

红外目标光谱辐射亮度测试技术

袁良^{1,2}, 占春连¹, 李燕¹, 卢飞¹, 李正琪¹, 李涛¹

(1. 西安应用光学研究所 光学校准检测实验室, 陕西 西安 710065;
2. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 红外目标光谱辐射亮度对于武器光电系统的搜索、跟踪及目标识别都具有重要的应用。以红外辐射理论为基础, 在同温度、同波长下采用红外傅里叶分光法并与标准黑体相比较的方法对红外目标光谱辐射亮度进行了测试技术研究, 建立了红外目标光谱辐射亮度计量测试装置。根据实验结果分析, 该装置在波长范围 2.5~14 μm , 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 、3 000 $^{\circ}\text{C}$ 、5 000 $^{\circ}\text{C}$ 、7 000 $^{\circ}\text{C}$ 四个温度点条件下, 测量误差为 $\pm 1\%$, 在 5 000 $^{\circ}\text{C}$ 、7 000 $^{\circ}\text{C}$ 时, 测量误差小于 0.1%。分析讨论了对测量结果产生影响的因素, 得出当标准黑体温度与被测红外目标温度不一致时, 会给测量带来较大误差; 在 3.0~5.4 μm 范围内, 分别选用 InSb 和 MCT 两种探测器, 产生的偏差为 $\pm 0.5\%$ 。

关键词: 光谱辐射亮度; 红外目标; 测试技术

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3807-05

Testing technology of spectral radiance of infrared target

Yuan Liang^{1,2}, Zhan Chunlian¹, Li Yan¹, Lu Fei¹, Li Zhengqi¹, Li Tao¹

(1. Optical Calibration Testing Laboratory, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;
2. School of Optoelectronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Spectral radiance of infrared targets are widely used in weapon photoelectric search, track and identify targets. Based on infrared radiate theory, the technologies of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and comparing with standard blackbody source were used to measure spectral radiance of infrared targets at the same temperature and wavelength. The spectral radiance measurement system of infrared targets was also built. According to the results, it is shown that the measurement error is $\pm 1\%$ at 1 000 $^{\circ}\text{C}$, 3 000 $^{\circ}\text{C}$, 5 000 $^{\circ}\text{C}$, 7 000 $^{\circ}\text{C}$ temperature point and the measurement error is less than 0.1% at 5 000 $^{\circ}\text{C}$, 7 000 $^{\circ}\text{C}$ temperature point at the range of 2.5~14 μm . Some factors that affect the measurement accuracy of the infrared spectral radiance were analyzed and discussed. It is obtained that the measurement error is greater when the standard black body temperature is inconsistent with the infrared target temperature; the measurement deviation is $\pm 0.5\%$ with InSb and MCT detector respectively at the range of 3.0~5.4 μm .

Key words: spectral radiance; infrared target; testing technology

0 引言

任何物体都会成为红外辐射源,只是红外辐射强度与物体的温度有关,军事目标中,如坦克、军舰、飞机和导弹等,在运动过程中发动机不可避免地会产生大量的热废气,并且也会导致发动机周边壳体自身温度升高,如果是高速运动,外壳与大气摩擦也会产生极高的温度,导致向外辐射较强的红外辐射。因此只要可以探测到这些红外辐射源便可以探测到军事目标。红外隐身技术是采用各种技术措施消除或降低目标的真实热红外辐射特征,或者改变目标的热红外辐射使其与背景的热红外辐射相适应的技术,以使红外搜索跟踪设备难以发现目标,或者缩短侦视距离来提高军事目标的战场生存能力。提高军事目标的红外隐身能力首先需要对红外材料隐身性能进行准确的测量和评估。因此红外目标辐射特性测量技术在目标检测、红外制导、跟踪、引信和侦察系统等的研制、仿真以及红外隐身与红外对抗等技术的发展中得到越来越广泛的应用^[1-2]。目前,有关大气、太阳红外辐射照度方面的研究较多,针对红外目标辐射亮度特性的测量研究较少^[3-5]。红外目标辐射特性可为红外系统提高探测、定位、分类、识别、跟踪的精度提供保障^[6-8]。而红外目标的光谱辐射亮度的准确测试是整个红外目标辐射性能评价的关键因素之一。

针对红外光谱辐射特性绝对测量一般是通过对比的方法来进行的^[9]。近来研究认为,红外目标辐射特性参数可以利用自发参量下转换双光子场进行绝对测量^[10],但该方法由于转换效率较低,不适合实际工程使用。

文中重点研究红外目标的光谱辐射亮度测试技术,在同温度、同波长下采用红外傅里叶光谱仪作为红外光谱信号分析仪器,通过被测红外目标光谱辐射亮度与标准黑体相比较的方法对红外目标的光谱辐射亮度进行测试研究,分析了测试结果的测量误差,讨论了不同温度、不同探测器以及大气等几个关键因素对测量结果的影响。

1 红外目标光谱辐射亮度测试原理

根据红外辐射理论,红外目标的光谱辐射亮度

采用与标准黑体相比较的方法进行测试^[10],即红外目标与标准黑体在同温度下、同波长下进行比较测试,其中标准黑体溯源至国防光学计量一级站的黑体辐射标准,测试原理如下。

首先,将被测红外目标放入样品加热炉将温度调节至某一值,调节标准黑体,使其温度与被测对象的辐射目标温度相同,根据普朗克公式,标准黑体的光谱辐亮度 $L_1(\lambda)$ 为:

$$L_1(\lambda) = \frac{\varepsilon \cdot c_1}{\pi \cdot n^2 \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot n \cdot T}\right) - 1} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{sr)} \quad (1)$$

式中: c_1 、 c_2 分别为第一、第二辐射常数; n 为空气折射率; ε 为黑体发射率; T 为黑体的温度; λ 为红外辐射波长。

由于红外辐射信号与输出电信号之间呈线性关系,在完全相同的硬件条件下,标准黑体和被测红外目标在相同温度下、相同波长下,有如下关系:

$$\frac{V_1(\lambda)}{V_2(\lambda)} = \frac{L_1(\lambda)}{L_2(\lambda)} \quad (2)$$

式中: $L_2(\lambda)$ 为红外目标的光谱辐射亮度; $V_1(\lambda)$ 、 $V_2(\lambda)$ 分别为变温标准黑体和被测红外目标的输出信号。

由公式(1)、(2)可知,由于标准黑体的发射率已知,只需准确测量标准黑体的温度 T 、输出信号 $V_1(\lambda)$ 、红外目标的输出信号 $V_2(\lambda)$ 即可获得红外目标的光谱辐射亮度 $L_2(\lambda)$ 。

2 红外目标光谱辐射亮度测试装置

如图 1 所示,红外目标光谱辐射亮度测试装置主要由 50~1 000 °C 变温标准黑体(发射率为 0.995 ± 0.001 ,溯源至国防科技工业光学一级计量站的黑体辐射标准)、视场光阑、电控旋转反射镜、红外光学成像系统、红外傅里叶分光系统(分辨率为 1 nm)、红外探测器及计算机数据采集与处理系统等组成。

首先,安装被测红外目标(文中选用一面源黑体代替,发射率为 0.992 ± 0.004 ,溯源至国防科技工业光学一级计量站的黑体辐射标准)。根据光路可逆原理,采用激光器调节被测红外目标的位置,使之与变温标准黑体处于相同的对称光路中。另外在被测面源黑体前加光阑,使辐射口等效为标准黑体的辐射口大小。

其次,将 50~1 000 °C 变温标准黑体的温度设定至与被测红外目标相同温度下,通过控制电控旋转

反射镜,使被测红外目标和标准黑体辐射信号分别经过红外光学成像系统、红外傅里叶分光系统、斩波器和红外探测器,由计算机数据采集处理系统进行数据的采集和处理。

最后,由编写的计算机测量软件按照公式(1)、(2)建立的数学模型和测量程序,分别对所测的红外目标和标准黑体的输出信号进行处理,即可获得被测红外目标的光谱辐射亮度。

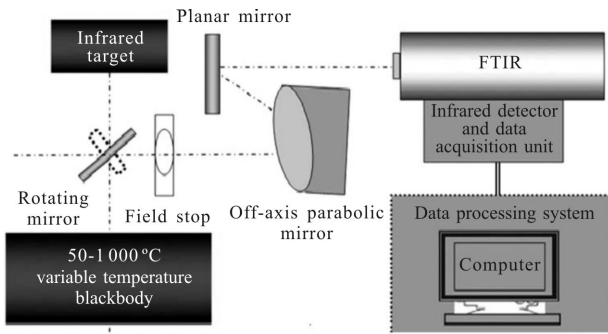


图 1 红外目标光谱辐射亮度计量测试装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of spectral radiance measurement of infrared target

3 测量结果及讨论

3.1 同温度下光谱辐射亮度测量结果

由于黑体的光谱辐射亮度分布值是已知的,为了验证第 2 节所述装置的测量可靠性,以面源黑体作为被测红外目标,由于被侧面源黑体光谱辐射亮度理论分布值可以通过普朗克公式计算得出,因此对比该理论值和用该套装置所测得的光谱辐射亮度分布值,便可得出该套装置的测量精度。

为了使实验具有代表性,选择在 100 °C、300 °C、500 °C、700 °C 四个温度点条件下进行实验。所选探测器为 MCT,每次测量时被测黑体温度与标准黑体温度保持一致。被测黑体的光谱辐射亮度测试结果见图 2。其中,从高往低依次为 700 °C、500 °C、300 °C、100 °C 时的测量结果。

定义误差 $u(\lambda)$ 为:

$$u(\lambda) = \frac{\chi_i(\lambda) - \chi_0(\lambda)}{\chi_0(\lambda)} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\chi_i(\lambda)$ 为测量值,如图 2 所示; $\chi_0(\lambda)$ 为用公式(1)计算所得到的理论值。图 3 为不同温度下的残差曲线 $u(\lambda)$ 。

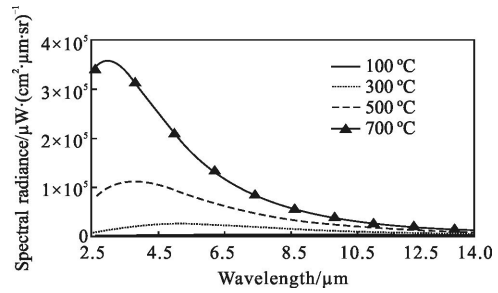


图 2 被测黑体光谱辐射亮度测量结果

Fig.2. Measurement results of spectral radiance of the measured blackbody at different temperatures

由图 3 可知,在波长 3~14 μm、温度 100~700 °C 范围内,用该装置测量面源黑体光谱辐射亮度所得到的结果与理论计算值的误差为 ±1%。在温度点为 300 °C 时存在明显的系统误差,分析认为,该误差是测量时被测黑体的光谱发射率发生突变或探测器响应变化等因素引起的,但该变化引起的误差对测量结果的影响仍然在可接受范围内。另由图 3 可知,温度越高,测量误差越小,在 500 °C 和 700 °C、波长 2.5~14 μm 时,误差小于 0.1%,这是因为温度越高,信号越强,进而信噪比越高,噪声得到有效抑制引起的。

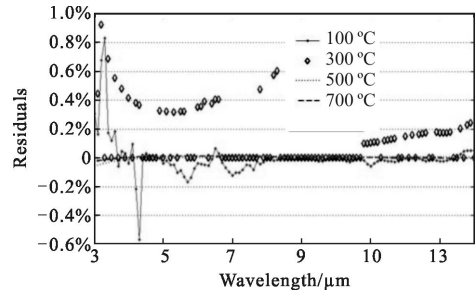


图 3 测量值与理论值的残差图

Fig.3 Residuals between the measurement and the Planck model

3.2 不同温度下光谱辐射亮度测量结果

由于温度对物体的光谱辐射亮度影响较大,用不同于被测目标温度的标准黑体来测量被测目标,研究不同温度标准黑体对测量结果的影响。被测黑体温度保持为 300 °C,分别用 700 °C、500 °C、100 °C 的标准黑体对该被测黑体进行测量,测量结果如图 4 所示。

图 4 中,浅灰色细实线为标准和被测黑体相同温度下的测量结果,其他分别为用 700 °C、500 °C、

100 °C 标准黑体的测量结果。定义公式：

$$\delta(\lambda) = \frac{\phi_{100}(\lambda) - \phi_{300}(\lambda)}{\phi_{300}(\lambda)} \times 100\% \quad (4)$$

式中： $\delta(\lambda)$ 为误差值； $\phi_{100}(\lambda)$ 、 $\phi_{300}(\lambda)$ 分别为 100 °C 和 300 °C 标准黑体的测量结果。用 100 °C 标准黑体来测量 300 °C 被测黑体，根据公式 (4) 可知，误差最大为 12.6%，误差较大。用 700 °C、500 °C 标准黑体测量时，其结果比 100 °C 时偏差更大，是 300 °C 时的几倍量级，且峰值波长位置发生了偏移，曲线也不够平滑，出现了毛刺。因此，对于光谱辐射亮度的测量需保证被测对象与标准黑体的温度一致。

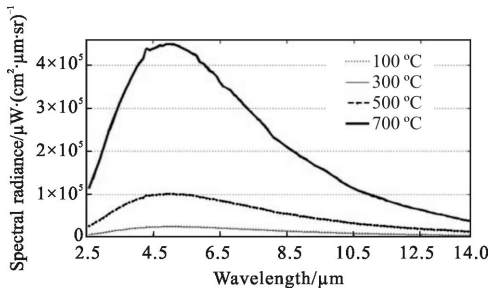


图 4 用不同温度标准黑体测量 300 °C 被测黑体的测量结果

Fig.4 Spectral radiance measurement by using standard blackbody source at different temperatures to measure the measured blackbody at 300 °C

3.3 不同探测器对测量结果的影响

由于光电探测器对光谱具有选择性，为了实现较长谱段的测量，经常需要多个探测器配合使用。为了研究不同标准探测器对光谱辐射亮度测量的影响，选择了 InSb 和 MCT 两种红外探测器分别测量 300 °C 时的被测面源黑体，结果如图 5 所示。从图中可以看出，InSb 探测器和 MCT 探测器光谱响应范围不

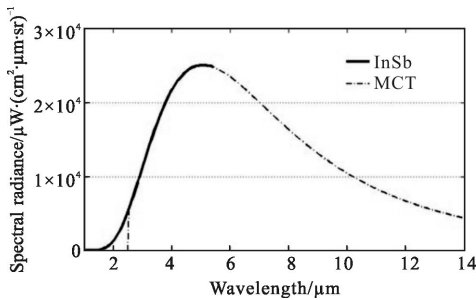


图 5 用不同探测器测光谱辐射亮度的测量结果

Fig.5 Measurement results of spectral radiance by using different detectors

同，InSb 探测器偏短波波段(1~5.6 μm)，MCT 偏长波波段(2.5~14 μm)。

定义公式：

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\gamma_i(\lambda) - \gamma_0(\lambda)}{\gamma_0(\lambda)} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $\varepsilon(\lambda)$ 为偏差； $\gamma_i(\lambda)$ 、 $\gamma_0(\lambda)$ 分别为 MCT、InSb 探测器的测量值。 $\varepsilon(\lambda)$ 分布值如图 6 所示，由图 6 可知，在两种探测器光谱响应重叠的地方，即波长 2.6~5.4 μm 间，两种探测器的偏差小于 ±1%，在 3.0~5.4 μm 范围内，偏差小于 ±0.5%。可见在该测量方法中，使用不同探测器对测量结果的影响在可接受范围内。

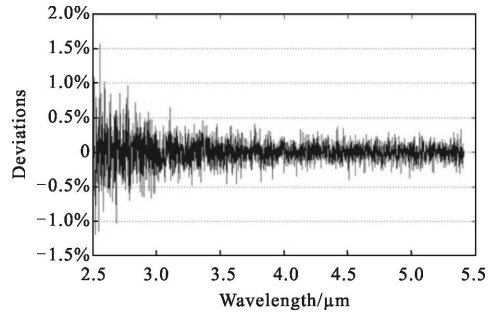


图 6 两种探测器测量结果偏差图

Fig.6 Difference of measurement results between MCT and InSb

3.4 大气对测量结果的影响

大气中含有多种气体分子和悬浮微粒，对红外辐射有吸收、散射等物理过程，为了研究大气对红外光谱的传输特性，用图 1 所示的装置测量 300 °C 条件下的标准变温黑体的相对光谱辐射亮度，结果如图 7 所示，图中实线为扣除大气背景后的相对光强分布曲线，粗短线为未扣除大气背景的相对光谱辐射亮度分布曲线，细点线为以上二者之差，即大气的吸收谱带。从图中可以看出，未扣除大气背景时，

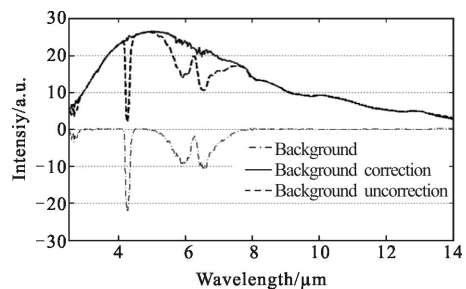


图 7 大气环境对红外光谱测量的影响

Fig.7 Influence of atmospheric on infrared spectrum measurement

光谱曲线上存在几个明显的吸收谱带,这几个吸收峰分别是大气中常见分子的特征吸收峰:如 $4.3\ \mu\text{m}$ 是 CO_2 的特征吸收峰; $5.2\sim 7.6\ \mu\text{m}$ 是大气的一个特征吸收带,其中包括 H_2O 、 CH_4 等分子的特征吸收峰。这些吸收峰的存在对光谱测量产生了明显的影响,因此在实际测量时,需在后期处理时扣除掉背景吸收谱的影响。

4 结论

红外目标光谱辐射亮度是红外目标辐射特性的重要参数之一,对于武器装备的研制和评价具有重要意义。对红外目标的光谱辐射亮度的准确测试是武器系统理论建模和系统设计的重要依据,对武器光电系统隐身技术的发展至关重要,文中在分析总结国内外红外辐射测试技术的基础上,根据实际应用需求,采用傅里叶分光的方法,设计了适合测试红外目标光谱辐射亮度的计量测试装置。

根据实验结果分析,该装置在波长范围 $2.5\sim 14\ \mu\text{m}$, $100\ \text{℃}$ 、 $300\ \text{℃}$ 、 $500\ \text{℃}$ 、 $700\ \text{℃}$ 四个温度点条件下,测量误差为 $\pm 1\%$,在 $500\ \text{℃}$ 、 $700\ \text{℃}$ 时,测量误差小于 0.1% 。实验分析了对测量结果产生影响的因素,得出当标准黑体温度与被测红外目标温度不一致时,会给测量带来较大误差;在 $3.0\sim 5.4\ \mu\text{m}$ 范围内,分别选用 InSb 和 MCT 两种探测器,产生的偏差为 $\pm 0.5\%$;大气的特征吸收谱对测量带来了明显的误差,需在后续处理中扣除大气背景的影响。

该测试装置具有光谱分辨率高、测试速度快、光谱范围宽等特点。不仅适用于各类红外目标光谱辐射亮度的测试,对红外材料、红外模拟器光谱发射率的计量测试也具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Mu Wudi, Cheng Haifeng, Tang Gengping, et al. Present status and development of thermal infrared stealthy camouflage technology and materials [J]. *Materials Review*, 2007, 21(1): 114-117. (in Chinese)
穆武第,程海峰,唐耿平,等.热红外隐身伪装技术和材料的现状与发展[J].材料导报,2007,21(1):114-117.
- [2] Sang Jianhua, Zhang Zongbin. Development trends of infrared stealth technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 14-19. (in Chinese)
桑建华,张宗斌.红外隐身技术发展趋势[J].红外与激光工程,2013,42(1):14-19.
- [3] Berdahl P. Spectral measurements of infrared sky radiance [C]//Third National Passive Solar Conference, 2014, 1979: 11-13.
- [4] Fontenla J M, Harder J, Rottman G, et al. The signature of solar activity in the infrared spectral irradiance [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2004, 605(1): L85.
- [5] Cohen M, Megeath S T, Hammersley P L, et al. Spectral irradiance calibration in the infrared. XIII. "Supertemplates" and on-orbit calibrators for the SIRTf infrared array camera [J]. *The Astronomical Journal*, 2003, 125(5): 26-45.
- [6] Xie Minyong, Shen Weidong, Song Sihong, et al. Effectiveness evaluation of infrared stealth based on the contrast of target and background infrared radiation [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(2): 113-115. (in Chinese)
谢民勇,沈卫东,宋斯洪,等.基于目标与背景红外辐射对比度的红外隐身效能研究[J].红外技术,2011,33(2):113-115.
- [7] Yi Yaxing, Yao Mei, Wu Junhui, et al. Factors of the detected luminance of an infrared target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 13-18. (in Chinese)
易亚星,姚梅,吴军辉,等.影响红外目标探测亮度的因素[J].红外与激光工程,2014,43(1):13-18.
- [8] Mao Hongxia, Dong Yanbing, Liu Ning, et al. Evaluation technique for infrared radiation model of military target [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2006, 22(6): 14-16. (in Chinese)
毛宏霞,董雁冰,刘宁,等.军用目标红外特性模型评估技术[J].航天电子对抗,2006,22(6):14-16.
- [9] Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Ground-based spatial object infrared radiation feature measurement technique [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(2): 304-310. (in Chinese)
杨词银,张建萍,曹立华.地基空间目标红外辐射特性测量技术[J].仪器仪表学报,2013,34(2):304-310.
- [10] Sun Liquan, Zhu Jingping, Zhang Yanpeng, et al. Study on the absolute measurement method of infrared spectral radiance [J]. *Journal of Applied Optics*, 1999, 20(3): 19-21. (in Chinese)
孙立群,朱京平,张彦鹏,等.红外光谱辐射的绝对测量方法研究[J].应用光学,1999,20(3):19-21.