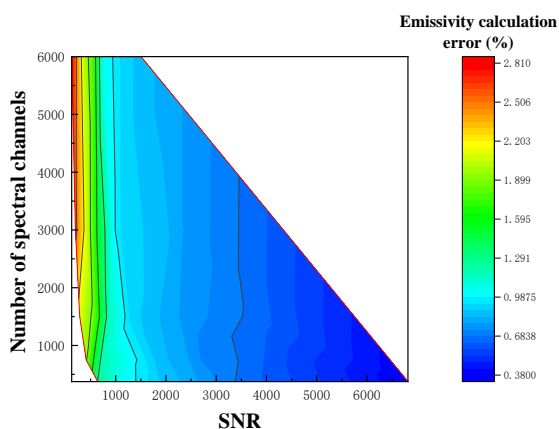


图8 黑体实验信噪比和光谱通道对计算误差的等高线图

Fig. 8 Contour plots of blackbody experimental signal-to-noise ratio and spectral channel against computational error

1,且几乎不随波长变化,缓变假设产生的理论误差可以忽略不计。结合仿真模拟结果和黑体实验结果,结论如下:在测量类似发射率几乎不随波长变化的目标时,多光谱辐射法的误差主要为光谱仪测量误差,此时提升信噪比对提升发射率的计算精度有很大帮助。对900 °C黑体测量时,选用光谱分辨率为16 cm⁻¹(4 nm),通道数为375的傅里叶光谱仪时信噪比可达到6 814,误差为0.38%。在测量发射率随波长变化较为复杂的目标时,理论误差和光谱仪测量误差均占有一定比重,此时应适当提高光谱分辨率,减小信噪比以获得最精确的结果。

4 结论

介绍了基于缓变假设的多光谱辐射法的原理和过程,并通过仿真模拟提出了多光谱辐射算法误差和光谱仪测量误差与光谱仪参数的关系,配置光谱仪参数以减小系统误差,选择了一款光谱范围为1~2.5 μm,光谱分辨率可调为1 cm⁻¹、2 cm⁻¹、4 cm⁻¹、8 cm⁻¹、16 cm⁻¹的傅里叶光谱仪作为实

验仪器。实验结果表明,在1~2.5 μm的光谱范围内,为使黑体发射率测量误差小于1%,光谱仪的光谱通道数应不小于400,信噪比不低于1 000;对发射率变化复杂的目标,如发射率模型遵守二次函数、三角函数或对数函数模型,使用基于缓变假设的多光谱辐射法测量发射率,为使测量误差小于1%,应至少具有1 000个光谱通道数及1 200以上的信噪比。同时,本文提出应根据算法特点和目标发射率特性引导光谱仪配置,并综合考虑算法引入的约束条件误差和光谱仪的测量误差,合理控制系统误差,为多光谱辐射法实现发射率的精确测量提出了一种全新的解决方案。

参考文献

- [1] Ishii J, Ono A, Stisfo E. Fourier transform spectrometer for thermal-infrared emissivity measurements near room temperatures [C]. Conference on Optical Diagnostic Methods for Inorganic Materials, 2000.
- [2] Ishii J, Ono A. Uncertainty estimation for emissivity measurements near room temperature with a Fourier transform spectrometer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(12): 2103.
- [3] DAI J M, LU X D, CHU Z X, *et al.* Development of multi-point multi-wavelength pyrometer with a synchronous DAS [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戴景民, 卢小冬, 褚载祥, 等. 具有同步数据采集系统的多点多波长高温计的研制[J]. *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(1): 62-66.
- [4] Hanssen L M, Mekhontsev S N, Khromchenko V B. Infrared spectral emissivity characterization facility at NIST [C]. *Thermosense XXVI*, 2004, **5405**: 1-12.
- [5] Teodorescu G, Jones P D, Overfelt R A, *et al.* Normal emissivity of high-purity nickel at temperatures between 1440 and 1605 K [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2008, **69**(1): 133-138.
- [6] Ren D, Tan H, Xuan Y, *et al.* Apparatus for Measuring Spectral Emissivity of Solid Materials at Elevated Temperatures [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2016, **37**: 1-20.
- [7] Guo Y. M, Pang S J, Luo, Z J, *et al.* Measurement of Directional Spectral Emissivity at High Temperatures [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2019, **40**: 1-12.

- [8] Xing J, Cui S, Qi W, *et al.* A data processing algorithm for multi-wavelength pyrometry—which does not need to assume the emissivity model in advance [J]. *Measurement*, 2015, **67**: 92–98.
- [9] Xing J, Rana R S, Gu W. Emissivity range constraints algorithm for multi-wavelength pyrometer (MWP) [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(17): 19185–19194.
- [10] Zhang Y, Zou Z, Yan F. A data processing algorithm for multispectral radiation thermometry based on multi-segment linear model and secondary inversion [J]. *Measurement*, 2022, **201**: 111753.
- [11] Sun X G, Dai J M, Cong D C, *et al.* Development of a Special Multi-Wavelength Pyrometer for Temperature Distribution Measurements in Rocket Engines [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2002, **23**(5): 1293–1301.
- [12] Shi J, Chen G, Tan Y, *et al.* The inversion of target radiant temperature and distance via spectrum separation [J]. *Applied Optics*, 2020, **59**(10): 3102–3108.
- [13] Xing J, Liu Z, Luo J, *et al.* Generalized inverse matrix normalization algorithm to extract high-temperature data from multiwavelength pyrometry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, **91**(10): 104903.
- [14] Wang N, Shen H, Zhu R. Constraint optimization algorithm for spectral emissivity calculation in multispectral thermometry [J]. *Measurement*, 2020, **170**: 108725.
- [15] Luan, Y F, Wang X, He Z P, *et al.* Temperature and emissivity measurement algorithm using a moving emissivity retardation spectral window method based on Lagrange mean value theorem [J]. *Applied Optics*, 2023, **62**(21): 5727–5734.
- [16] 全国工业过程测量和控制标准化技术委员会分析仪器分技术委员会 GB/T21186——2007 傅立叶变换红外光谱仪[S], 2007.