

## 声光光谱仪的光谱及辐射标定方法

成驰<sup>1,2</sup>, 赵慧洁<sup>1,2,3,4\*</sup>, 郭琦<sup>1,2,4</sup>, 李然<sup>3</sup><sup>1</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;<sup>2</sup>北京航空航天大学青岛研究院, 山东 青岛 266104;<sup>3</sup>北京航空航天大学人工智能研究院, 北京 100191;<sup>4</sup>北京航空航天大学“空天光学-微波一体化精准智能感知”工业和信息化部重点实验室, 北京 100191

**摘要** 基于声光可调谐滤波器(AOTF)的红外光谱仪须在宽温度范围内具备光谱响应稳定性,以保证光谱数据精度。然而,随环境温度变化,声光光谱仪存在光谱漂移和系统辐射响应漂移,造成光谱数据偏差。现有声光光谱仪辐射定标研究虽然考虑了辐射响应受温度的影响,但并未在辐射定标前修正光谱漂移,导致辐射定标结果不准确。本文提出了一种修正温度影响的光谱及辐射标定方法。首先,建立了引入温度变量的AOTF器件调谐模型,在光谱定标中修正温度造成的光谱漂移,实现了变温辐射定标过程中的波长追踪;然后再求得含温度变量的光谱辐射定标系数,完成辐射定标。依托实验室搭建的中波红外AOTF光谱成像温度修正标定验证系统,在-30~50℃温度区间验证了标定方法的有效性。低温-30℃处的平均驱动频率偏差从41.1 kHz降低至0.29 kHz,修正后光谱辐射量与理论值偏差在低温区间显著降低。

**关键词** 中波红外光谱仪; 声光可调谐滤波器; 温度漂移; 辐射定标

中图分类号 TP73

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231717

## 1 引言

光谱信息的获取是遥感监测中目标分析的重要手段<sup>[1-5]</sup>。基于声光可调谐滤波器(AOTF)的光谱成像探测技术,具有快速调谐、画幅式成像、结构紧凑、响应快、可靠性高、波段调节灵活等优点,现已成为深空遥感探测领域的重要研究方向之一<sup>[6-7]</sup>。其中的核心元件——AOTF是一种基于晶体声光互作用原理的光谱分光元件<sup>[8]</sup>。加载射频驱动信号后,AOTF从宽谱入射光中分离并偏转出一部分窄带的衍射光,未衍射的光则经晶体透射。受应用场景影响,AOTF红外光谱成像系统所处环境温度可能在较宽范围内变化,造成系统响应特性漂移,主要表现为两方面:一方面,由于声光晶体的折射率及声速随温度变化<sup>[9-14]</sup>,晶体内声光互作用的条件改变,造成由驱动电信号频率-衍射光中心波长构成的调谐关系发生漂移,即光谱特性发生温度漂移;另一方面,受AOTF衍射效率及系统电学、光学元件性能随温度变化的共同作用,系统辐射响应发生变化,即辐射特性发生温度漂移。温度变化引起的光谱漂移及辐射漂移两方面共同影响,导致了光谱数据精度下降。

关于驱动频率-波长调谐关系的温度漂移现象,2015年,Mantsevich等<sup>[6]</sup>在-40~40℃区间测量了短

波红外1.53 μm和1.15 μm波长处的AOTF的驱动频率响应漂移,随温度降低,AOTF的中心驱动频率向低频方向漂移,两个不同的AOTF中心驱动频率漂移分别为 $2.2 \times 10^{-3}$  MHz/K和 $5.2 \times 10^{-3}$  MHz/K。在光谱特性随温度漂移的抑制方面,可通过控温措施减小AOTF的温度变化。2008年,Yumoto等<sup>[15]</sup>测试得到中心波长漂移量为 $0.00012 \mu\text{m}/\text{C}$ ,并通过将温度变化控制在 $\pm 1 \text{ C}$ 内,提高了输出波长的温度稳定性。在光谱特性随温度漂移的修正方面,可通过微调AOTF的驱动频率,实现不同温度下AOTF的衍射波长的稳定控制。2016年,雷浩等<sup>[16]</sup>在1~30℃区间测量了0.5~0.7 μm波段中3个波长的驱动频率响应漂移,中心波长漂移为 $0.00095 \mu\text{m}/20 \text{ C}$ ,并实现可见光AOTF光谱系统的温度修正光谱定标。2019年,王耀利等<sup>[17]</sup>根据环境温度调节AOTF的射频驱动频率,在20~50℃区间提高了AOTF在0.632 μm和0.75 μm处的中心波长稳定性。

AOTF辐射特性随温度漂移的定标及修正工作也在进行<sup>[18]</sup>。2014年,为校正环境温度变化造成的辐射漂移,徐睿等<sup>[19]</sup>测试了可见光和近红外成像光谱仪(VNIS)短波红外通道(0.9~2.4 μm)在-20~55℃的响应,建立了数据预处理模型,实现温度修正的辐射定标。

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2024-02-24; 录用日期: 2024-02-27; 网络首发日期: 2024-03-13

通信作者: [hjzhao@buaa.edu.com](mailto:hjzhao@buaa.edu.com)

目前, AOTF 光谱仪辐射定标相关研究已经考虑了系统辐射响应受温度的影响, 但并未考虑由于 AOTF 驱动频率-光波长调谐关系受到温度影响而导致的光谱仪的光谱特性漂移。然而, 只有先在光谱定标中得到不同温度时的修正驱动频率, 才能保证在不同温度处光谱仪的波长准确性, 为后续辐射定标奠定基础。因此, 宽温度范围内的声光光谱仪定标须同时考虑光谱及辐射漂移。本文提出了修正温度影响的光谱及辐射定标方法, 在辐射定标前, 先在光谱定标中修正温度造成的光谱漂移, 保证不同温度时光谱仪中心波长的准确调谐, 然后进行温度修正的辐射定标, 获得各个温度处的光谱辐射定标系数。从温度变化对器件性能漂移的作用机理出发, 将晶体的折射率及声速等物理参数随温度的变化引入 AOTF 调谐模型, 依托实验室搭建的中波红外 AOTF 光谱成像系统, 对提出的引入温度变量的 AOTF 调谐模型及修正温度影响的光谱及辐射标定方法进行了验证, 并给出了对比实验验证结果, 为中波红外 AOTF 光谱成像系统在宽温度范围的工作环境下的光谱反演数据精度提供保障。

## 2 理论分析及实验方法

### 2.1 AOTF 光谱特性随温度漂移模型分析

AOTF 是一种基于声光效应制成的光参数调制器件。由于弹光效应, 在声光晶体中传播的超声波会对晶体折射率形成周期性调制, 在满足声光互作用条件时, 晶体内的入射光发生衍射, 这种现象称为声光效应<sup>[20]</sup>。在非共线 AOTF 声光晶体中发生的声光互作用条件可用如图 1 所示的波矢量图表示。其中,  $\alpha$  为超声切角,  $\theta_i$  为入射角,  $\theta_d$  为衍射角。

当衍射发生时, 入射光波矢量  $k_i$  与超声波矢量  $k_a$ 、

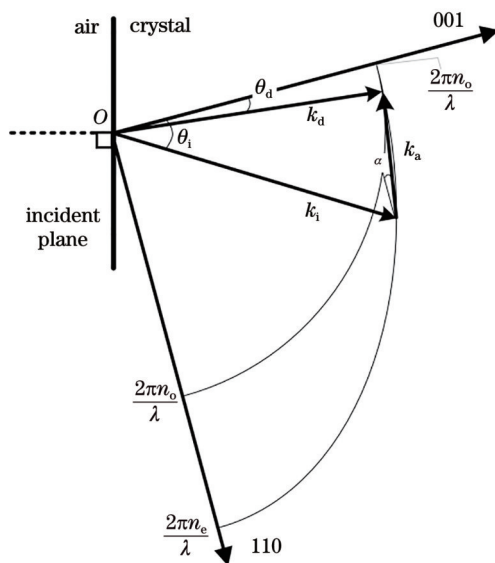


图 1 非共线 AOTF 中声光相互作用波矢量示意图

Fig. 1 Wave-vector diagram of acousto-optic interaction in noncollinear AOTF

衍射光波矢量  $k_d$  共同构成封闭的矢量三角形, 满足动量匹配条件, 衍射发生, 表示为

$$k_i \pm k_a = k_d, \quad (1)$$

$$|k_i| = \frac{2\pi n_i}{\lambda}, |k_d| = \frac{2\pi n_d}{\lambda}, |k_a| = \frac{2\pi f}{v_a}, \quad (2)$$

式中:  $n_i$ 、 $n_d$  分别为入射光、衍射光的折射率;  $\lambda$  为光波长;  $f$  为驱动频率;  $v_a$  为声速。

根据余弦定理建立等式

$$|k_a|^2 = |k_i|^2 + |k_d|^2 - 2|k_i||k_d|\cos(\theta_d - \theta_i), \quad (3)$$

式中,  $\theta_d - \theta_i$  表示入射光与衍射光的夹角, 也就是分离角  $\theta_{sep}$ 。因此可得到驱动频率与衍射光波长构成的对应关系, 即非共线 AOTF 调谐公式为

$$f = \frac{v_a}{\lambda} \sqrt{n_i^2 + n_d^2 - 2n_i n_d \cos \theta_{sep}}. \quad (4)$$

当声光晶体为二氧化碲, 且入射光为非寻常光、衍射光为寻常光时, 调谐公式可写为

$$f = \frac{v_a}{\lambda} \left( n_i \sin \theta_B - \sqrt{n_d^2 - n_i^2 \cos^2 \theta_B} \right), \quad (5)$$

$$\theta_B = \theta_i - \alpha, \quad (6)$$

式中:  $n_i$ 、 $n_d$  分别为入射光、衍射光的折射率;  $v_a$  为声速, 分别表示为

$$n_i = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta_i + n_e^2 \cos^2 \theta_i}}, n_d = n_o, \quad (7)$$

$$v_a = \sqrt{\frac{1}{\rho} (c' \cos^2 \alpha + c_{44} \sin^2 \alpha)}, c' = \frac{c_{11} - c_{12}}{2}, \quad (8)$$

式中:  $n_o$ 、 $n_e$  为声光晶体主折射率, 即  $n_o$  为声光晶体中寻常光的折射率,  $n_e$  为非寻常光垂直于晶体光轴传播时的折射率;  $\mathbf{c}$  为声光晶体弹性劲度系数矩阵, 在胡克定律中描述声光晶体所受到的应变和应力关系的系数, 为  $6 \times 6$  阶矩阵。考虑二氧化碲的对称性, 弹性劲度系数矩阵  $\mathbf{c}$  仅有 6 个独立元素, 用  $c_{ij}$  表示, 其中,  $c_{11}$ 、 $c_{12}$  用于计算二氧化碲晶体中沿 110 传播的切变波声速,  $c_{44}$  用于计算沿 001 轴传播的切变波声速;  $\alpha$  为超声切角。由此可知, 衍射特定波长所需要的驱动频率由光波长、超声切角、入射光角度和晶体物理参数共同确定。

由式(5)可知, 驱动频率-波长调谐关系受声光晶体物理性质的影响。折射率和声速随温度而变化<sup>[7-13]</sup>, 因此, 温度变化时, 器件的调谐关系也发生变化, 式(5)可改写为

$$f(\lambda, T) = \frac{v_a(T)}{\lambda} \cdot [n_i(\lambda, T) \cdot \sin(\theta_i - \alpha) - \sqrt{n_d^2(\lambda, T) - n_i^2(\lambda, T) \cdot \cos^2(\theta_i - \alpha)}]. \quad (9)$$

声光晶体的弹性劲度系数随温度变化, 弹性劲度系数矩阵各元素的温度系数表示为

$$\gamma_{ij}(T_0) = \frac{1}{c_{ij}(T_0)} \frac{dc_{ij}}{dT}. \quad (10)$$

1970 年, Ohmachi 等<sup>[12]</sup>在  $-120 \sim 120$  °C 区间进行

测量,给出了二氧化碲晶体在 20 °C 时的弹性劲度系数元素  $c_{ij}(20)$  及其温度系数  $\gamma_{ij}(20)$ 。1987 年, Silvestrova 等<sup>[9]</sup>在 -100~50 °C 区间,以 10 °C 为间隔测量了  $c_{44}(T)$  和  $c'(T)$ 。2004 年, Ledbetter 等给出了 -263~27 °C 区间的  $c_{ij}(T)$  表达式为

$$c_{ij}(T + 273) = c_{ij}(0) - \frac{s}{\exp\left(\frac{t}{T + 273}\right) - 1}, \quad (11)$$

式中:  $c_{ij}(0)$  为绝对零度时的弹性劲度系数;  $s$ 、 $t$  为常数<sup>[10]</sup>。

本文将 Ohmachi、Silvestrova 和 Ledbetter 分别提

出的弹性劲度系数随温度的变化进行了整合,并进一步计算了特定超声角度下的声速随温度的变化,如图 2(a)~(c) 所示。当温度在 -100~60 °C 范围内升高时,  $c_{44}$  减小,  $c'$  升高,如图 2(a)、2(b) 所示。晶体声速随温度升高而增大,如图 2(c) 所示,使用 Ledbetter 报道的参数,在 -30~50 °C, 超声切角 12° 方向上的声速由 749 m/s 变为 752 m/s。将声速随温度的变化引入调谐模型,结果表明,在 -30~50 °C 温度范围,升温造成的声速增大将导致驱动频率升高,约 0.01 MHz/10 °C。相应地,输入固定的驱动频率时,升温造成的声速增大将导致衍射波长变短,约 0.002  $\mu\text{m}/10$  °C。

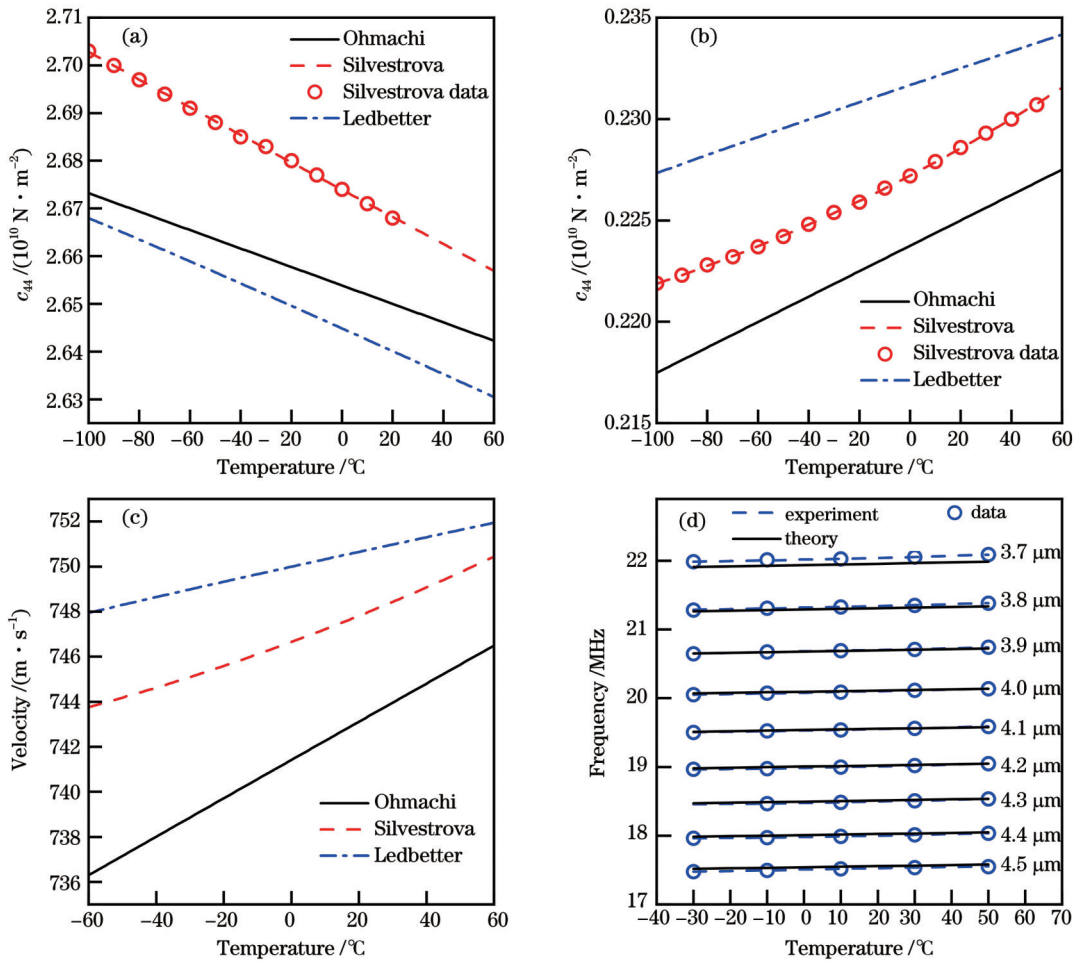


图 2 温度依赖性。(a)弹性劲度系数  $c_{44}$ <sup>[9-10,12]</sup>; (b)弹性劲度系数  $c'$ <sup>[9-10,12]</sup>; (c)声速(超声切角  $\alpha=12^\circ$ ); (d)弹性劲度系数随温度变化引起的驱动频率漂移

Fig. 2 Temperature dependence. (a) Elastic stiffness constant  $c_{44}$ <sup>[9-10,12]</sup>; (b) elastic stiffness constant  $c'$ <sup>[9-10,12]</sup>; (c) acoustic velocity (acoustic cut  $\alpha=12^\circ$ ); (d) frequency drift caused by temperature dependence of elastic stiffness constant

本文进一步计算了在 3.7~4.5  $\mu\text{m}$  区间内多个光波长所对应的驱动频率随温度的变化,并与本文实测数据进行对比。在实际使用中,为使声光光谱仪各个光谱通道在不同的温度环境下都能输出所需要的稳定的光波长,系统所需的驱动频率随着温度的升高而向高频微调,如图 2(d) 所示。本文使用驱动频率平

均偏差  $\sum_{i=1}^m |f(\lambda, T_i) - f_{\text{exp}}(\lambda, T_i)| / m$  来比较理论模型计算结果与实测数据,如表 1 所示,其中  $f_{\text{exp}}(\lambda, T_i)$  为实测驱动频率。结果表明,理论计算与实测结果较为吻合。由于晶体加工和测量中存在误差,器件切型参数如入射角和超声切角的实际值与理论模型中的取

表 1 理论模型计算结果与实测结果的平均偏差

Table 1 Average deviation between theoretical model calculation and measured results

Wavelength / $\mu\text{m}$	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
Average deviation / MHz	0.086	0.030	0.005	0.010	0.006	0.013	0.014	0.022	0.033

值存在差异,造成了理论模型计算结果与实测结果的偏差。

声光晶体的折射率随温度变化<sup>[13-14]</sup>,其温度系数表示为

$$\gamma_n(T_0) = \frac{1}{n(T_0)} \frac{dn}{dT} \quad (12)$$

根据 Stefanskii 等在 1989 年报道的测量结果,非寻常光和寻常光的主折射率都随温度升高而增大。并且,波长越长,温度系数越小,温度变化引起的折射率改变量越小。在 27 °C 附近,中红外波段寻常光主折射率温度系数约为  $4.2 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,非寻常光主折射率温度系数约为  $1.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

将折射率随温度  $T$  的变化引入调谐模型,结果表明,随着温度升高,折射率变化导致的特定衍射波长所需的驱动频率向高频漂移,与声速随温度变化

导致的驱动频率漂移趋势相同。但是,折射率随温度变化引起的驱动频率漂移量比声速变化引起的驱动频率漂移量更小。定义声速变化引起的驱动频率漂移系数为  $\gamma_{f_v}(\lambda, T_0) = df_v(\lambda, T)/dT/f_v(\lambda, T_0)$ ,其中,  $f_v(\lambda, T)$  是只考虑声速随温度变化时的驱动频率。

在模型中先独立考虑声速变化和折射率变化对驱动频率的影响,再同时考虑两个物理量同时随温度变化对驱动频率的影响,分别得出驱动频率随温度的平均漂移量  $\Delta f(\lambda) = [f(\lambda, 50) - f(\lambda, -30)]/8$ ,由此得到折射率随温度变化引起的驱动频率平均漂移量  $\Delta f_n(\lambda)$ 、声速变化引起的驱动频率漂移量  $\Delta f_v(\lambda)$ 、同时考虑折射率和声速的驱动频率平均漂移量  $\Delta f_{v,n}(\lambda)$  与实验测量结果,如表 2 所示。实验中使用的测试器件声光晶体超声切角  $\alpha$  为  $12^\circ$ 。

表 2 向模型引入不同物理性质温度依赖性时的驱动频率平均漂移量

Table 2 Frequency drift when introducing temperature dependence of different physical properties to the model

Wavelength / $\mu\text{m}$		3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
Frequency drift / (kHz/10 °C)	$\Delta f_v(\lambda)$	10	9	9	9	9	8	8	8	8
	$\Delta f_n(\lambda)$	3	2	2	2	2	2	2	2	2
	$\Delta f_{v,n}(\lambda)$	12	12	12	11	11	11	10	10	10
	Experimental data	13	12	12	11	11	11	11	10	9

## 2.2 光谱系统辐射特性的温度漂移

系统辐射漂移受 AOTF 及系统电学、光学等多元件随温度变化的共同作用,成因较为复杂。系统辐射响应  $D$ 、辐射定标系数  $K$  与目标光谱辐射量  $L$  的关系可表示为

$$D(\lambda, T) = K(\lambda, T)L(\lambda) =$$

$$\eta_{\text{AOTF}}(\lambda, T)\eta_{\text{det}}(\lambda, T)\tau_{\text{len}}(\lambda, T)A\Omega L(\lambda), \quad (13)$$

式中:  $\eta_{\text{AOTF}}$  为分光器件透过率;  $\eta_{\text{det}}$  为探测器响应率;  $\tau_{\text{len}}$  为光学系统透过率;  $A$  为入瞳面积;  $\Omega$  为视场角;  $K$  与  $D$  随温度变化,未经温度修正时,任一波长处的  $K$  视作不受温度影响的固定值;辐射量  $L$  计算结果与实际值出现偏差,且该偏差随温度变化。

## 2.3 温度修正的定标方法

为了修正温度变化造成的光谱漂移和辐射漂移,得到准确的光谱反演数据,需要对光谱系统进行修正温度影响的光谱及辐射定标。

搭建如图 3(a) 所示的环境温度模拟实验装置,实验室搭建的中波红外 AOTF 光谱成像系统主要由光学系统、核心分光器件、探测器及控制电学系统组成,

使用高低温实验箱调节环境温度,在光谱定标过程中,使用中红外可调谐激光器作为单色光源,在辐射定标过程中则使用黑体。定标方法流程如图 3(b) 所示。为得到系统输出的准确波长,首先须在  $m$  个温度  $T$  下测量  $n$  个波长  $\lambda$  处 AOTF 的驱动频率响应,提取不同温度、波长下的中心驱动频率,再以多项式拟合得到中心驱动频率与温度  $T$ 、波长  $\lambda$  的调谐关系,实现温度修正的光谱定标。然后将光谱定标结果应用于系统辐射定标,向光谱仪输入修正后的驱动频率  $f_{ij}$ ,使得系统响应应在各温度  $T_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) 下都能跟踪所需波长  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。由于修正的驱动频率是通过光谱定标获取数据后拟合得到的,因此,为了避免修正的驱动频率范围覆盖不全的问题,光谱定标及修正的测试温度范围须覆盖辐射定标的测试温度范围。测量  $m$  个温度、 $n$  个波长处的系统响应  $D(\lambda_i, T_j)$ ,求解温度修正的光谱辐射定标系数  $K_{ij}(\lambda_i, T_j)$ 。利用插值方法,得到任意温度下的  $K(\lambda, T)$ ,实现温度修正的辐射定标。

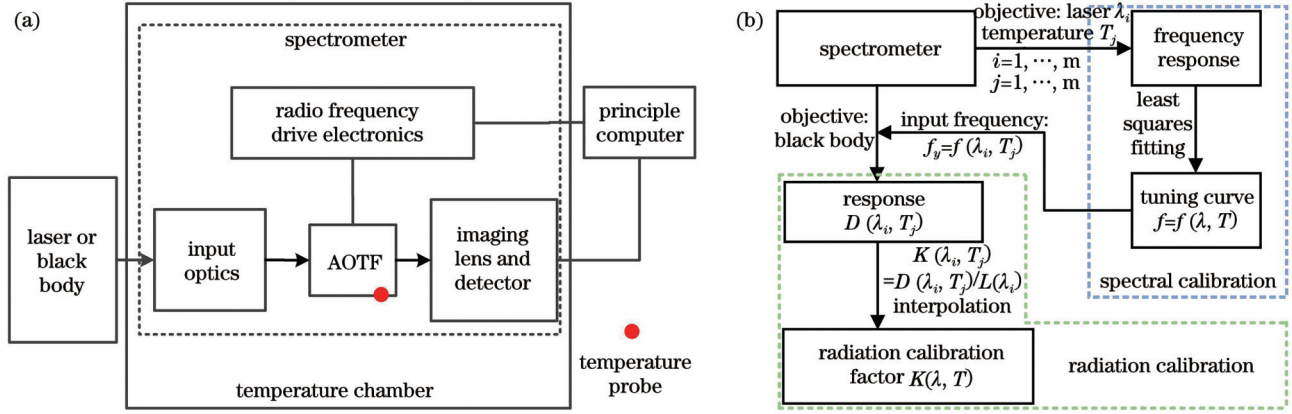


图 3 温度修正的定标方法。(a)实验装置;(b)定标方法流程图

Fig. 3 Temperature-compensated calibration method. (a) Experimental setup; (b) flow chart of calibration method

### 3 结果与讨论

#### 3.1 温度修正的光谱定标

在  $-30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  区间选取相隔  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的 5 个温度取值,待 AOTF 光谱成像系统达到并稳定于设定的温度后,进行此温度下的调谐特性测试,选取  $3.7\sim 4.5\text{ }\mu\text{m}$  谱段内以  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  为间隔的 9 个光谱通道进行测试。以单色激光作为光源,以  $0.01\text{ MHz}$  为驱动频率间隔,测得不同光谱通道的驱动频率响应特性,图 4(a)为  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  工作温度下各光谱通道的驱动频率响应,图中纵坐标表示 AOTF 的衍射效率,是加载驱动时 AOTF 的衍射光能量与未加载驱动时 AOTF 透射光的能量的比值。

对比不同温度下同一光谱通道的驱动频率响应,

如图 4(b)所示,纵坐标为衍射效率。随着温度升高,实测中心驱动频率向高频移动。对于中心波长为  $4.0\text{ }\mu\text{m}$  的光谱通道,工作温度为零下  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  时中心驱动频率为  $20.05\text{ MHz}$ ,工作温度为  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时中心驱动频率为  $20.14\text{ MHz}$ 。由此可见,当工作条件存在约  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温差时,驱动频率需微调  $0.09\text{ MHz}$  以保证中心波长的稳定。

然后,分别读取不同工作温度下各光谱通道对应的中心驱动频率,以各光谱通道的衍射波长和驱动频率进行多项式拟合,得到引入温度的驱动频率与衍射波长调谐关系,表达式为

$$f_a(\lambda, T) = \sum_{m=0, n=0}^{m=5, n=4} p_{mn} \lambda^m T^n. \quad (14)$$

通过多项式拟合获得系数矩阵  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{p}$  的元素  $p_{mn}$  保留 4 位有效数字,其值为

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} 19.53 & 0.02719 & 0.004468 & 0.001925 & -0.0005553 \\ -1.428 & 0.002294 & -0.002734 & -0.002027 & 0.002747 \\ 0.08783 & 0.0003554 & -0.0006588 & 0.00007127 & 0 \\ -0.01747 & -0.0007730 & -0.002170 & 0 & 0 \\ 0.005869 & -0.00004435 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0005458 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

根据实测拟合结果,能够计算得出任一光波长在任一温度下所对应的驱动频率,即修正后的驱动频率  $f_a$ 。将波长和温度代入式(14),就可以计算驱动频率漂移,同时,根据实测拟合结果,也可以得到波长漂移。当宽谱光入射 AOTF 光谱成像系统时,若仍以固定频率驱动光谱系统,光谱系统各光谱通道输出的中心波长发生漂移。利用拟合的温度修正的调谐曲线,计算波长漂移,  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  时加载  $20.12\text{ MHz}$  的驱动频率,系统采集的光谱图像中心波长为  $4.0\text{ }\mu\text{m}$ ,在不同温度处光波长漂移的情况如表 3 所示,温度引起的波长漂移约为  $0.0015\sim 0.0025\text{ }\mu\text{m}/10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

为验证温度修正效果,本文对修正偏差进行了计算。综合整个工作谱段  $3.7\sim 4.5\text{ }\mu\text{m}$  内的驱动频率偏差,定义修正前、后的驱动频率平均偏差分别为

表 3 不同温度的光波长漂移

Table 3 Optical wavelength drifts at different temperatures

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	50	30	10	-10	-30
Wavelength / $\mu\text{m}$	4.005	4.000	3.996	3.993	3.989

$$\Delta F(T) = \frac{\sum_{i=1}^n |f_{\text{exp}}(\lambda_i, 10) - f_{\text{exp}}(\lambda_i, T)|}{n}, \quad (16)$$

$$\Delta F_c(T) = \frac{\sum_{i=1}^n |f_a(\lambda_i, T) - f_{\text{exp}}(\lambda_i, T)|}{n}, \quad (17)$$

式中,  $f_{\text{exp}}$  为实测中心驱动频率。

将拟验证修正偏差的某个温度处的数据移除,用其余温度的测量数据进行拟合处理,得到调谐关系,代

入式(17)计算修正后的驱动频率平均偏差。使用  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  处的实测值  $f_{\text{exp}}(\lambda, 10)$  代入式(16)计算修正前的驱动频率平均偏差  $\Delta F(T)$ 。以  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  为例,分别使用温度  $-30$ 、 $10$ 、 $30$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  的测量数据进行多项式拟合,

得到温度修正的调谐关系如图 4(c) 所示,温度修正前的驱动频率偏差  $|f_{\text{exp}}(\lambda, 10) - f_{\text{exp}}(\lambda, -10)|$  和温度修正后的驱动频率偏差  $|f_a(\lambda, -10) - f_{\text{exp}}(\lambda, -10)|$  如图 4(d) 所示,各波长处的精度显著提高。

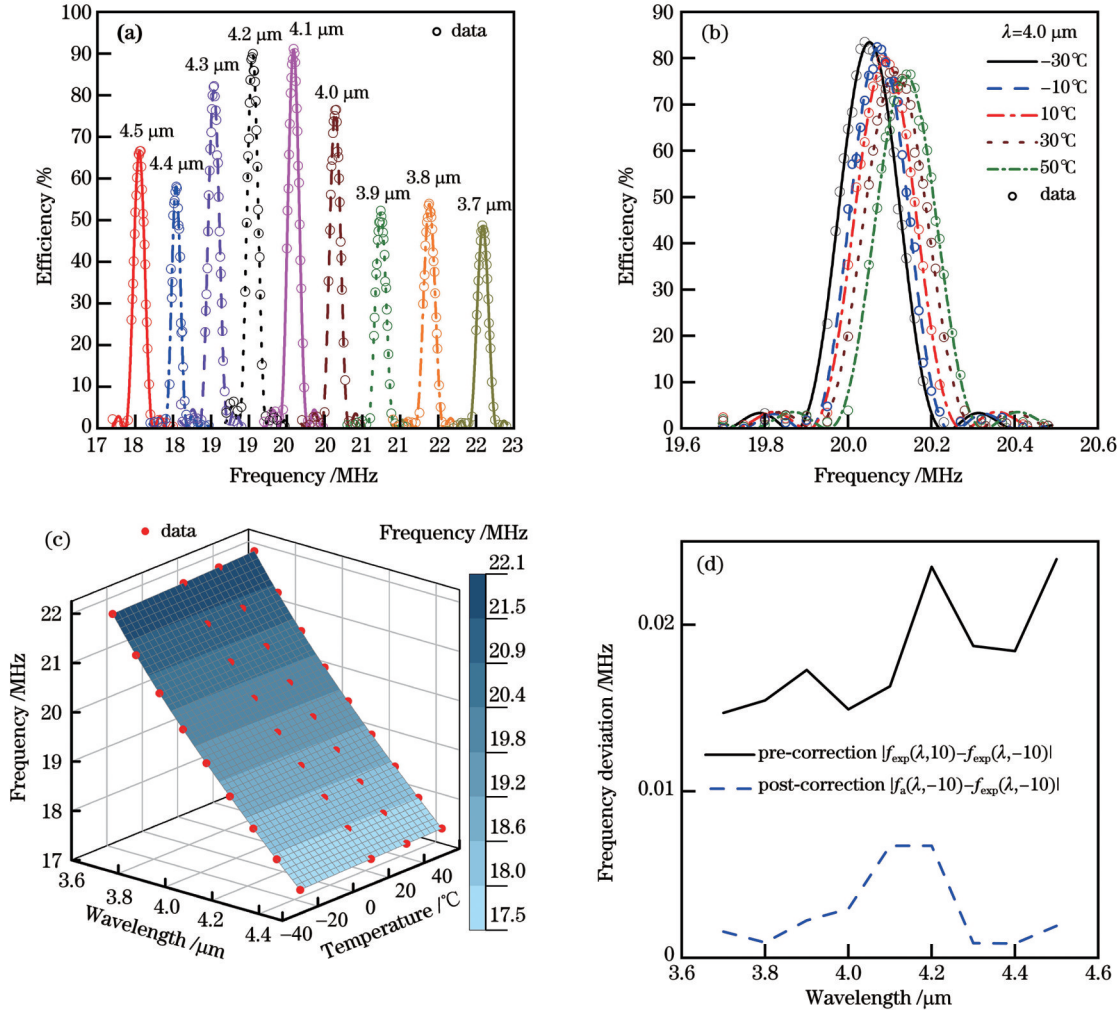


图 4 温度修正的光谱定标。(a)各波长的驱动频率响应(温度为  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ );(b)不同温度下的驱动频率响应(波长为  $4\text{ }\mu\text{m}$ ),纵坐标为 AOTF 的衍射效率;(c)温度修正后的调谐关系;(d)修正前、后不同波长的驱动频率与实测驱动频率的偏差(温度为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 4 Temperature-compensated spectral calibration. (a) Frequency responses for different wavelengths (temperature is  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); (b) frequency responses for different temperatures (wavelength is  $4\text{ }\mu\text{m}$ ), and vertical coordinate indicates diffraction efficiency of AOTF; (c) tuning relation after temperature compensation; (d) tuning frequency deviation from measurements before and after compensation with different wavelengths (temperature is  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

各温度驱动频率平均偏差如表 4 所示,结果表明,进行温度修正后,驱动频率精度提升幅度最小的温度位于  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,修正前平均偏差  $\Delta F(-10)$  为  $14.7\text{ kHz}$ ,修正后平均偏差  $\Delta F_c(-10)$  为  $1.53\text{ kHz}$ ,温度为  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  时精度提升幅度最大,驱动频率平均偏差从  $41.1\text{ kHz}$  减小到  $0.29\text{ kHz}$ 。

光谱仪工作时,输入温度修正后精度提升的驱动频率,温度变化造成的光波长漂移量将会减小。将温度修正前后的驱动频率偏差换算为光波长漂移。 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,光谱波长漂移从  $7 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}$  减少至  $5 \times 10^{-5}\text{ }\mu\text{m}$ ;  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,光谱波长漂移从  $3 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}$  减少

至  $3 \times 10^{-4}\text{ }\mu\text{m}$ ;  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,光谱波长漂移从  $5 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}$  减少至  $2 \times 10^{-4}\text{ }\mu\text{m}$ ;  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,光谱波长漂移从  $0.011\text{ }\mu\text{m}$  减少至  $1.5 \times 10^{-4}\text{ }\mu\text{m}$ 。

温度间隔是影响后续多项式拟合效果的因素之一,理论上,间隔越小,拟合结果越接近于实测结果。然而,从实际应用角度出发,当光谱仪所处环境温度在一个很宽的范围内变化时,进行密集温度点采样定标的成本将会十分高昂。因此本文提出的方法是,先在宽温度范围内以相对较大的温度间隔进行测量,在标定温度覆盖范围内,对未经实测的温度点进行拟合,得出中心波长-驱动频率关系的修正结果。本文在跨度

表 4 温度修正前、后的驱动频率偏差

Table 4 Frequency deviation before and after temperature compensation

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Frequency deviation (before compensation)	Frequency deviation (after compensation)
	$\Delta F$ /kHz	$\Delta F_c$ /kHz
-30	41.1	0.29
-10	14.7	1.53
30	26.3	1.28
50	62.3	0.87

为  $80^{\circ}\text{C}$  的温度范围内取 4 个温度点进行拟合, 然后假设其中某一点未参与拟合并计算偏差, 结果表明, 修正后的驱动频率偏差降低了一个数量级。

### 3.2 温度修正的辐射定标

将搭建的中红外光谱成像系统置于  $30$ 、 $20$ 、 $10$ 、 $0$ 、 $-10$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$  共 6 个温度环境, LumaSense M305 黑体校准源温度设置为  $150^{\circ}\text{C}$ , 采集  $3.7\sim 4.7\ \mu\text{m}$  内 51 个波段的光谱数据  $D(\lambda, T_i)$ ,  $i=1, \dots, 6$ 。根据温度修正的光谱定标结果, 在不同的温度使用修正后的驱动频率, 以补偿温度变化造成的光谱漂移。

在  $20^{\circ}\text{C}$  进行辐射定标, 得到辐射定标系数  $K(\lambda, 20)$ 。由 2.3 节的分析已经知道, 改变温度后, 光谱成像系统响应随温度漂移。若不对辐射定标系数进行温度修正, 系统在不同温度下对相同黑体校准源采集所得的光谱数据会呈现随温度的变化, 如图 5(a)

所示。由于温度从  $-20^{\circ}\text{C}$  升高到  $30^{\circ}\text{C}$  时, 系统输出的光谱响应数据  $D$  降低, 因此若没有在辐射定标中对温度影响进行修正, 辐射定标得出的光谱辐射定标系数不随温度变化, 那么温度变化时计算得到的光谱辐射量就会偏低。以  $20^{\circ}\text{C}$  时的系统辐射响应  $D(\lambda, 20)$  为基准, 对温度变化引起的系统辐射响应漂移进行评估, 以温度每变化  $10^{\circ}\text{C}$  时辐射响应漂移量为例进行分析, 各波长处  $10^{\circ}\text{C}$  温差引起的平均系统响应漂移量为  $[D(\lambda, 30) - D(\lambda, -20)]/5$ , 各波长处相对于室温系统响应  $D(\lambda, 20)$  的相对平均系统响应漂移量可表示为  $\delta(\lambda) = [D(\lambda, 30) - D(\lambda, -20)]/5/D(\lambda, 20) \times 100\%$ 。波长为  $3.7\ \mu\text{m}$  时,  $\delta(3.7)$  为  $1.14\%$ ; 波长为  $4\ \mu\text{m}$  时,  $\delta(4)$  为  $1.76\%$ ; 波长为  $4.3\ \mu\text{m}$  时,  $\delta(4.3)$  为  $2.42\%$ ; 波长为  $4.5\ \mu\text{m}$  时,  $\delta(4.5)$  为  $2.56\%$ 。由此可见, 该系统响应漂移量与波长有关, 波长越长, 系统响应的温度漂移量越大。

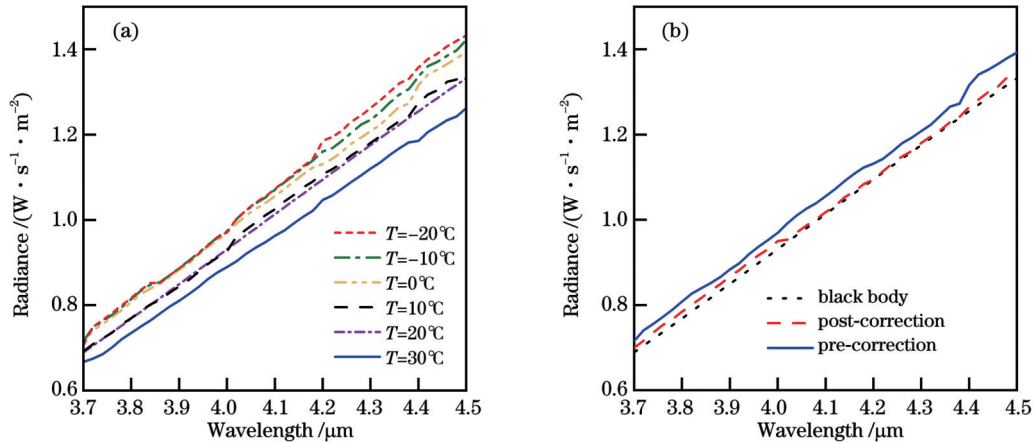


图 5 温度修正的辐射定标。(a)修正前不同温度时计算的光谱辐射;(b)修正后计算的光谱辐射( $0^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 5 Temperature-compensated radiation calibration. (a) Calculated spectral radiance before calibration at different temperatures; (b) calculated spectral radiance after calibration ( $0^{\circ}\text{C}$ )

温度修正时, 使用光谱数据  $D(\lambda, T)$  和黑体理论光谱辐亮度  $L(\lambda)$  解得不同温度下的光谱辐射定标系数  $K(\lambda, T_i)$ ,  $i=1, \dots, 6$ 。插值得到任意温度下的  $K(\lambda, T)$ , 实现温度修正的辐射定标。

为验证温度修正效果, 本文以  $20^{\circ}\text{C}$  数据作为基准, 对修正偏差进行了计算。综合整个工作谱段  $3.7\sim 4.5\ \mu\text{m}$  内的辐射漂移, 定义修正前、后的平均辐射漂移分别为

$$\Delta L(T) = \frac{\sum_{i=1}^n |D(\lambda_i, T)/K(\lambda_i, 20) - L_{\text{theory}}(\lambda_i)|}{n}, \quad (18)$$

$$\Delta L_c(T) = \frac{\sum_{i=1}^n |D(\lambda_i, T)/K(\lambda_i, T) - L_{\text{theory}}(\lambda_i)|}{n}, \quad (19)$$

式中:  $L_{\text{theory}}$  为黑体辐射;  $n$  为 51 个采样波段数量。

将拟验证修正偏差的某温度数据移除, 用其余温

度的测量数据进行处理,得到该温度处的修正辐射定标系数和光谱辐亮度,代入式(19)计算该温度处修正后的辐射漂移量 $\Delta L_c(T)$ 。使用室温处的辐射定标系数代入式(18)计算修正前的辐射漂移量 $\Delta L(T)$ 。

以 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 为例,使用温度 $-20$ 、 $-10$ 、 $10$ 、 $20$ 、 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 处的测量数据、式(13)和插值方法得到温度修正的入射定标系数 $K(\lambda, 0)$ 和 $L(\lambda, 0)$ ,如图5(b)所示。 $\Delta L(0)$ 为 $0.041\text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ , $\Delta L_c(0)$ 为 $0.016\text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 。各

温度处的平均偏差和相对于 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 数据的平均偏差如表5所示。结果表明,低温范围的修正效果较好。通电后AOTF存在发热现象,虽然光谱仪的温控组件能够调控声光晶体的温度,但在光谱仪温度升高的过程中,起到电声转化作用的压电换能器金属薄层局部区域也会不断升温,由于金属薄层材料含有熔点较低的金属,升温可能导致压电换能器电声转化效率非线性变化,造成本文所述辐射定标方法的温度修正效果随温度升高而下降。

表 5 温度修正前、后辐射平均偏差

Table 5 Average radiance deviation before and after temperature compensation

Temperature / $^\circ\text{C}$	Radiance deviation (before compensation) $\Delta L / (\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$	Radiance deviation (after compensation) $\Delta L_c / (\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$	Relative average deviation (before compensation) /%	Relative average deviation (after compensation) /%
-20	0.066	0.011	5.09	0.90
-10	0.057	0.007	5.53	0.71
0	0.041	0.016	4.14	1.77
10	0.008	0.022	0.79	2.26
30	0.048	0.047	4.71	4.62

## 4 结 论

为了提升基于AOTF的光谱成像探测技术的环境适应性,满足未来空间、快速等多种环境下的工作需求,提高光谱反演数据精度,须进一步提高光谱仪数据的温度稳定性。本文详细分析了温度变化通过改变晶体材料物理参数影响AOTF特性的作用机制,其中声速随温度变化较大,导致AOTF的调谐特性发生显著变化,而晶体折射率随温度变化较小,因此AOTF衍射光的空间特性变化较小,AOTF成像性能受温度影响较小。构建了修正温度影响的光谱及辐射定标方法,依托实验室搭建的中波红外AOTF光谱成像系统,对提出的引入温度变量的AOTF调谐模型及修正温度影响的光谱及辐射标定方法进行了验证,并给出了对比实验验证结果。温度修正的光谱定标后,低温 $-30\text{ }^\circ\text{C}$ 处的平均驱动频率偏差从 $41.1\text{ kHz}$ 降低至 $0.29\text{ kHz}$ ,光波长漂移从 $7\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}$ 减少至 $5\times 10^{-5}\text{ }\mu\text{m}$ 。将修正后的驱动频率应用至辐射定标过程,实现系统在不同温度下的输出波长跟踪,并求得考虑温度影响的光谱辐射定标系数。本文所述温度修正的光谱定标方法适用于较宽温度范围下的AOTF光谱成像系统,辐射定标方法在高温处修正效果降低。修正后光谱辐射量与理论值偏差在低温区间显著降低,为中波红外AOTF光谱成像系统在制冷环境下的光谱反演数据精度提供保障。

## 参 考 文 献

[1] Westover T, Westhoff Z, Poff S, et al. Miniaturized short-wavelength infrared spectrometer for diffuse light applications[J].

Advanced Photonics Nexus, 2023, 2(6): 066003.

- [2] 刘晓林, 刘勋, 李维, 等. 天基光纤激光雷达光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2023, 50(7): 0708012.  
Liu X L, Liu X, Li W, et al. Optical system design of space-based filament LiDAR spectrometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(7): 0708012.
- [3] 李留成, 王元虎, 唐书凯, 等.  $\text{H}_2/\text{NF}_3$  燃烧火焰荧光光谱分析及温度分布测量[J]. 中国激光, 2023, 50(10): 1011003.  
Li L C, Wang Y H, Tang S K, et al. Fluorescence spectra analysis and temperature profile measurement of  $\text{H}_2/\text{NF}_3$  combustion flames[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(10): 1011003.
- [4] Chen C L, Pu Y R, Shi W S. Low-cost spectrometer design for ultra-high resolution spectral domain optical coherence tomography[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(10): 101101.
- [5] 逢淑林, 孙林, 杜永明, 等. 全谱段光谱成像仪遥感影像云检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(22): 2228003.  
Pang S L, Sun L, Du Y M, et al. Cloud-detection algorithm for images obtained using the visual and infrared multispectral imager[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(22): 2228003.
- [6] Mantsevich S N, Korablev O I, Kalinnikov Y K, et al. Wide-aperture  $\text{TeO}_2$  AOTF at low temperatures: operation and survival[J]. Ultrasonics, 2015, 59: 50-58.
- [7] Gupta N. Hyperspectral imager development at Army Research Laboratory[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6940: 69401P.
- [8] 罗鸿禹, 李剑峰. 中红外锁模氟化物光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101003.  
Luo H Y, Li J F. Progress on mid-infrared mode-locked fluoride fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101003.
- [9] Silvestrova I M, Pisarevskii Y V, Senyushenkov P A, et al. Temperature dependence of elastic properties of paratellurite[J]. Physica Status Solidi (a), 1987, 101(2): 437-444.
- [10] Ledbetter H, Leisure R G, Migliori A, et al. Low-temperature elastic and piezoelectric constants of paratellurite ( $\alpha\text{-TeO}_2$ )[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(11): 6201-6206.
- [11] Schweppe H. Elastic and piezoelectric properties of paratellurite ( $\text{TeO}_2$ )[J]. Ultrasonics, 1970, 8(2): 84-87.
- [12] Ohmachi Y, Uchida N. Temperature dependence of elastic,



- dielectric, and piezoelectric constants in TeO<sub>2</sub> single crystals[J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(6): 2307-2311.
- [13] Uchida N. Optical properties of single-crystal paratellurite (TeO<sub>2</sub>) [J]. Physical Review B, 1971, 4(10): 3736-3745.
- [14] Stefanski I V, Mikhalevich S E, Burak Y V, et al. Temperature dependence of the refractive index of  $\alpha$ -TeO<sub>2</sub> crystals in the 350-800-nm region[J]. Journal of Applied Spectroscopy, 1989, 51(2): 790-792.
- [15] Yumoto M, Maeda Y, Saito N, et al. Electronic wavelength tuning of tunable laser with acousto-optic tunable filter[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(11R): 8411-8415.
- [16] 王耀利, 张瑞, 陈媛媛, 等. 旋光性非共线型 AOTF 温漂及波长修正策略[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(3): 823-827.
- Wang Y L, Zhang R, Chen Y Y, et al. Optical rotation of noncollinear AOTF temperature drift and wavelength correction strategy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(3): 823-827.
- [17] Hao L, Zhang Y Z, Wang G P, et al. Research on differences of AOTF imaging spectrometer spectral calibration results caused by ambient temperature[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10156: 1015602.
- [18] Lü G, Li J N, Li C L, et al. Temperature correction and result evaluation of lunar mineralogical spectrometer for Chang' E-5 mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 5001108.
- [19] 徐睿, 何志平, 陈凯, 等. AOTF 短波红外光谱仪的空间温度特性及其数据预处理模型[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(3): 327.
- Xu R, He Z P, Chen K, et al. Temperature characteristics of SWIR spectrometer based on AOTF and data pre-processing model for deep-space exploration application[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014, 33(3): 327.
- [20] Bass M, DeCusatis C, Enoch J, et al. Handbook of optics[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 2009.

## Spectral and Radiometric Calibration Methods for Acousto-Optic Spectrometer

Cheng Chi<sup>1,2</sup>, Zhao Huijie<sup>1,2,3,4\*</sup>, Guo Qi<sup>1,2,4</sup>, Li Ran<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Instrumentation and Opto-Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup>Qingdao Research Institute of Beihang University, Qingdao 266104, Shandong, China;

<sup>3</sup>Institute of Artificial Intelligence, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>4</sup>Aerospace Optical-Microwave Integrated Precision Intelligent Sensing, Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology, Beihang University, Beijing 100191, China

### Abstract

**Objective** Imaging spectrometers based on acousto-optic tunable filters (AOTFs) are widely recognized for their rapid tuning, reliability, repeatability, and ability to change spectral channels with ease. These instruments have been extensively studied in space remote sensing and reconnaissance. Meanwhile, the spectrometers should be capable of functioning accurately over a broad temperature range to deliver precise spectral information across various operating environments. However, the spectral data accuracy is compromised by ambient temperature fluctuations, which affects the AOTF's spectral tuning and the spectrometer's response to radiation. The tuning relationship shift is predominantly the result of refractive index changes in the acousto-optic crystal and the velocity of acoustic waves as temperature varies, altering the acousto-optic interaction within the crystal. Similarly, the spectrometer's radiation response drifts due to alterations in the AOTF's diffraction efficiency and temperature-dependent changes in the performance of both electronic and optical components. Although previous studies have taken account of the temperature drift in radiation response during the radiometric calibration, it is necessary to first ensure the spectral wavelength stability in the output images, and otherwise, radiometric calibration cannot be achieved. Therefore, implementing temperature corrections during spectral calibration is essential to prevent wavelength deviations in the output images during temperature shifts, which would result in erroneous radiometric calibration.

**Methods** We propose a spectral and radiometric calibration method for correcting temperature effects. Firstly, an AOTF tuning model that incorporates a temperature variable is built. Within this model, the relationship between the drive frequency and the optical wavelength, acoustic wave velocity, refractive index, angle of incidence, and acoustic cut angle is derived. The effect of acoustic wave velocity on the drive frequency is considered independently, and a temperature increase brings about rising acoustic wave velocity, leading to a higher drive frequency (Fig. 2). Then the effect of the refractive index on the drive frequency is considered separately, and a temperature rise leads to increasing refractive index, which also results in a higher drive frequency. Meanwhile, both crystal physical parameters are considered concerning their influence on the drive frequency and compared with the actual measured frequency. At different temperatures, the response

of the AOTF's driving frequency at different wavelengths is measured. The central driving frequencies at various temperatures and wavelengths are extracted, and then a polynomial fitting is employed to deduce the tuning relationship between the central driving frequency, temperature, and optical wavelength. This allows for the correction of temperature-induced tuning drifts during the spectral calibration. During the radiometric calibration, the spectrometer is loaded with adjusted driving frequencies to ensure that the system response can track the required wavelengths at all temperatures. The system responses at different temperatures and wavelengths are collected to obtain the spectral radiometric calibration coefficients that include the temperature variable. By adopting interpolation methods, the spectral radiometric calibration coefficients at any temperature are obtained to realize temperature-corrected radiometric calibration (Fig. 3).

**Results and Discussions** Multiple wavelengths within the range of 3.7 to 4.5  $\mu\text{m}$  are selected to measure the frequency response of the spectral imaging system at various temperatures between  $-30$  and  $50$   $^{\circ}\text{C}$  [Figs. 4(a) and 4(b)]. As the temperature increases, the central driving frequency shifts towards higher frequencies. For the spectral channel with a central wavelength of 4.0  $\mu\text{m}$ , the central driving frequency is 20.05 MHz at a working temperature of  $-30$   $^{\circ}\text{C}$ , and 20.14 MHz at a working temperature of  $50$   $^{\circ}\text{C}$ . It is evident that when there is an approximate temperature difference of  $80$   $^{\circ}\text{C}$  in the working conditions, the driving frequency needs an adjustment of 0.09 MHz to ensure the output wavelength stability. If a fixed driving frequency is applied at different temperatures, the central wavelength of the output from each spectral channel of the system drifts (Table 3), with the wavelength drifting by  $0.0015-0.0025$   $\mu\text{m}$  per  $10$   $^{\circ}\text{C}$ . After completing spectral calibration, the driving frequency accuracy at each wavelength is significantly improved [Fig. 4(d)], and the average driving frequency deviation at different temperatures is reduced (Table 4). The response of the spectral imaging system drifts with temperature, and the spectral data obtained at different temperatures will show variations with temperature. When the temperature rises from  $-20$  to  $30$   $^{\circ}\text{C}$ , the system response decreases and then the calculated spectral radiance decreases [Fig. 5(a)]. After radiometric calibration corrected for temperature, the spectral radiance accuracy improves at lower temperature ranges (Table 5).

**Conclusions** To enhance the temperature stability of spectrometer data, we propose a method for correcting the temperature influence on spectral and radiometric calibration. Firstly, a tuning model of the AOTF incorporating temperature variables is built. We analyze the mechanism by which temperature variations affect the characteristics of AOTFs via altering the physical parameters of the crystal material, with the most significant effect of acoustic wave velocity. This model corrects the spectral drift caused by temperature in spectral calibration, achieving wavelength tracking during the variable-temperature radiometric calibration and ensuring wavelength stability in subsequent radiometric calibrations. Thereafter, the spectral radiometric calibration coefficients that include temperature variables are determined to complete the radiometric calibration. Relying on a laboratory setup, we construct a mid-wave infrared (3.7–4.5  $\mu\text{m}$ ) calibration verification system for AOTF spectral imaging temperature correction to validate the calibration method over the temperature range from  $-30$  to  $50$   $^{\circ}\text{C}$ . The results indicate that the average driving frequency deviation at a low temperature of  $-30$   $^{\circ}\text{C}$  is reduced from 41.1 to 0.29 kHz, effectively suppressing the spectral radiance deviation from theoretical values.

**Key words** mid-wave infrared spectrometer; acousto-optic tunable filter; temperature drift; radiometric calibration