

## 基于弹光调制光谱的多光谱温度测量

胡将<sup>1,2,4</sup>, 李克武<sup>2,3,4</sup>, 李晋华<sup>2,4</sup>, 王志斌<sup>1,2,4\*</sup>

<sup>1</sup>中北大学仪器与电子学院, 山西 太原 030051;

<sup>2</sup>中北大学前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051;

<sup>3</sup>中北大学电气与控制工程学院, 山西 太原 030051;

<sup>4</sup>山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051

**摘要** 为了实现快速、准确的高温测量,在多光谱辐射理论的基础上,提出一种基于弹光调制光谱的多光谱温度测量方法。对基于弹光调制的多光谱测温装置系统结构进行了详细介绍,并且采用 MATLAB 软件对温度测量方法进行仿真分析,最后进行实验验证。实验中采用非均匀快速傅里叶变换(NUFFT)算法将高温物体辐射产生的弹光调制傅里叶变换干涉信号进行复原,在对探测器进行光谱响应函数标定的基础上,根据响应函数进行修正得到实际光谱复原图,再利用多光谱温度反演算法得到黑体温度。结果表明,所提方法的温度计算误差为 5% 左右,并通过标准黑体辐射源进行实验,对温度测量进行了验证。

**关键词** 测量; 信号处理; 弹光调制光谱; 多光谱辐射

**中图分类号** TN911.7

**文献标识码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.0904005

### 1 引言

温度的准确测量对于航空类尖端技术的不断发展和工业生产过程中的检测与控制有着非常重要的作用<sup>[1-3]</sup>。在工业生产中,如钢铁材料的生产与定型等行业,测量温度参数,并对其进行控制,可以保证产品质量和生产效率,对促进制造业的发展具有重要的经济和社会意义。因此,提高对高温物体的温度测量精度有较大的应用需求。

常见的温度测量方法分为接触式测量与非接触式测量两种<sup>[4-6]</sup>,而相比于传统的接触式测量,非接触式测温方法能够避免接触材料,在高温测量范围和准确性上存在优势。其中多光谱测温是通过得到高温物体在多个波长处的辐射光谱曲线的功率谱密度等信息来计算出温度<sup>[7-8]</sup>,不用其他设备和额外信息,对高温体也无特殊规定,具有快速、非接触和测温上限高的优点,在高温物体的真温测量中应用广泛。从 1980 年起基于多光谱测温理论,国内外已有一些单位提出并制作了四波长辐射测温仪、棱镜分光

式多光谱测温计等<sup>[9-10]</sup>,并在炸药爆炸的瞬态温度、飞机发动机尾焰温度测量等方面应用得比较多。

弹光调制型傅里叶变换光谱仪是将弹光调制干涉模块代替傅里叶变换光谱仪中的机械扫描模块<sup>[11-12]</sup>,具有较高的调制频率、较宽的光谱范围、没有运动部件、系统工作稳定性强等优点,可以在爆炸、燃烧等高速探测应用环境下进行测量,对提高爆炸过程瞬态温度测量精度的研究有一定意义。本文基于多光谱测温理论,采用弹光调制型光谱仪采集高温物体的辐射信号,利用非均匀快速傅里叶变换(NUFFT)算法对复原出的光谱曲线进行温度反演,并用标准高温辐射源进行验证,从而得到较为精确的黑体温度。

### 2 多光谱测温原理

由辐射定律可知,温度高于热力学最低温度的所有物体都会往外界辐射能量,这种辐射信号的能量与其自身温度具有正向关系。其中,能够吸收所有辐射到自身的能量,不反射、不透射,可以在相应的温度下释放出最大辐射能的物体被称为黑体<sup>[13-14]</sup>。

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-10-06; 录用日期: 2021-10-21

基金项目: 山西省自然科学基金(201901D211234, 201901D111145)

通信作者: \*wangzhibin@nuc.edu.cn

发出信号的能量关系可用普朗克公式表示为

$$E(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}, \quad (1)$$

式中： $\lambda$  为选取的波长； $T$  为测量温度； $C_1$  和  $C_2$  为普朗克第一和第二辐射常数。

高温物体辐射能力通常与其材料种类、表面形状有关，可以用表面发射率  $\epsilon(\lambda, T)$  来表示。光谱发射率的定义是单一波长下被测物与同温度下标准黑体辐射功率的比值<sup>[15]</sup>，在一定温度范围内，温度低于 3000 K 时，可将辐射定律的普朗克公式近似为维恩公式，因此辐射测温定理可表示为

$$E(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda T)}, \quad (2)$$

对式(2)两边取对数，可得到

$$\ln E(\lambda, T) = \ln \epsilon(\lambda, T) + \ln C_1 - 5 \ln \lambda - C_2/\lambda T. \quad (3)$$

当前在多光谱温度测量技术中，用得比较多的一种发射率模型是将物体的光谱发射率看成关于波长的函数，即发射率能用以波长为参数的函数代替，表达式如下：

$$\ln \epsilon(\lambda, T) = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + \dots + a_m \lambda^m. \quad (4)$$

将式(4)代到式(3)中，并进行移项合并，可得

$$\ln E(\lambda, T) - \ln C_1 + 5 \ln \lambda = -\frac{C_2}{\lambda T} + a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + \dots + a_m \lambda^m, \quad (5)$$

其中  $\ln E(\lambda, T)$  是测量值， $C_1$  是常数，选取的波长  $\lambda$

也是已知的，因此可假设  $A = \ln E(\lambda, T) - \ln C_1 + 5 \ln \lambda$ ，再将该式的左右两边同时乘以  $\lambda$ ，可得到关于  $\lambda$  的线性方程为

$$y = A\lambda = -\frac{C_2}{T} + a_0 \lambda + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda^3 + \dots + a_m \lambda^{m+1} = b_0 + b_1 \lambda + b_2 \lambda^2 + \dots + b_{m+1} \lambda^{m+1}, \quad (6)$$

式中： $y = A\lambda = \ln \frac{E(\lambda, T) \times C_1}{\lambda^5} = \ln \frac{M \times C_1}{\lambda^5}$ ； $M = E(\lambda, T)$  为测得的辐射强度。

求解温度时，取  $n$  个波长及其相应的辐射亮度代入式(6)，即可得到  $n$  个方程，用最小二乘法求解由上述方程组成的方程组，使求解结果最接近真实值，其中方程组有解的必要条件是  $n \geq m + 2$ ，求出  $m + 2$  个系数，即  $b_0, b_1, \dots, b_{m+1}$ ，便可得到测量的温度。本文利用线性拟合法求解方程组，将选取的  $n$  个测试波长代入方程组进行处理计算，用线性最小二乘法对未知参数进行求解，得到系数  $b_0$  的值，则测量温度为  $T = -C_2/b_0$ 。

### 3 基于弹光调制的多光谱测温装置

#### 3.1 辐射测温装置

弹光调制型光谱仪测温装置主要由望远镜、反射镜等前置光学系统、弹光调制干涉模块、光电探测系统和数据采集模块及上位机处理系统组成，其装置整体结构如图 1 所示。

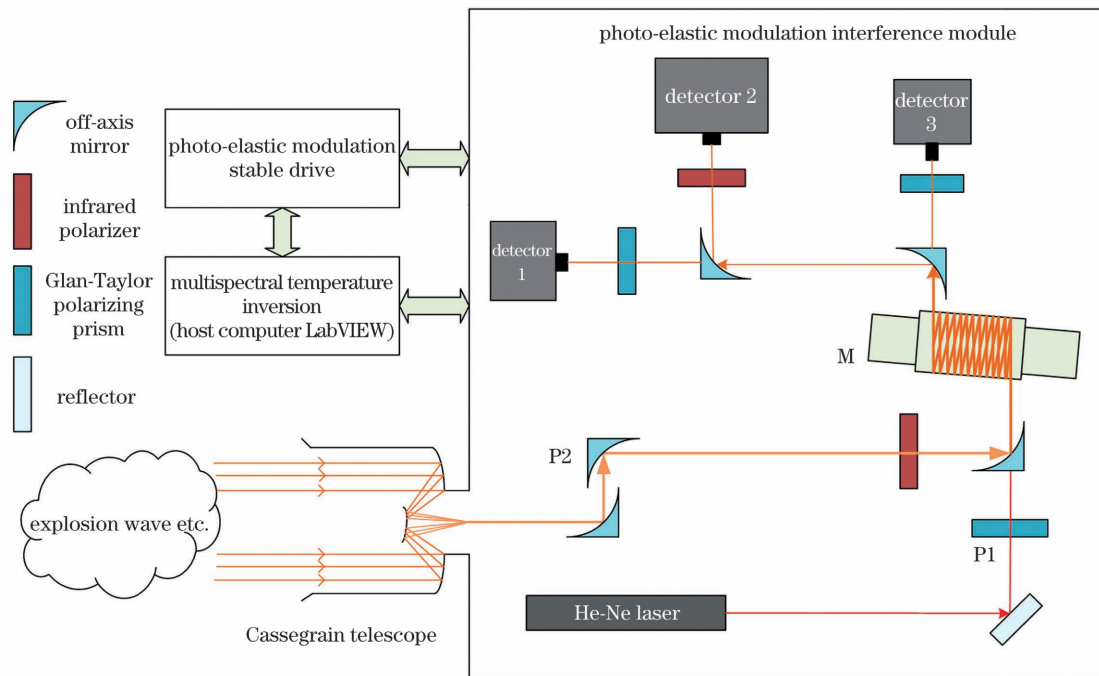


图 1 弹光调制型傅里叶变换光谱仪结构原理图

Fig. 1 Schematic of the structure of photo-elastic modulation Fourier transform spectrometer

如图 1 所示,探测器 1、3 为可见探测器,2 为红外探测器。使用时前置光学系统对准探测目标,待测目标的辐射光信号通过望远镜会聚,经起偏器后成为偏振光进入到弹光调制干涉模块 M 中,在外加的压电晶体周期性驱动下,弹光晶体产生干涉信号,同时氦氖(He-Ne)激光器发出的光经过反射镜和格兰泰勒偏振棱镜 P1,也到达弹光调制干涉模块,辐射光信号和定标激光经过反射镜后,分成两束干涉光,其中一束干涉光为已知波长的激光,进入探测器 3 进行光程差定标,为复原算法提供光程差值,另一束光为待测目标辐射光干涉信号,通过离轴反射镜同时进行可见光与红外

光的探测。实验中使用红外探测器的高速采集卡采集得到目标的干涉数据,并对干涉数据进行预处理,缓存和传输到上位机中进行算法实时处理,便能够得到目标光源光谱,再利用多光谱温度反演算法来求解出温度。

### 3.2 非均匀快速傅里叶变换算法

弹光调制光谱仪的调制相位差呈正弦变化,产生的干涉信号是非线性的,因此需要采用加速的 NUFFT 算法来对采集的干涉信号进行复原。NUFFT 算法在本质上是将各种插值算法和标准的 FFT 算法相结合的非均匀快速傅里叶变换算法<sup>[16-18]</sup>。NUFFT 算法流程如图 2 所示。

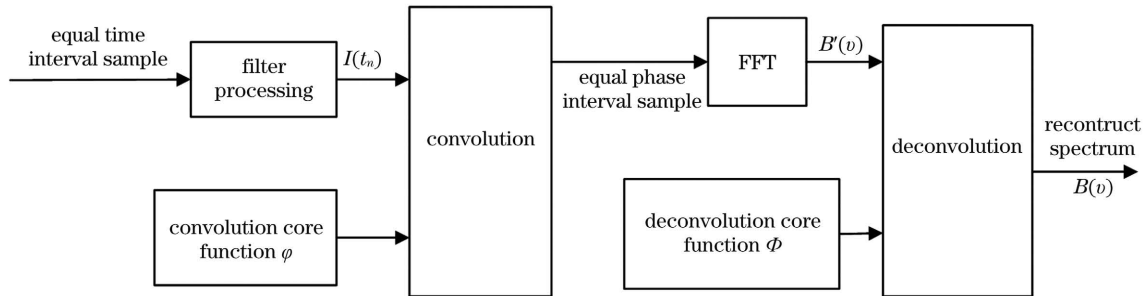


图 2 NUFFT 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of NUFFT algorithm

首先,根据 NUFFT 算法有

$$\mathcal{F}(d) = \sum_{j=0}^{M-1} f(x_j) \exp(-id x_j), \quad (7)$$

$$d = -M_r/2, \dots, M_r/2 - 1,$$

式中: $\mathcal{F}(d)$ 为傅里叶变换的结果; $f(x_j)$ 为不均匀采样的离散化函数; $d$ 为采样点数; $x_j$ 为光程差间隔; $M_r$ 为过采样后均匀分布的等光程差点数。

在式(7)中,等时间采样得到的初始  $M$  个非均匀数据点可以表示为

$$f(x) = \sum_{j=0}^{M-1} f_j \delta(x - x_j), \quad (8)$$

式中: $\delta(x)$ 为狄拉克函数。 $f(x)$ 满足不了笛卡儿网格条件,还需进行以下处理

$$f_\tau(x) = f(x) \otimes g_\tau(x) = \int_0^\infty f(y) g_\tau(x - y) dy, \quad (9)$$

式中: $g_\tau(x)$ 为高斯函数; $\otimes$ 为卷积符号。

卷积后的  $f_\tau(x)$ 是一个平滑函数,由此来定义  $x$  轴上的离散均匀采样函数:

$$f_\tau(m \Delta x) = \sum_{j=0}^{N-1} f_j \cdot g_\tau(m \Delta x - x_j), \quad (10)$$

因此可以对式(10)的  $f_\tau(m \Delta x)$  直接进行 FFT 运

算,退卷积后就能得到非等间隔数据的频域函数:

$$\mathcal{F}(d) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\tau}} \exp(d^2 \tau) \mathcal{F}_\tau(d). \quad (11)$$

### 3.3 测量波长的选取及响应标定

测温中首先用 NUFFT 算法将采集到的干涉信号进行复原,并根据探测器响应曲线进行相应修正,得到原始复原光谱图。其中,NUFFT 算法是把卷积算法和快速傅里叶变换算法相结合,主要是为了解决在非均匀分布空间域值的情况下估算均匀网格分布的频域值的问题。然后,在复原的光谱图上选取测量波长,考虑到所用红外探测器的光谱响应范围和大气中气体吸收峰的位置,测量波长的选取是将复原光谱在  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  波段等间隔分成  $n$  路,选取这  $n$  路作为测量波长。为了实现快速测量,探测器响应时间要尽量短。另外,若测量波长中存在几个波长位于干扰谱段上,计算误差就会明显偏大,出现测量失真。因此在选取测量波长时,要尽量避免干扰波段和探测器增益较小的部分。

在进行多光谱温度反演运算之前,首先要以已知的辐射源为参考得到探测器的响应函数,即进行仪器标定,使实际测得的辐射曲线更接近真实曲线。系统设备中所选用的红外探测器为液氮

制冷型探测器,其光谱范围为  $1\sim 5\ \mu\text{m}$ ,增益也比较大。光谱仪系统在标定中采用该探测器对输出辐射信号能量已知的标准光源进行探测。通过实际测量可以得到探测器响应函数,其光谱响应曲线如图 3 所示。

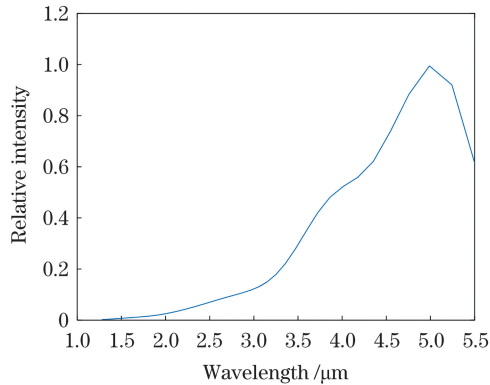


图 3 探测器光谱响应曲线  
Fig. 3 Detector spectral response curve

## 4 仿真与实验

### 4.1 仿真分析

仿真与分析流程如图 4 所示。为了对多光谱温度反演测量算法进行分析,首先在 MATLAB 软件中仿真得到  $1500\ \text{°C}$  理论黑体的干涉信号图,再用 NUFFT 算法复原理论黑体干涉信号得出黑体光谱复原图,该复原图与利用普朗克公式仿真得出的理论黑体复原图基本重合,验证了 NUFFT 算法的准确性,结果如图 5 所示。然后在复原得到的黑体理论曲线中,将  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  波段均匀分成 16 路,选取每段的中心波长作为多光谱测温的测量波长,应用多光谱温度反演算法对方程进行求解,采用不同的阶数进行求解得到相应温度,并将拟合温度曲线与标准曲线进行对比,进而确定最小二乘法的阶数,如图 6 所示。

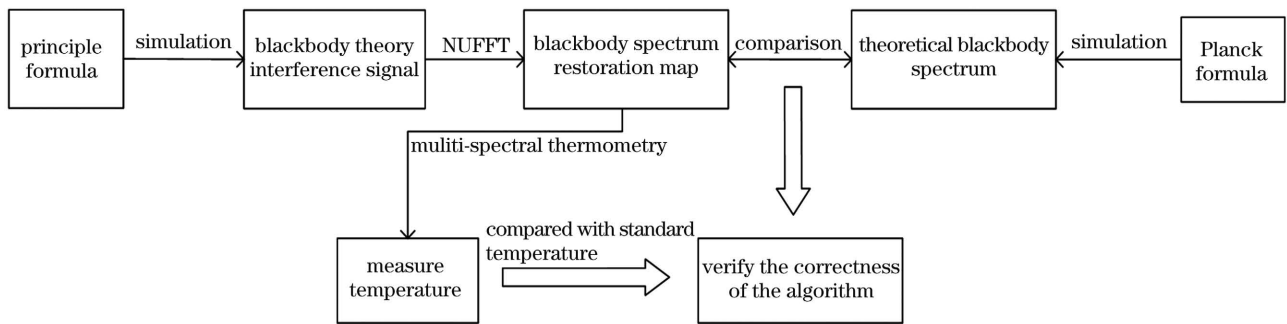


图 4 仿真分析流程图  
Fig. 4 Flow chart of simulation and analysis

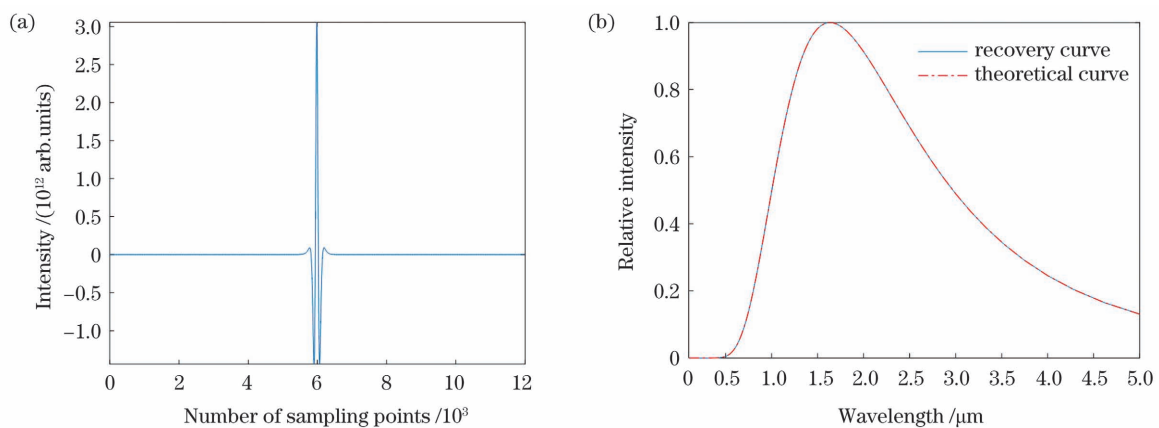


图 5 MATLAB 仿真结果。(a)黑体仿真干涉信号;(b)黑体复原光谱与理论光谱的对比  
Fig. 5 MATLAB simulation results. (a) Blackbody simulation interference signal; (b) comparison between blackbody restoration spectrum and theory spectrum

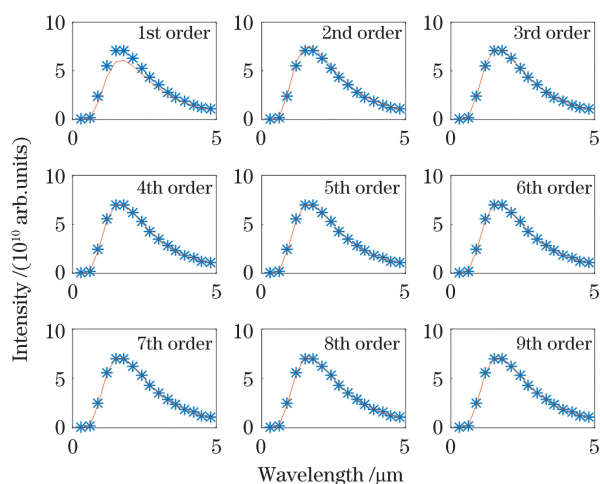


图 6 不同阶数光谱的拟合结果

Fig. 6 Fitting results of spectra with different orders

由表 1 可知,对于 4 个温度下的黑体理论干涉信号采用 NUFFT 算法进行复原,再采用最小二乘

表 1 仿真值与标准值比较

Table 1 Comparison of simulated value and standard value

Standard value / °C	1500	1700	1900	2100
Simulated value / °C	1508	1701	1905	2098

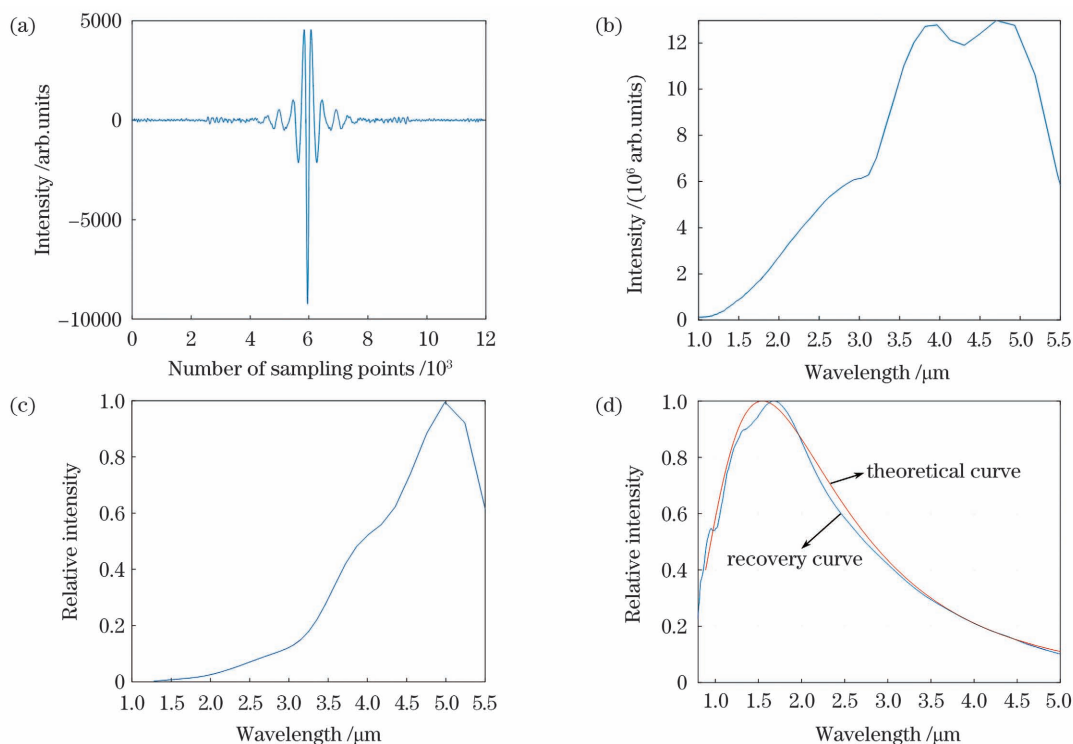


图 7 大光程差 PEM 产生的黑体干涉信号和重建光谱。(a)大光程差 PEM 产生的干涉图;(b)基于加速的 NUFFT 算法重建的黑体光谱;(c)测温装置的仪器响应曲线;(d)修正响应后重建的黑体光谱

Fig. 7 Blackbody interference signal and reconstructed spectra generated by PEM with large optical path difference. (a) Interferogram produced by PEM with large optical path difference; (b) blackbody spectrum reconstructed by accelerated NUFFT algorithm; (c) instrument response curve of temperature measuring device; (d) reconstructed blackbody spectra after modifying the response

法线性拟合求解多光谱测温方程,结果可靠,偏差较小。对表 1 的数据进行对比分析,可以看出,多光谱高温测量方法有很高的测温精度,测温算法可行。

## 4.2 实验验证

采用基于实验室研制的弹光调制型光谱仪样机,以已知波长为 632.8 nm 的激光为参考激光,选用八角形的硒化锌(ZnSe)晶体和谐振频率为 50 kHz 的压电晶体作为弹光调制器(PEM),在外部电压的驱动作用下,晶体形变产生随时间调制的干涉信号,一幅干涉图获取时间为十几  $\mu\text{s}$ 。使用高速采集板卡为美国 Xilinx 公司生产的 16 位分辨率、1000 MSa/s 采样率的 7010 载体来对高温黑体的干涉数据进行采集。

实验中利用已知温度的标准高温黑体辐射源进行温度测量验证。首先,将光谱仪温黑体辐射源,设定温度为 1000 °C,待达到指定温度,稳定 10 min 后进行干涉图采集,再升高温度,在不同的温度下进行实验测量。将多光谱温度反演后的实际测量值与温度标准值进行比较,做整体修正,可以较为准确地测量温度。

图 7(a)所示为采集的黑体干涉信号图。采用

NUFFT 算法对干涉图进行光谱复原,得到的光谱如图 7(b)所示。可以看到,以 1600 °C 黑体信号为例,当干涉信号光程差较大时,利用加速的 NUFFT 算法能够较好地复原标准黑体信号的光谱。再根据探测器响应进行修正、平滑处理后得到实际的黑体光谱,如图 7(d)所示。

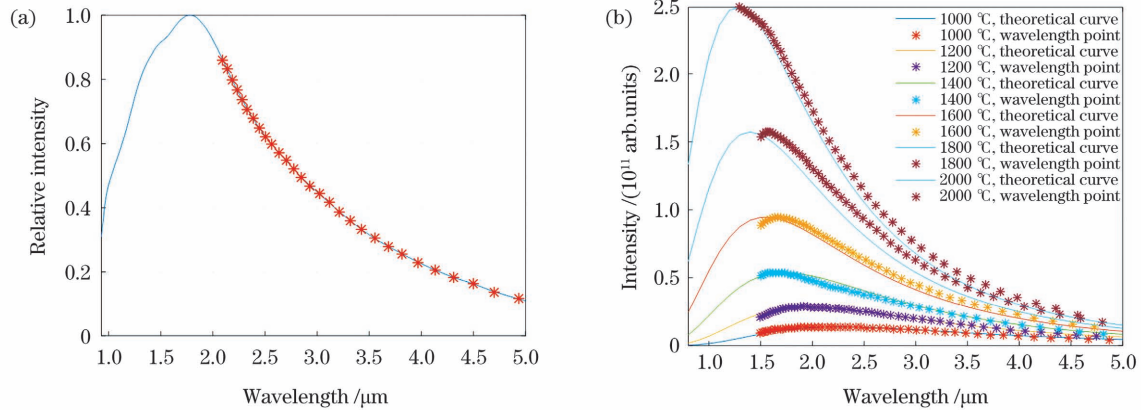


图 8 测量波长的选取。(a) 1600 °C 黑体复原光谱的测量波长选取;(b) 不同温度测量波长的选取与理论曲线

Fig. 8 Selection of measurement wavelength. (a) Selection of measurement wavelength of 1600 °C blackbody reconstructed spectrum; (b) selection of measurement wavelengths and theoretical curves under different temperatures

表 2 多次实验的测量温度值

Table 2 Measurement temperature values from multiple experiments

Number of experiments	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Measurement value /°C	1556	1575	1603	1671	1555	1477	1497	1598	1588	1507

为使结果更加准确,还需根据偏差对探测器的响应函数曲线进行校正,使其更接近系统装置的仪器响应,校正后再进行重复实验,扣除系统仪器自身的影响,弹光调制测温装置经过校正后,温度反演的结果比较准确。在比较不同温度点的实测值与标准值的过程中,重复实验 10 次后,发现测量温度在标准值上下波动,且误差较小,在标准值的 5% 附近,如图 9 所示。

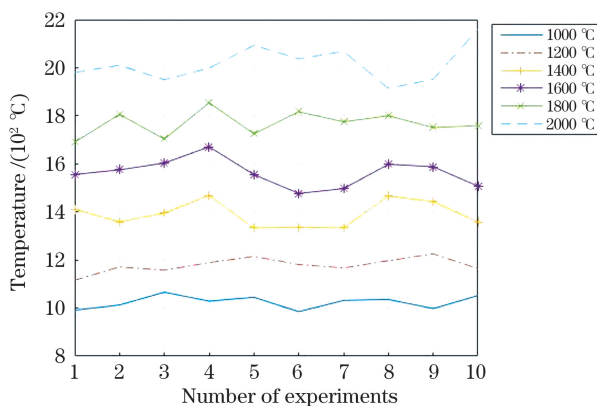


图 9 测量结果的波动

Fig. 9 Measured temperature fluctuation graph

从图 7(c)可以看出,探测器响应前半部分较弱,做相应修正时,小波长处会有些放大的干扰,因此在得到修正重建的光谱后,选取的测量波长靠后,在 1.5~5 μm 波段范围上选取 48 路测量波长及其相应的光谱强度[图 8(b)]代入多光谱算法中,得到测量温度,如表 2 所示。

## 5 结 论

采用弹光调制干涉模块设计了多光谱测温仪,并且采用加速的 NUFFT 算法对采集的干涉信号图进行光谱复原,多光谱温度反演算法增加了测量波长的点数,减小了温度测量的误差。实验中先利用已知的辐射源对测量装置进行探测器光谱响应标定,再通过标准黑体温度测量实验对该系统温度测量结果进行验证。与传统测温技术相比,该光谱仪采用的弹光调制干涉模块具有光谱测量速度快、光谱范围宽的优点,且该系统无运动部件,稳定性好,在各种环境下都能够快速获得高温物体的辐射场光谱信号,并将获得的光谱信号经过上位机完成光谱数据的处理,最终求解得出温度,实现了高温物体温度的非接触测量。

## 参 考 文 献

- [1] 席剑辉, 姜瀚. 基于 RBF 网络的红外多光谱辐射测温[J]. 红外技术, 2020, 42(10): 963-968.  
Xi J H, Jiang H. Infrared multispectral radiation-

- temperature measurement based on RBF network[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(10): 963-968.
- [2] 张敏娟. 弹光调制傅里叶变换光谱复原高速数据处理技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.  
Zhang M J. The research of high-speed data processing technology of the photo-elastic modulation Fourier transform spectral reconstruction [D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [3] 冯驰, 刘晓东, 王兆丰. 基于改进发射率模型的多光谱测温方法[J]. *应用科技*, 2020, 47(5): 45-52.  
Feng C, Liu X D, Wang Z F. Research on multi-spectral temperature measurement method based on improved emissivity model[J]. *Applied Science and Technology*, 2020, 47(5): 45-52.
- [4] 张敏娟, 刘文敬, 王志斌, 等. 弹光调制器的频率漂移特性及其傅里叶变换光谱的稳定性研究[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(10): 20200019.  
Zhang M J, Liu W J, Wang Z B, et al. Study on frequency-drifting characteristics of photo-elastic modulator and stability of Fourier transform spectra [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20200019.
- [5] 陈友华. 遥测用多次反射式弹光调制傅里叶变换光谱技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.  
Chen Y H. The study on multi-reflected photo-elastic modulator-based Fourier transform spectroscopy for telemetry[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [6] Guo Y M, Pang S J, Luo Z J, et al. Measurement of directional spectral emissivity at high temperatures [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2018, 40(1): 1-12.
- [7] 李珊, 陈媛媛, 王志斌, 等. 弹光调制傅里叶变换光谱相位校正及 DSP 实现[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(2): 374-378.  
Li S, Chen Y Y, Wang Z B, et al. Photo-elastic modulation Fourier transform spectrum phase correction and DSP implementation[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(2): 374-378.
- [8] 张子文. 基于红外光谱仪的多光谱辐射测温技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
Zhang Z W. Research on multi-spectral radiation thermometry technology based on infrared spectrometer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [9] Zhang M J, Jing N, Li K W, et al. Thermal stability control system of photo-elastic interferometer in the PEM-FTs[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(1): 013105.
- [10] 王楠, 王艳超, 张敏娟, 等. 基于电压补偿的弹光调制器稳定性控制方法研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(4): 419-424.  
Wang N, Wang Y C, Zhang M J, et al. A stability control method of photo-elastic modulator based on voltage compensation [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 419-424.
- [11] 张磊, 陈绍武, 赵海川, 等. 基于光电探测的多光谱测温装置[J]. *中国光学*, 2019, 12(2): 289-293.  
Zhang L, Chen S W, Zhao H C, et al. Multi-spectral temperature measuring system based on photoelectric detection [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 289-293.
- [12] Hirschy L, Wang B L, Wolf J, et al. Basic optical properties of the photoelastic modulator. Part III: thermal properties [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8486: 848619.
- [13] Liu H W, Zheng S. Measurement of temperature and wavelength-dependent emissivity distributions using multi-wavelength radiation thermometry [J]. *Optics Communications*, 2020, 472: 125895.
- [14] 秦亚楼, 李伟, 杨春平, 等. 激光毁伤中的多光谱测温技术研究[J]. *兵工学报*, 2019, 40(1): 219-224.  
Qin Y L, Li W, Yang C P, et al. Study of multispectral temperature measurement technique for laser damage [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(1): 219-224.
- [15] Zhang R, Li K W, Chen Y Y, et al. Ultra-high-speed spectropolarimeter based on photo-elastic modulator [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(30): 8426-8432.
- [16] 梁振坤, 李晓, 王志斌, 等. 基于驱动电压自适应调节的弹光调制 [J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1104001.  
Liang Z K, Li X, Wang Z B, et al. Photo-elastic modulation based on adaptive regulation of driving voltage [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1104001.
- [17] Zhang Y X, Gao W R, Wu X P. Interferometric synthetic aperture microscopy algorithm based on nonuniform fast Fourier transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0418001.  
张运旭, 高万荣, 伍秀玘. 基于非均匀快速傅里叶变换的干涉合成孔径显微算法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0418001.
- [18] 陈键伟, 龚辉, 袁菁. 多光谱成像技术及其在生物医学中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(4): 0400001.  
Chen J W, Gong H, Yuan J. Multispectral imaging technology and its applications in biomedicine [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(4): 0400001.

# Temperature Measurement Using Multi-Spectral Method Based on Photo-Elastic Modulation Spectroscopy

Hu Jiang<sup>1,2,4</sup>, Li Kewu<sup>2,3,4</sup>, Li Jinhua<sup>2,4</sup>, Wang Zhibin<sup>1,2,4\*</sup>

<sup>1</sup> College of Instruments and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

<sup>2</sup> Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

<sup>3</sup> School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

<sup>4</sup> Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electric Information and Instrument, Taiyuan 030051, Shanxi, China

## Abstract

**Objective** Temperature is an important parameter in thermodynamics, physics, materials, metallurgy, and other subjects. The development of science and technology and the increased complexity of detection environments have produced greater requirements for the real-time and rapid accuracy of temperature measurement in the fields of high-temperature object temperature measurement and explosion field high-temperature detection. Compared with traditional contact measurement, the non-contact temperature measurement method avoids contact with the material and has advantages in the range and accuracy of high-temperature measurement. Among them, the multi-spectral temperature measurement method finds the true temperature of the target by measuring the radiance of multiple spectra of the target at a certain time. It is fast and non-contact, and produces a high-temperature measurement upper limit. Furthermore, its development has important economic and social significance. The photo-elastic modulation Fourier transform spectrometer has various advantages, such as fast detection speed, wide detectable spectral range, and high resolution. Also, measurement can be achieved in high-speed detection application environments, such as explosion and combustion, and it has a relatively large application range. In this study, we apply the multi-spectral temperature measurement method to the photo-elastic modulation spectrometer and study the target temperature measurement method using the photo-elastic modulation spectrum. Furthermore, we explore the technical approach of multi-spectral temperature measurement suitable for multiple targets and develop a multi-spectral temperature measurement device to achieve the target temperature. The result of this study is of great significance for temperature measurement on special occasions.

**Methods** In this research, we apply the system structure of a multi-spectral temperature measuring device using a photo-elastic modulation to measure temperature. First, we analyze and explain the principle of multi-spectral temperature measurement. Then, we introduce the system structure of the multi-spectral temperature measurement device based on a photo-elastic modulation. Also, we explain the generation and acquisition methods for photo-elastic modulation interference signals and investigate non-uniform acceleration. Next, the nonuniform fast Fourier transform (NUFFT) algorithm applies the detector to detect a standard light source with known radiation energy and obtain the response curve of the detector. Additionally, MATLAB is used to simulate and analyze the spectrum restoration algorithm and temperature measurement method. Finally, the experiment is verified. In the experiment, the NUFFT algorithm is used to restore the photo-elastic modulation Fourier transform interference signal generated by radiating the high-temperature object. Furthermore, the actual spectral recovery is obtained by correcting the response function figure using the calibration of the spectral response function of the detector, selecting the corresponding measurement wavelength, and applying the multi-spectral temperature inversion algorithm to get the black-body temperature. After 10 repeated experiments at different black-body temperatures, the system temperature measurement is verified.

**Results and Discussions** This study verify the correctness of the multi-spectral temperature measurement algorithm based on photo-elastic modulation spectroscopy using MATLAB simulation analysis (Fig. 5, Table 1). A laboratory-built photo-elastic modulation spectrometer is applied for experimental verification, thereby producing the collected black-body interference. Fig. 7 shows the reconstructed spectrum after the signal and response correction. This study collects multiple experiments with standard high-temperature black bodies at different temperatures and applies the multi-spectral temperature measurement algorithm to the recovered spectrum. The results show that the measured temperature fluctuates up and down the standard value with a minimum error near 5% of the standard



value (Fig. 9) and a certain degree of accuracy. Compared with traditional temperature measurement technology, the photo-elastic modulation interference module used in the spectrometer has a faster spectral measurement speed and wide spectral range, and the system has no moving parts and has good stability (Fig. 1). Our proposed algorithm can be used in various environments, quickly obtain the radiation field spectrum signal of the high-temperature object, and realize the non-contact measurement of the temperature of the high-temperature object.

**Conclusions** The multi-spectral temperature measurement is a radiation-temperature measurement method with great potential, especially in the absence of information on the emissivity spectrum of the measured object. In this paper, the photo-elastic modulation interference technology is used to collect radiation signals and the accelerated NUFFT algorithm is used to restore the spectrum of the collected interference signals. Accurate temperature measurement is obtained using the multi-spectral temperature measurement method and the standard black body served for verification. Results show that photo-elastic modulation has the advantages of short acquisition time of interference signals, large spectral range, and is a valuable new method. For future work, further in-depth study, which will provide a new method for temperature measurement in special occasions will be considered.

**Key words** measurement; signal processing; photo-elastic modulation spectroscopy; multi-spectral radiation