

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

红外傅里叶变换成像光谱仪关键参数测试

李建华*, 薛峰, 薛莲, 李志峰, 刘佳琪

(北京航天长征飞行器研究所 试验物理与计算数学国家级重点实验室, 北京 100076)

摘要:研究了成像光谱仪的关键参数的测试。介绍了关键指标噪声等效光谱辐亮度(NESR)的物理意义,计算模型、测试原理及数据处理方法。采用标定过的黑体作为辐射源对中波及长波红外傅里叶成像光谱仪进行了实验测试,测试内容包括NESR、测温精度及光谱误差。测试结果显示:长波光谱仪的NESR在 $10\ \mu\text{m}$ 处的均值为 $21.4\ \text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$,中波下的NESR在 $4.6\ \mu\text{m}$ 处的均值为 $4.6\ \text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$,长波成像时光谱仪在整个光谱范围内的测温精度小于 $0.4\ \text{K}$,中波成像时其测温精度小于 $2\ \text{K}$,光谱误差均小于光谱分辨率的一半。另外,所有被测指标参数均在标称值以内,说明了测试方法的可行性。提出的测试方法对成像光谱仪的定期测试有参考意义。

关键词:红外傅里叶成像光谱仪;噪声等效光谱辐亮度;测温精度;光谱误差

中图分类号:TH744.1 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152313.0000

Performance test of Fourier transform infrared imaging spectrometer

LI Jian-hua*, XUE Feng, XUE Lian, Li Zhi-feng, LIU Jia-qi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics & Numerical Mathematics,
Beijing Institute of Astronomic Changzhen Aircraft, Beijing 100076, China)

* Corresponding author, E-mail: lijh@163.com

Abstract: The paper researches the measurement methods of key parameters of Fourier transform imaging spectrometers. Firstly, the physical meaning of the key parameter Noise Equivalent Spectral Radiance (NESR) was introduced and corresponding calculation model, test principle and data processing method were given. Then, a calibrated black body was used as radiation source, the performance parameters of Fourier transform imaging spectrometer for mid-wavelength and long-wavelength were tested experimentally, including the NESR, radiometric accuracy and spectral errors. Test results show that the average NESRs of infrared imaging spectrometer for long-wavelength at $10\ \mu\text{m}$ is $21.4\ \text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ and that for mid-wavelength at $4.6\ \mu\text{m}$ is $4.6\ \text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$. The radiometric accuracies of the spectrometer is less than $0.4\ \text{K}$ and $2\ \text{K}$ for long-wave and mid-wave, respectively. The spectral errors of the spectrometer for both mid-wavelength and long-wavelength are less than half of the spectral resolution. These parameters are all in the normal range, which verifies the feasibility of test method. It provides references for the periodically measurement of imaging spectrometers.

Key words: Fourier transform infrared imaging spectrometer; Noise Equivalent Spectral Radiance (NESR); temperature measurement accuracy; spectral error

收稿日期:2015-06-11;修订日期:2015-06-30.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61401013)

1 序言

成像光谱仪能够对目标进行光谱成像,可定量反映出被观测物体的光谱特征,广泛用于环境监测、污染物检测、目标识别、遥感测量等领域^[1-4]。按照分光原理的不同,成像光谱仪主要分为色散型、干涉型和滤光片型。这3种类型的成像光谱仪各有特点,应用效果与其性能指标密切相关。描述光谱仪性能的关键指标参数包括:光谱范围、光谱分辨率、噪声等效光谱辐亮度、信噪比、数据采集速度等^[5]。这些指标互相影响,在进行成像光谱仪设计时需综合考虑。在成像光谱仪的光谱测量范围及光谱分辨率一定的情况下,系统的噪声越小,测量精度越高,仪器的性能越好。描述成像光谱仪系统噪声的指标主要有信噪比与噪声等效光谱辐亮度(Noise Equivalent Spectral Radiance, NESR)。

目前,有关成像光谱仪信噪比的研究较多^[6-8]。文献[6]对其自行设计的偏振干涉成像光谱仪的噪声进行了全面分析,给出了系统总噪声的理论表达式,为抑制仪器的噪声提供了理论指导。文献[7]分析了基于电子倍增 CCD 的声光可调谐滤波器成像光谱仪的系统噪声,推导了普通模式和电子倍增模式下的信噪比模型,并以此分析了提高系统信噪比的方法。文献[8]研究了傅里叶成像光谱仪的信噪比的计算公式以及干涉图信噪比与光谱曲线信噪比的关系,由实验证明了在干涉图信噪比不变的情况下,复原光谱图的信噪比大约与光谱分辨通道数的平方根成反比。另一个指标 NESR 表示系统信噪比为 1 时需要的入射光谱辐亮度。与信噪比相比,该指标只与设备相关,与被测信号无关,是描述系统噪声水平一个比较客观的参数。NESR 越小,系统灵敏度越高。针对 NESR 开展理论分析与实验测量对于光谱仪的设计与检验具有重要意义。限于技术水平,国内并没有傅里叶变换成像光谱仪的成熟产品,关于成像光谱仪 NESR 的测试方法报道也较少,缺乏相关的试验规范。国外虽有对成像光谱仪产品测试的相关报道,但对测试过程的介绍较少,一般只给出测量结果^[9-10]。

本文针对成像光谱仪的关键指标 NESR 的物理意义、计算模型、测试原理进行了介绍。采用标

定过的黑体作为辐射源,针对加拿大一款中波及长波红外傅里叶型成像光谱仪搭建了试验平台,对 NESR、光谱辐射测温误差及光谱测量误差等关键指标进行了测试。测试结果表明,相关指标参数均在标称值以内,说明了测试方法的可行性。

2 傅里叶变换成像光谱仪噪声分析

2.1 傅里叶变换成像光谱仪基本原理

傅里叶变换成像光谱仪基本原理如图 1 所示。其光路核心部分为迈克尔逊干涉仪,被测目标发射的光束由分光镜分为两束,两束光分别经不同的角镜反射后在分光镜表面叠加发生干涉,最后成像在红外焦平面上并输出信号。当运动角镜移动时,两束光的光程差逐渐变化,焦平面上每个像素收集到的干涉条纹强度也相应发生变化。通过处理随光程差变化的干涉强度数据,再利用傅里叶变换技术可以得到每个像素的光谱曲线。成像光谱仪最后输出的是一个数据立方,包含目标的空间位置信息(二维)及光谱信息(一维)。

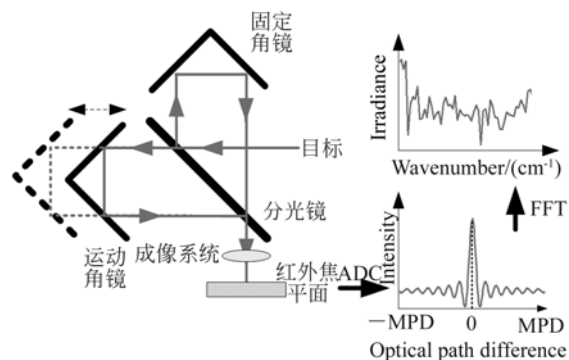


图1 傅里叶变换成像光谱仪原理

Fig. 1 Principle of Fourier transform imaging spectrometer

傅里叶变换成像光谱仪的光谱分辨率 $\Delta\nu$ 与最大光程差 MPD 的关系如下:

$$\Delta\nu = \frac{1}{2MPD} \quad (1)$$

最大可探测的波数 ν_{\max} 与光程差采样间隔 Δx 有如下关系:

$$\nu_{\max} = \frac{1}{2\Delta x} \quad (2)$$

2.2 成像光谱仪系统噪声分析

焦平面接收到的平均辐照度可表示为:

$$\Phi = \frac{1}{2} \Omega \tau_0 \int_{\nu_1}^{\nu_2} [L(\nu) + L_{NE}(\nu)] d\nu, \quad (3)$$

式中: $\Omega = \frac{\pi D_0^2}{4f^2} = \frac{\pi}{4(F\#)^2}$, 表示从探测器像元看光学系统入瞳的立体角; D_0 为光学系统的入瞳直径; f 为光学系统焦距; τ_0 为光学系统透过率; $\nu_2 = 1/\lambda_2$, $\nu_1 = 1/\lambda_1$, 其中 λ_2 , λ_1 分别为光谱仪波数响应范围的上下限; $L(\nu)$ 为目标的光谱辐亮度; $L_{NE}(\nu)$ 为光学系统杂散光的光谱辐亮度; $1/2$ 对应光学系统分光镜半反半透的光能损失。

该入射辐射产生的光电子数为:

$$N_{\text{sig}} = \eta A_{\text{pix}} \Phi \tau_{\text{int}} \bar{\lambda} / hc, \quad (4)$$

式中: η 为探测器的量子效率, $\bar{\lambda}$ 为平均波长, A_{pix} 为光敏面面积, τ_{int} 为积分时间。需要指出的是, 这里的积分时间包含有效积分时间和数据读出时间。焦平面响应信号的信噪比为:

$$SNR_{\text{fpa}} = \frac{N_{\text{sig}}}{\sqrt{n_{\text{ro}}^2 + n_{\text{th}}^2 + n_{1/f}^2 + N_{\text{sig}}}}, \quad (5)$$

式中: n_{ro} , n_{th} , $n_{1/f}$ 分别为读出电路噪声、热噪声以及 $1/f$ 噪声产生的电子数。

由于探测器得到的信号是干涉条纹, 需要对干涉强度信号进行傅里叶变换才能得到光谱信号。因此, 干涉条纹信号的信噪比不等同于光谱信号的信噪比, 二者的关系如下^[2]:

$$SNR_{\text{spect}} = \frac{\Delta\nu \sqrt{n_s}}{\sqrt{2}(\nu_2 - \nu_1)} SNR_{\text{fpa}}, \quad (6)$$

其中: $n_s = 2MPD/\Delta x$, 为干涉条纹的采样数; SNR_{spect} 为光谱信号的信噪比, SNR_{fpa} 为干涉条纹信号的信噪比。因此, 光谱信号的 NESR 与干涉条纹信号的 NESR 的关系如下:

$$NESR_{\text{fpa}} = \frac{\Delta\nu \sqrt{n_s}}{\sqrt{2}(\nu_2 - \nu_1)} NESR_{\text{spect}}. \quad (7)$$

当干涉条纹信号的信噪比为 1 时, 焦平面的平均辐照度 Φ 与噪声等效辐照度 (Noise Equivalent Irradiance, NEI) 相等, 此时式 (3) 中 $L(\nu) + L_{NE}(\nu)$ 值对应于 $NESR_{\text{fpa}}$ 。

NEI 与探测器的核心参数比探测率 D^* 的关系为:

$$D^* = \frac{1}{NEI} \sqrt{\frac{1}{2\tau_{\text{int}} A_{\text{pix}}}}. \quad (8)$$

根据上述关系可得:

$$NESR_{\text{spect}} = \frac{2M}{(\nu_2 - \nu_1) \Omega \tau_0 D^*} \sqrt{\frac{1}{A_{\text{pix}} T_{\text{coll}}}}, \quad (9)$$

其中: $M = (\nu_2 - \nu_1)/\Delta\nu$ 为波数离散数, $T_{\text{coll}} = n_s \tau_{\text{int}}$ 为总的积分时间。可以看到, NESR 主要与探测器的比探测率、积分时间、系统的光谱分辨率、光学系统的透过率及 $F\#$ 有关。在光学系统及探测器确定的情况下, 光谱分辨率越低, NESR 越小, 信号的信噪比越大; 此外, 增大积分时间同样也能提高信噪比。

3 NESR 测试

3.1 测试原理

由于探测器自身噪声及读出电路噪声等的存在, 当光谱仪对一个辐射输出不变的黑体进行数据采集时, 得到的数据依然会有起伏变化, 测试到的光谱辐亮度数据的起伏方差即定义为 NESR。需要指出的是, NESR 的量纲与成像光谱仪测试的光谱辐亮度相同。因此, NESR 可以利用成像光谱仪对一恒温黑体采集多幅数据, 然后对多幅数据计算每个像素的光谱辐亮度方差得到。根据这个方法对加拿大一款中波及长波红外傅里叶型成像光谱仪^[10-11]进行了测试。

NESR 测试装置如图 2 所示, 法国 HGH 面元黑体置于光学平台上, 黑体辐射面积覆盖成像光谱仪的全视场, 黑体发射率为 0.97。成像光谱仪置于三角架上, 与黑体的距离为 2.5 m。调节成像光谱仪俯仰及偏航, 确保黑体表面与光轴垂直。由计算机软件控制成像光谱仪的参数, 包括积分时间, 光谱分辨率, 光谱仪自带标校黑体温度等, 使得相关参数适宜目标数据的采集。

3.2 测试装置

对于中波热像仪, 黑体温度设置为 70 °C; 对于长波热像仪, 黑体温度设置为 25 °C。从 100 组数据中提取感兴趣的波段进行数据处理即可得到该波段的 NESR。

由于红外探测器一般存在坏点及非均匀性噪声, 在进行 NESR 计算之前, 采用中值滤波方式处理数据, 消除了坏点; 采用两点法校正了非均匀性^[11-12], 每次测量前采用成像光谱仪自带的二个标校黑体对探测器进行校正, 标校黑体的温度接近且覆盖被测目标温度。

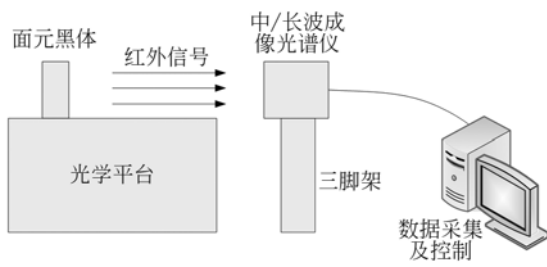


图 2 NESR 测试装置

Fig. 2 Experimental setup for NESR test

3.3 测试结果

成像光谱仪在 $10\ \mu\text{m}$ 处的 NESR 测试结果如图 3(a) 所示, 图像像素数为 320×256 , 为成像光谱仪的全幅面。中波热像仪在 $4.6\ \mu\text{m}$ 处的测试结果见图 3(b), 图像像素数为 64×64 , 位全幅面的中心部分。测试过程中光谱分辨率设置为

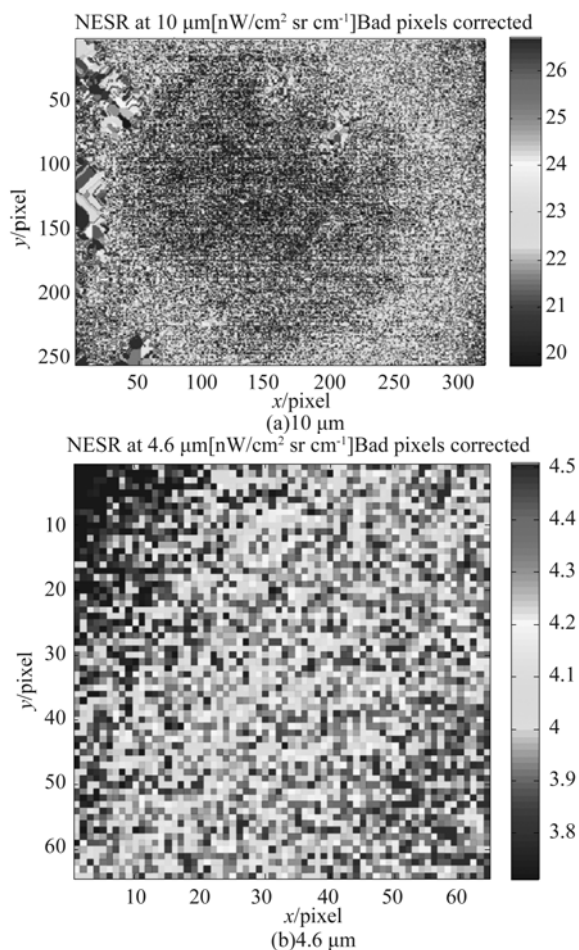


图 3 成像光谱仪不同位置时 NESR 测试结果

Fig. 3 Images of NESR for imaging spectrometer at different positions

$16\ \text{cm}^{-1}$, 在 $10\ \mu\text{m}$ 处对应的光谱分辨率为 $0.16\ \mu\text{m}$, 在 $4.6\ \mu\text{m}$ 处的分辨率为 $0.03\ \mu\text{m}$ 。从图中可以看出, 像素中心区域的 NESR 小于周围的, 说明中心区域噪声较小, 测试数据更加稳定。取长波成像光谱仪中心 $128\ \text{pixel} \times 128\ \text{pixel}$ 的区域进行统计, 以分析各个噪声水平的像素数, 结果如图 4(a) 所示, NESR 的均值为 $21.4\ \text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 。对中波成像光谱仪取中心 $64\ \text{pixel} \times 64\ \text{pixel}$ 区域进行统计分析, 结果如图 4(b) 所示, NESR 的均值为 $4.16\ \text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 。两者的像素分布均接近高斯分布。

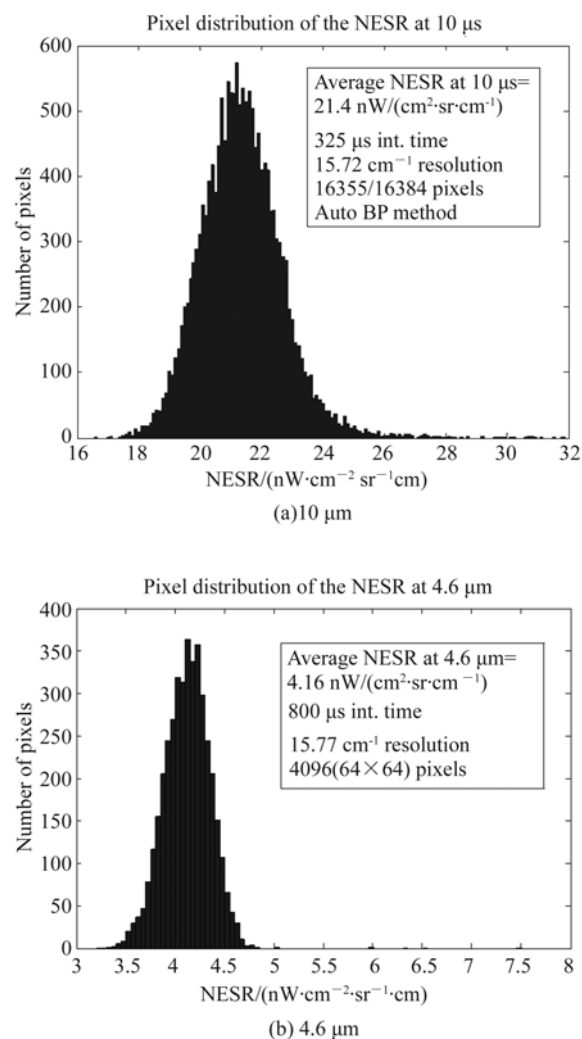


图 4 成像光谱不同位置时 NESR 测试像素分布

Fig. 4 Pixel distribution of NESR for imaging spectrometer at different positions

4 光谱辐射测温误差

根据普朗克公式,通过计算光谱辐射亮度可以得到被测目标的黑体等效温度。以波数表示的普朗克公式为:

$$L(\sigma, T) = \frac{2hc^2\sigma^3}{e^{\frac{hc}{k_B T}} - 1} [W], \quad (10)$$

式中: T 为黑体温度, c 为光速, h 为普朗克常数, k_B 为玻尔兹曼常数。

根据测试得到的光谱辐射亮度,可以计算各个波数对应的黑体等效温度。将等效温度测试结果与采用标校过的热像仪的测试结果进行比较,即可得到成像光谱仪的测温误差。

对采集的黑体图像区中间 128 pixel × 128 pixel 的区域进行计算,一共采集了 10 幅数据,该

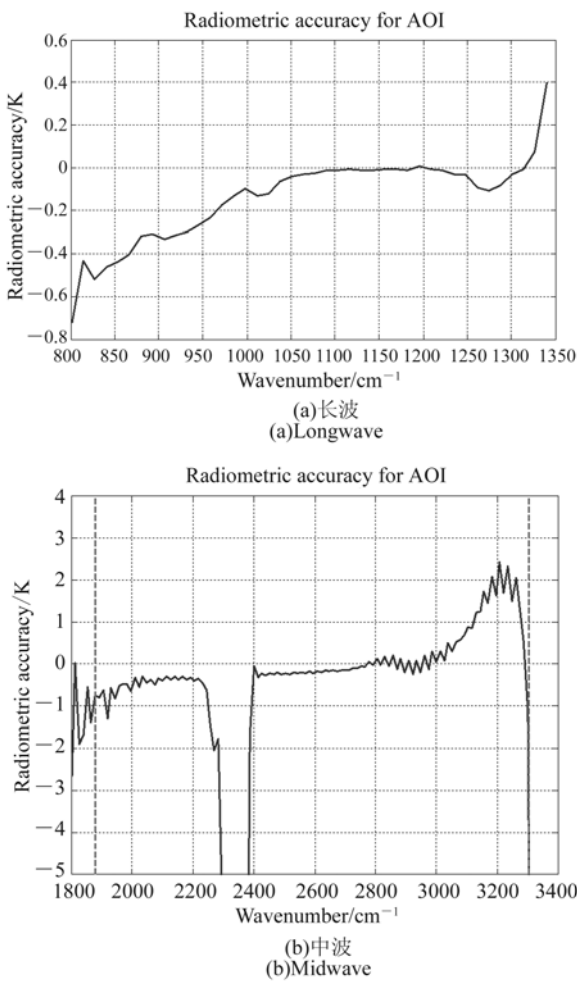


图 5 光谱辐射测量测试结果

Fig. 5 Results of spectral radiometric accuracy measurement

区域的图像温度均匀性好,计算平均值后的测温误差如图 5 所示。波数为 1 000 cm⁻¹的测量误差为 0.1 K,光谱范围内的测量误差整体在 0.4 K 以内。

4.6 μm 波长对应 2 173 cm⁻¹波数,该处的测量误差为 0.4 K。除去图中 2 340 cm⁻¹附近区域对应于 CO₂的吸收峰(4.3 μm),黑体等效温度测量值不反应黑体的实际温度,光谱范围内的测量误差整体在 2 K 以内。

5 波数最大测量误差

采用成像光谱仪对聚苯乙烯红外波长标准物质进行光谱测量,将测量结果与聚苯乙烯红外吸收谱带波数参考值进行比较,即可得到波数测量误差。测试时,成像光谱仪的光谱分辨率设为 4 cm⁻¹,聚苯乙烯红外吸收谱的波数不确定度为 0.52 cm⁻¹ ($k=2$)。测试结果如表 1 所示,图 6 给出了中间光谱的测试结果。

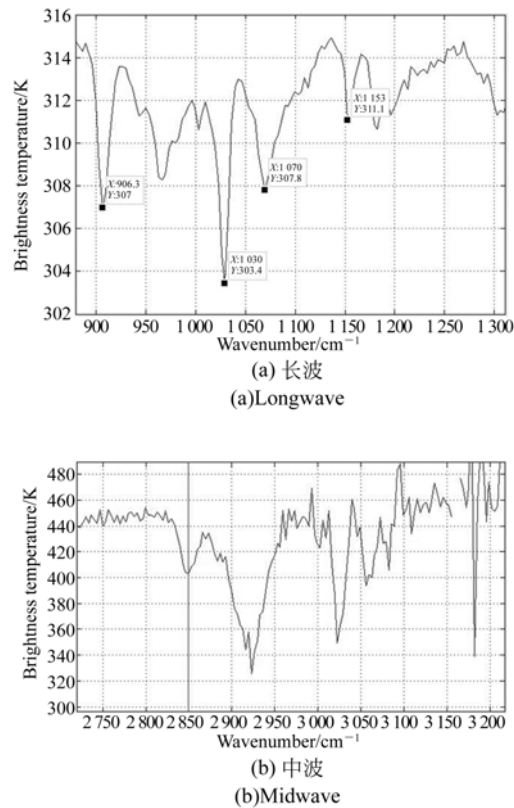


图 6 吸收光谱的测试结果

Fig. 6 Transmittance spectra

表1 波数测量误差表

Tab.1 Measuring errors for wavenumbers (cm^{-1})

序号	标准波数	实测波数	波数差
1	906.82	906.25	0.57
2	1 028.39	1 029.53	1.14
3	1 069.23	1 069.51	0.28
4	1 154.57	1 154.47	0.10
5	2 849.88	2 849.83	0.05
6	3 001.83	3 002.80	0.97
7	3 026.12	3 026.08	0.04
8	3 060.21	3 059.33	0.88
9	3 082.24	3 082.23	0.01

由此可见,测量的波数误差均小于分辨率的1/2,仪器工作正常。

参考文献:

- [1] ROMANO J M, ROSARIO D, FARLEY V, *et al.*. Spectral imagery collection experiment [J]. *SPIE*, 2010, 7695: 76950K
- [2] PRITT A T, KUPFERMAN P N, YOUNG S J, *et al.*. Imaging LWIR spectrometers for remote sensing applications [J]. *SPIE*, 1997, 3063: 138-149.
- [3] 王文丛, 梁静秋, 梁中翥, 等. 中波红外傅里叶变换成像光谱仪后置成像系统分析与设计 [J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0622007.
WANG W CH, LIANG J Q, LIANG ZH ZH. *et al.*. Design and analysis for the rear imaging system of a medium wave infrared Fourier transform imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0622007. (in Chinese)
- [4] 张晓龙, 刘英, 孙强, 等. 消谱线弯曲长波红外成像光谱仪设计 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 266-273.
ZHANG X L, LIU Y, SUN Q, *et al.*. Design of long-wave infrared imaging spectrometer with eliminating spectral curvature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 266-273. (in Chinese)
- [5] SCHUMANN L W, LOMHEIM T S. Infrared hyperspectral imaging Fourier transform and dispersive spectrometers; comparison of signal-to-noise based performance [J]. *SPIE*, 2002, 4480: 1-14.

6 结论

本文对红外傅里叶变换成像光谱仪的关键参数 NESR、测温误差及光谱误差进行了测试,给出了详细的测试原理、过程及数据处理方法,并对其长波成像光谱仪进行了实际测量。测量结果表明,长波红外成像光谱仪 NESR 在 $10 \mu\text{m}$ 处的均值为 $21.4 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$, 中波 NESR 在 $4.6 \mu\text{m}$ 处的均值为 $4.6 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$; 长波成像光谱仪在整个光谱范围内的测温精度小于 0.4 K , 中波小于 2 K , 光谱误差均小于光谱分辨率的一半。将测试结果与成像光谱仪标称参数进行对比可知,所有参数均在标称参数范围内,仪器工作正常,测试方法可靠。本文的测试方法对于成像光谱仪性能的定期测试具有参考意义。

- [6] 袁志林, 张淳民, 赵葆常. 新型偏振干涉成像光谱仪信噪比研究 [J]. *物理学报*, 2007, 56(11): 6413-6419.
YUAN ZH L, ZHANG CH M, ZHAO B CH. Study of SNR of a novel polarization interference imaging spectrometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(11): 6413-6419. (in Chinese)
- [7] 赵慧洁, 程宣, 张颖, 等. 基于 EMCCD 的 AOTF 成像光谱仪噪声分析与信噪比研究 [J]. *光谱学与光谱学分析*, 2012, 32(12): 3422-3428.
ZHAO H J, CHENG X, ZHANG Y, *et al.*. Analysis of the noise and signal-to-noise of AOTF imaging spectrometer based on EMCCD [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3422-3428. (in Chinese)
- [8] 张文喜. 成像光谱仪信噪比研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2006.
ZHANG W X. *Study on the Signal to Noise Ratio of Imaging Spectrometers* [D]. Xi'an: Institute of Optics and Precision Mechanics of The Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [9] BOWIE B T, GRIFFITHS P R. Measurement of the sensitivity and photometric accuracy of FT-IR spectrometers [J]. *Applied Spectroscopy*, 2000, 54(8): 1192-1202.
- [10] FARLEY V, BELZILEA C, CHAMBERLANDA M, *et al.*. Development and testing of a hyper-spectral imaging instrument for field spectroscopy [J]. *SPIE*,

2004, 5546: 29-36.

- [11] FARLEY V, CHAMBERLANDA M, VALLIÈRESA A, *et al.*. Radiometric calibration stability of the FIRST: a longwave infrared hyperspectral imaging sensor[J]. *SPIE*, 2006, 6206: 62062A.
- [12] 殷世民, 应小凡, 陈洪波, 等. 傅里叶变换红外成像光谱仪非均匀性在线定标与校正研究[J]. 红外

技术, 2014, 36(7): 567-572.

YIN SH M, YING X F, CHEN H B, *et al.*. Study on nonuniformity online calibration and correction of Fourier transform infrared imaging spectrometer[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 567-572. (in Chinese)

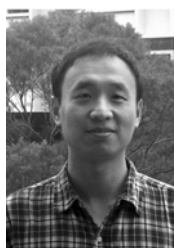
作者简介:



李建华(1985-),男,重庆大足人,博士,工程师,2006年、2008年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2013年于清华大学获得博士学位,主要从事红外目标特性测量、红外探测等技术的研究。E-mail: lijh14@163.com



李志峰(1975-),男,河北人,博士,高级工程师,1998年、2001年于长春光学精密机械学院分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为光电对抗、红外探测、星敏感器等。E-mail: zhifengli@263.net



薛峰(1982-),男,山东德州人,工程师,2005年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2013年于香港中文大学获得博士学位,主要从事反卷积去图像模糊算法等技术的研究。E-mail: 18910571983@163.com



刘佳琪(1972-),男,湖南岳阳人,博士,研究员,1986年于国防科技大学获得学士学位,2002年于北京航天长征飞行器研究所获得硕士学位,2007年于北京航空航天大学获得博士学位,主要研究方向为飞行器设计。E-mail: ljq006@vip.sina.com



薛莲(1980-),女,河南洛阳人,高级工程师,2002年于国防科技大学获得学士学位,2008年于北京航天长征飞行器研究所获得硕士学位,主要从事红外目标特性测量、光电对抗半实物仿真等方面的研究。E-mail: casc_xuelian@163.com