

# AOTF 短波红外光谱仪的空间温度特性及其数据预处理模型

徐睿<sup>1,2</sup>, 何志平<sup>2</sup>, 陈凯<sup>2</sup>, 张虎<sup>1,2</sup>, 傅忠谦<sup>1</sup>, 王建宇<sup>2\*</sup>

(1. 中国科学技术大学 电子科学与技术系, 安徽 合肥 230027;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 中科院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** AOTF 由于其具备体积小重量轻等特点, 已成为深空遥感领域的重要分光器件. 为了 AOTF 短波红外光谱仪能够在宽温度范围的空间环境内获得高精度的光谱反演数据, 从光谱仪的设计原理入手, 分析了温度环境变化对设备中射频功放和 InGaAs 探测器的影响, 通过温度环境模拟实验, 建立并验证了用于校正温度影响的光谱仪数据预处理模型, 为 AOTF 短波红外光谱仪在深空探测中获取高精度数据提供了保障.

**关键词:** 短波红外光谱仪; AOTF; 温度特性; 数据预处理

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

## Temperature characteristics of SWIR spectrometer based on AOTF and data pre-processing model for deep-space exploration application

XU Rui<sup>1,2</sup>, HE Zhi-Ping<sup>2</sup>, CHEN Kai<sup>2</sup>, ZHANG Hu<sup>1,2</sup>, FU Zhong-Qian<sup>1</sup>, WANG Jian-Yu<sup>2\*</sup>

(1. Dept. of Electronic Science and Technology, University of Science and Technology of China 230027, China;

2. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences 200083, China)

**Abstract:** AOTF has become an important dispersive device in the field of deep-space remote sensing because of its characteristics such as small size, light weight. For the purpose of developing a method to obtain high-precision spectral inversion data from SWIR spectrometer based on AOTF under the condition of wide temperature range in deep-space exploration, firstly, the principle of AOTF, as well as the configuration of SWIR spectrometer based on AOTF were introduced. Then, the temperature effect on AOTF, RF amplifier and InGaAs detector with TEC in the spectrometer was analyzed theoretically. Through the temperature simulation experiment, a data pre-processing model for temperature effect correction was set up and validated finally, which provided a guarantee for acquiring high-accuracy data in deep-space exploration application.

**Key words:** SWIR spectrometer, AOTF, temperature effect, data pre-processing model

**PACS:** 07.57.Ty

## 引言

探测行星表面物质成分了解行星起源演化的重要部分, 获取探测目标表面物质反射或发射光谱一直是深空探测用于目标成分分析的重要手段<sup>[1,2]</sup>. 光谱探测仪器按分光方式的不同可以分为滤光片型、光栅型、傅立叶型、二极管阵列型、声光可调滤光器 (Acousto-Optic Tunable Filter, 简称 AOTF)

型等<sup>[2]</sup>. AOTF 通过改变加在其上的射频功率信号的频率来改变衍射波长, 具有体积小重量轻、中心波长挑选灵活、光谱采样步长可控、波长扫描快速等特点, 在深空探测领域应用中具备优势<sup>[2-5]</sup>. 但是深空探测应用的温度环境相对恶劣, 光谱仪往往必须具备在宽温度范围获得有效光谱数据的能力.

本文针对基于 AOTF 分光的短波红外光谱仪, 根据仪器探测原理对其空间温度特征进行分析与研

收稿日期: 2013-04-18, 修回日期: 2013-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21105109)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (21105109)

作者简介 (Biography): 徐睿 (1986-), 男, 天津人, 在读博士生, 从事 AOTF 红外光谱仪定标与数据处理工作. E-mail: xurui@mail.sitp.ac.cn.

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

Received date: 2013-04-18, revised date: 2014-05-23

究, 得到其温度效应机理及数学模型, 建立其在宽温度工作范围 ( $-20 \sim +55^{\circ}\text{C}$ ) 时的响应特性模型并进行地面试验, 建立其所获数据的温度预处理模型, 为其在月表探测应用提供依据, 并为该类光谱仪器在深空宽温度范围工作及其数据应用提供参考。

## 1 温度对 AOTF 短波红外光谱仪性能的影响分析

声光可调谐滤波器是根据声光效应设计的分光器件, 当加载在晶体上的射频驱动信号频率改变时, 可透射准单色衍射光波长也相应改变<sup>[2-5]</sup>。AOTF 短波红外光谱仪是为月表探测准备的 VNIS (Visible and Near-infrared Imaging Spectrometer) 光谱仪<sup>[4,5]</sup>的短波红外探测通道, 其仪器原理框图及主要性能指标如图 1 和表 1 所示。

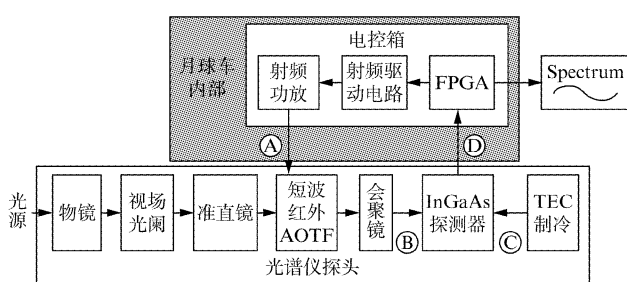


图 1 AOTF 短波红外光谱仪 (VNIS 短波红外通道) 系统结构

Fig. 1 Diagram of SWIR Spectrometer based on AOTF (SWIR channel of VNIS)

表 1 AOTF 短波红外光谱仪 (VNIS 短波红外通道) 主要性能指标<sup>[4]</sup>

Table 1 Main parameters of SWIR Spectrometer based on AOTF (SWIR channel of VNIS)<sup>[4]</sup>

性能参数	指标
光谱范围	900 ~ 2 400 nm
光谱分辨率	$\leq 12$ nm
视场角	$\phi 3.6$
射频驱动频率	40 ~ 120 MHz
量化	16 bits
观测太阳高度角	$15^{\circ} \sim 45^{\circ}$
环境温度适应范围	$-20^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$

光谱仪采用分体式结构, 由光学探头及电控箱组成, 其中光学组件、AOTF 晶体以及探测器模块均置于光谱仪探头; 电控箱则包含了电源、逻辑与射频驱动控制以及射频功放等模块。在月工作时, 光谱仪探头安装在月球车外部, 直接暴露在月表空间环境中; 而电控箱安装于月球车内部, 二者的温度分布无法完全保持一致。考虑到光谱仪中射频功放 (RF

amplifier) 与 InGaAs 探测器均为温度敏感器件, 必须进行温度效应的分析及校正从而提高数据的反演精度。

光谱采集时, 电控箱中的 FPGA 控制射频驱动器 (RF driver) 生成指定频率的射频信号, 通过射频功放后形成驱动信号, 经线缆传输至光谱仪探头的 AOTF 晶体。图 1 系统示意中, A 点代表射频驱动信号, 其输出功率会随电控箱整机温度环境或射频功放长时间工作变化, 从而影响光谱仪探头 AOTF 晶体的衍射效率<sup>[6]</sup>, 造成 B 点衍射光信号的变化。同时, 如表 1 所示, 环境温度变化范围较大, 光谱仪探头中通过 C 点 TEC (Thermoelectricity Cooler) 制冷的 InGaAs 探测器无法保持恒温状态。因此, InGaAs 探测器的温度敏感特性, 加之其接收的来自 B 点的衍射光信号改变, 最终决定了 D 点探测器输出模拟信号的变化, 造成在不同温度环境下, 光谱仪采集数据 DN 值 (Digital Number) 曲线的差异。

## 2 温度影响建模与光谱数据预处理模型

光谱探测的核心是获取目标物质的光谱曲线 (辐亮度曲线或反射率曲线)。在地面应用中, 每一台光谱仪在使用前都需要进行严格的辐射定标。辐射定标是通过标准辐射源, 在不同的波段建立光谱仪入瞳处的光谱辐射亮度值与光谱仪输出的数字量化值 (DN) 之间的定量关系<sup>[1-2,5]</sup>。然而, 深空应用环境温度跨度大的特点造成了光谱仪对同样的入瞳光谱辐射亮度信息产生的 DN 值响应曲线存在差异, 与此同时, 考虑到光谱仪的分体式结构带来的温度分布的不一致性, 将光谱仪置于不同环境温度中分别进行辐射定标获取相应的校正数据是不切合实际的。因此, 通过建立温度影响模型, 先对光谱仪采集 DN 值数据进行预处理, 抑制温度变化的影响, 再进行室温辐射定标, 这是一条行之有效的技术路径。光谱仪在地面与深空环境中的数据反演流程如图 2 所示。

建立光谱温度影响模型旨在将文献[5]中描述的实验室辐射定标 (室温  $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ) 形成的辐射反演参数有效的应用于空间环境温度区间中。从实验室辐射定标采集的大量光谱数据中, 提取 InGaAs 探测器和射频功放的温度遥测参数, 经过统计平均获得 AOTF 短波红外光谱仪的标准温度曲线。如图 3 所示, 在实验室辐射定标中, TEC 制冷下的 InGaAs 探测器温度稳定在  $-31.1^{\circ}\text{C}$ ; 对于射频功放, 在工作流程中存在短暂的关闭状态, 形成了温度曲线两段式

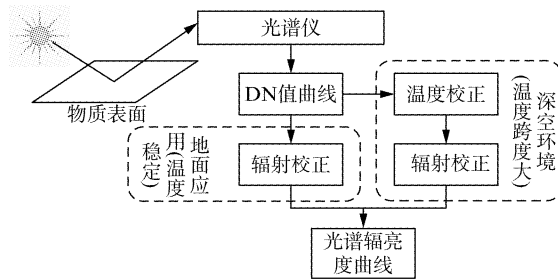


图2 地面与深空应用光谱仪数据反演流程  
Fig. 2 Data inversion process of spectrometer on ground and in deep-space

分布.  $T_{RF}(\lambda)$  和  $T_D(\lambda)$  分别表示射频功放和 InGaAs 探测器的标准遥测温度曲线.

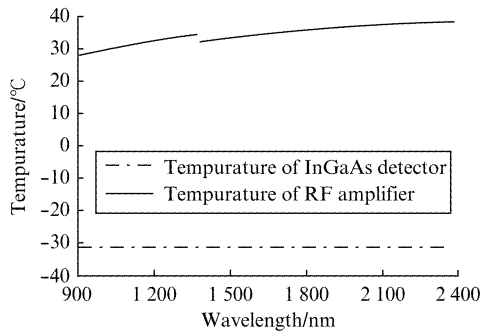


图3 实验室定标标准温度曲线(常温  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  条件下测试), 其中 InGaAs 探测器温度为  $T_D(\lambda)$ , 射频功放温度为  $T_{RF}(\lambda)$

Fig. 3 Standard temperature curves in lab radiometric calibration (Test @  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ ),  $T_D(\lambda)$  and  $T_{RF}(\lambda)$  are temperature curves of InGaAs detector and RF amplifier respectively

考虑到光谱仪分体式设计造成温度分布的不均匀性,在仿真实验时,需要对其两个组件进行独立性能分析,依照图 4(a)中实验设计流程,首先通过独立温度试验,分别仿真两个组件独立的温度特性,再通过整机温度试验,来验证两个独立模型级联后的温度校正模型的有效性.图 4(b)为实验装配图,使用 LabSphere US-200 SF 积分球作为光源,提供稳定光谱;测试时,将待测组件置于真空罐中,其他组件维持室温( $23 \pm 1^\circ\text{C}$ ),真空罐内缓慢升温,在不同温度层上采集光谱仪对积分球的响应数据.

### 2.1 电控箱温度影响

AOTF 的重要参数是晶体的衍射效率,即当单色光正入射晶体,使用与其波长匹配的最佳驱动频率时,出射的衍射光能量与未加载驱动频率时的出射光能量之比.驱动器输出功率改变会直接影响晶

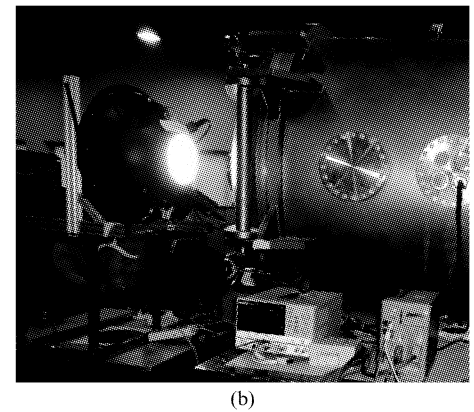
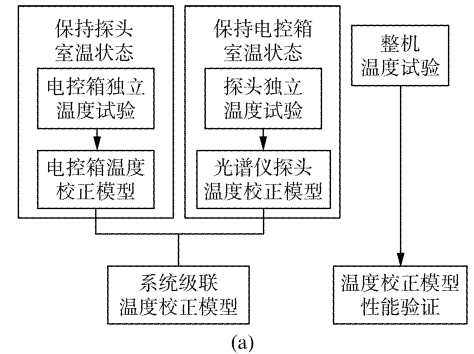


图4 温度环境模拟实验.(a) 实验设计流程图.(b) 实验装配图

Fig. 4 Experiment of temperature effect on VNIS. (a) Design of temperature environment experiment. (b) Configuration of temperature experiment

体的衍射效率<sup>[6]</sup>.表 2 所示为使用文献[7]中 AOTF 性能测试系统检测短波红外晶体在不同驱动频率下、输出功率使用 2 W 与 2.5 W 时,晶体的衍射效率的变化情况.当输出功率增大时,驱动频率所对应的各个波段的衍射效率的增益基本一致,可以近似认为射频功放在有效工作带宽内,功率的变化对晶体衍射效率的影响是没有频率选择性的.

表2 不同频率下,射频功放输出功率对衍射效率的影响  
Table 2 Effect on AOTF diffraction efficiency with output power of RF amplifier under different frequency

	75.585 MHz	72.92 MHz	56.902 MHz	53.935 MHz	46.56 MHz	44.49 MHz
2 W	6.51%	8.59%	34.38%	31.42%	29.30%	27.17%
2.5 W	8.22%	11.29%	45.29%	40.12%	37.17%	27.33%
增益	1.26	1.31	1.32	1.28	1.27	1.28

射频功放是温度敏感器件,其输出功率会随环境温度或长时间工作而发生变化,更一般来说,含有 PN 结二极管的器件的正向电压具有负温度系数<sup>[8]</sup>.通过电控箱独立温度实验,获取光谱仪探头置于室温,电控箱在不同环境温度下,整机对 LabSphere

US-200-SF 积分球的响应数据,如图 5 所示.

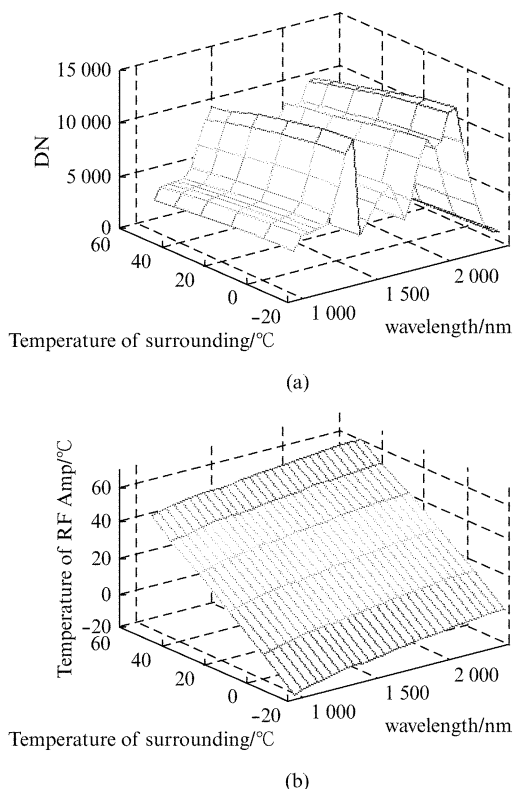


图 5 电控箱独立温度试验数据. (a) DN 值曲线分布. (b) 射频功放温度曲线分布  
Fig. 5 Data from temperature experiment of electric control box. (a) Distribution of DN curves. (b) Distribution of RF amplifier temperature

图 5 中数据表明,随射频功放温度升高,光谱仪对相同光源的响应逐渐降低. 插值计算射频功放在室温(23℃)时,各个波段的光谱响应 DN 值曲线,并以此为基准建立归一化数据模型. 由于射频功放输出功率对 AOTF 衍射效率的影响在工作带宽内与波长无关,可以使用一元二次多项式,拟合全波段下射频功放温度与光谱响应 DN 值之间的关系. 图 6 中为归一化光谱仪响应数据与拟合射频功放的温度效应曲线,对应关系如公式(1)所示,其中  $T_{RF}$  为射频功放温度,  $factor(T_{RF})$  为不同温度下射频功放输出对 AOTF 晶体衍射效率的影响因子,  $p_1 \sim p_3$  为拟合系数.

$$factor(T_{RF}) = p_1 T_{RF}^2 + p_2 T_{RF} + p_3 \quad (1)$$

整机工作时,射频功放温度可从数据帧中打包的遥测参数获得,通过对比数据中射频功放温度在各波段与标准辐射定标射频功放温度曲线引起的输出效率变化关系,得到电控箱温度影响预处理模型,如公式(2)所示.

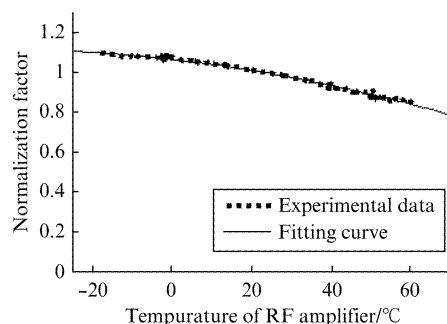


图 6 以室温(23℃)下射频功放性能为基准的归一化温度效应曲线  
Fig. 6 Normalized temperature responsivity curve based on performance of RF amplifier at room temperature (23℃)

$$ratio_{RF}(\lambda) = factor(T_{RFC}(\lambda)) / factor(T_{RFW}(\lambda)) \quad (2)$$

式中,  $ratio_{RF}(\lambda)$  为随波段变化的电控箱温度影响预处理模型,  $T_{RFW}(\lambda)$  为测试数据中射频功放遥测温度曲线,  $T_{RFC}(\lambda)$  为图 3 中辐射定标射频功放标准温度曲线.

## 2.2 光谱仪探头温度影响

通过光谱仪探头独立温度实验中,获取电控箱置于室温,光谱仪探头在不同环境温度下,整机对 LabSphere US-200-SF 积分球的响应数据.

插值计算辐射定标短波红外探测器标准温度  $T_{DC}(\lambda)$  (如图 6,全波段 -31.1℃) 时的光谱响应曲线,以此为基准,归一化图 7(a) 中数据. 光谱仪探头的温度校正模型取决于 InGaAs 器件的物理特性. InGaAs 探测器的探测率与吸收系数有关,是随波长变化的光谱响应曲线,同时对于半导体材料,禁带宽度随温度改变,从而影响探测器截止波长,响应率会随温度变化在波长方向发生漂移,因此探测率是温度和波长的函数<sup>[9-11]</sup>. 图 8 中给出的是截止波长 2.6 μm 的 InGaAs 探测器在 150 K 与 298 K 制冷温度下的归一化响应率对比<sup>[11]</sup>.

利用二元多项式拟合作为光谱仪探头模型建立的基础,使用线性关系仿真响应率随探测器制冷温度的漂移,同时利用三次多项式仿真响应率随波长的变化. 公式(3)与公式(4)分别为光谱仪探头响应率拟合函数  $responsivity(T_D(\lambda))$  和随波段变化的光谱仪探头温度影响预处理模型  $ratio_D(\lambda)$ .

$$responsivity(T_D(\lambda)) = p_1 + p_2(\lambda + a_1 + a_2 T_D(\lambda)) + p_3(\lambda + a_1 + a_2 T_D(\lambda))^2 + p_4(\lambda + a_1 + a_2 T_D(\lambda))^3 \quad (3)$$

$$ratio_D(\lambda) = responsivity(T_{DC}(\lambda)) / responsivity(T_{DW}(\lambda)) \quad (4)$$

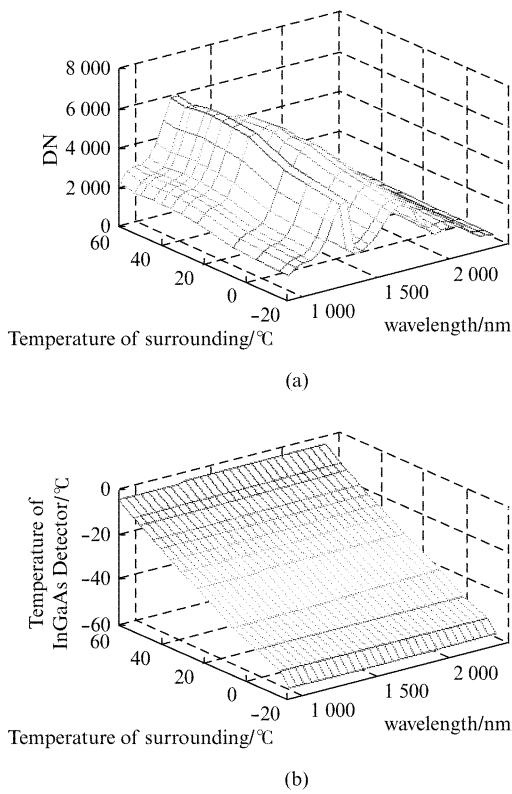


图7 光谱仪探头独立温度试验数据. (a) DN 曲线分布. (b) 探测器温度曲线分布  
Fig. 7 Data from temperature experiment of spectrometer probe. (a) Distribution of DN curves. (b) Distribution of InGaAs detector temperature

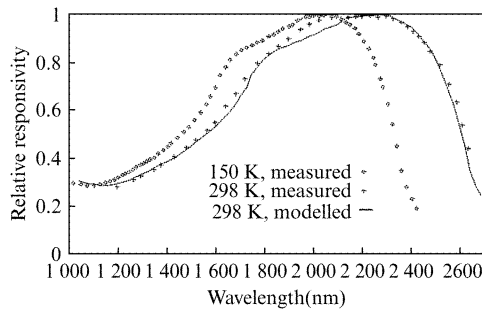


图8 2.6  $\mu\text{m}$  InGaAs 探测器在 150 K 与 298 K 温度下的归一化响应率<sup>[11]</sup>

Fig. 8 Normalized responsivity of InGaAs detector with cut-off wavelength 2.6  $\mu\text{m}$  at 150 K and 298 K respectively<sup>[11]</sup>

式中,  $T_D(\lambda)$  表示 InGaAs 探测器遥测温度曲线,  $T_{DW}(\lambda)$  为测试数据中 InGaAs 探测器的遥测温度曲线,  $T_{DC}(\lambda)$  为辐射定标 InGaAs 探测器标准温度曲线,  $p_1 \sim p_4$  和  $a_1 \sim a_2$  为拟合系数.

### 2.3 整机温度影响与预处理模型

整机温度影响是光谱仪探头和电控箱的综合效应, 电控箱的射频功放影响探测器接收的光信号的

强度, 光谱仪探头温度作用于探测器的响应率. 通过级联电控箱与探头的温度校正模型, 建立整机的温度校正模型, 如公式(5)和公式(6)所示.

$$\text{ratio}_{\text{SWIR}}(\lambda) = \text{ratio}_D(T_D(\lambda)) \cdot \text{ratio}_{\text{RF}}(T_{\text{RF}}(\lambda)) \quad (5)$$

$$\text{DN}_{\text{CORRECTION}}(\lambda) = \text{DN}(\lambda) \cdot \text{ratio}_{\text{SWIR}}(\lambda) \quad (6)$$

式中,  $\text{ratio}_{\text{SWIR}}(\lambda)$  为短波红外光谱仪温度影响预处理模型,  $\text{DN}(\lambda)$  与  $\text{DN}_{\text{correction}}(\lambda)$  分别表示温度影响预处理前后的光谱仪输出 DN 值曲线.

### 3 温度影响预处理模型验证

利用图 4 中提及的整机温度特性试验获取光谱仪整机随环境温度动态变化的光谱响应数据, 图 9(a) 中描述了环境温度从  $-19^\circ\text{C}$  升至  $55^\circ\text{C}$  的 DN 值曲线分布. 使用  $\text{ratio}_{\text{SWIR}}(\lambda)$  温度校正模型对光谱仪数据进行预处理, 处理后数据如图 9(b) 所示.

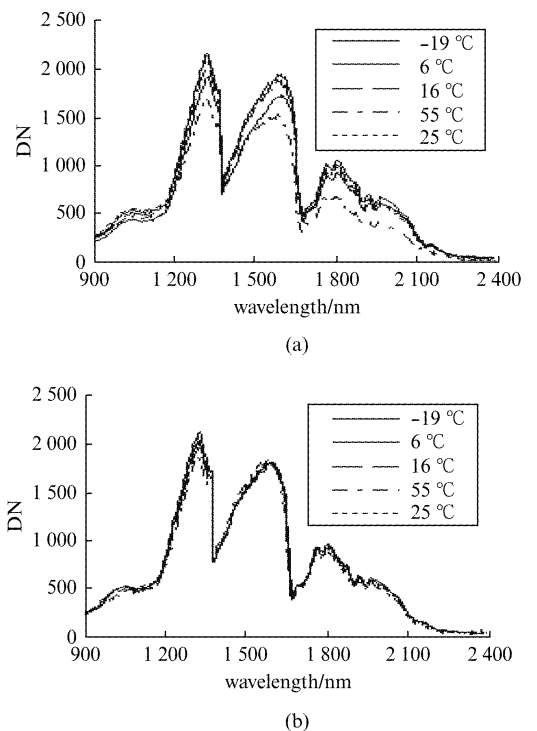


图9 在不同环境温度下, 光谱仪对同一稳定光源的观测曲线. (a) 数据预处理前. (b) 数据预处理后  
Fig. 9 Spectrum curves of the same light source acquired by SWIR spectrometer based on AOTF under different temperature condition. (a) Before data pre-processing. (b) After data pre-processing

对比处理前图 9(a) 与处理后图 9(b) 数据, 以最接近实验室定标温度的  $25^\circ\text{C}$  数据作为基准, 计算数据相对偏差. 比较整机温度校正模型校正后的数据和实测数据, 两者差异减小到所有波段的幅度值的平均偏差在的 6% 以内. 部分误差结果如表 3 所示.

表 3 使用预处理模型前后,光谱数据在不同温度条件与参照温度(25℃)比对的平均偏差(900 nm ~ 2 100 nm)

Table 3 Average deviation between test data under different temperature condition and 25℃ from 900 nm to 2 100 nm, before and after data pre-processing

测试环境温度	处理前平均偏差	处理后平均偏差
-19℃	11.71%	3.89%
-4℃	7.43%	3.95%
6℃	6.31%	4.15%
16℃	5.13%	3.95%
45℃	11.23%	4.60%
55℃	22.66%	5.99%

#### 4 结论

根据 AOTF 器件的分光原理,以及射频功放与 InGaAs 探测器的物理特性,本文提出了用于深空探测 AOTF 短波红外光谱仪温度影响的数据预处理模型. 经试验验证,使用预处理模型后,低温与室温数据的平均偏差从 11.71% 降低至 3.89%,同时高温与室温数据的平均偏差从 22.66% 降低至 5.99%,环境温度对光谱仪性能的影响得到了有效抑制,为其在月表探测宽温度范围应用提供依据,并为该类光谱仪器在深空及其数据应用提供参考. 在后续工作中,将对 AOTF 器件在宽温度范围下的特性进行仿真,通过更为详尽的数据,进一步完善 AOTF 短波红外光谱仪的温度校正方法.

#### References

[1] Tong Qing-xi, Zhang Bing, Zheng Lan-fen. *Hyperspectral remote sensing* [M]. Beijing: Higher Education Press (童庆禧,张兵,郑兰芬编著. 高光谱遥感——原理、技术与

应用. 高等教育出版社), 2006: 1-2.

- [2] Wang Jian-yu, Shu Rong, Liu Yin-nian, et al. *Introduction of spectral imaging technology* [M]. Beijing: Science Press (王建宇,舒荣,刘银年,等编著. 成像光谱技术导论. 科学出版社), 2011: 1-3, 105-107.
- [3] Gupta N, Acousto-optic tunable filters for infrared imaging [C]. Proc. of SPIE Vol. 5953, 2005.
- [4] HE Zhi-ping, SHU Rong, WANG Jian-yu. Imaging Spectrometer based on AOTF and its prospects in deep-space exploration application [C]. Proc. of SPIE Vol. 8196, 2011.
- [5] XU Rui, HE Zhi-ping, ZHANG Hu, et al. Calibration of Imaging Spectrometer Based on Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF) [C]. Proc. of SPIE Vol. 8528, 2012.
- [6] YU Kuan-xin, Ding Xiao-hong, Pang Zhao-guang. *Principle and devices of Acousto-optic* [M]. Beijing: Science Press (俞宽新,丁晓红,庞兆广编著. 声光原理与声光器件. 科学出版社), 2011: 241-244.
- [7] XU Rui, HE Zhi-ping, ZHANG Ze-hong, et al. The research on characteristics of acousto-optic tunable filter by space radiation experiment [C]. Proc. of SPIE Vol. 8196, 2011.
- [8] Behzad Razavi. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* [M]. The McGraw-Hill Companies, Inc. 2001.
- [9] FENG Shi-wei, WANG Cheng-dong, YANG Ji, et al. Study on the photo responsivity of InP/InGaAs detector with the wavelengths [J]. *Semiconductor Optoelectronics* (冯士维,王承德,杨集,等. InP/InGaAs 探测器光响应度与波长关系的研究. 半导体器件), 2007, 28(4): 464-470.
- [10] ZHANG Yong-Gang, GU Yi, ZHU Cheng, et al. Fabrication of short wavelength infrared InGaAs/InP photovoltaic detector series [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张永刚,顾溢,朱城,等. 短波红外 InGaAs/InP 光伏探测器系列的研制. 红外与毫米波学报), 2006, 25(1): 6-9.
- [11] Ruud W M. Hoogeveen, Ronald J. van der A, Albert P H. Goede. Extended wavelength InGaAs infrared ( $1.0 \pm 2.4 \mu\text{m}$ ) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the Earth atmosphere [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, 42: 1-16.

(上接 271 页)

for High-Power Gyrotron. [J] *IEEE Trans. on Plasma Sci*, 2006, 34(3): 635-641.

[9] Goldenberg A L, Litvak A G. Recent Progress of high power millimeter wavelenth gyro-devices [J]. *Physics of Plasmas*,

1995, 2: 2562.

- [10] Thumm M K, Kasperek W. Passive high-power microwave components [J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2002, 30(3): 755-786.