

不同非均匀性校正温度的红外测温技术

张晓龙^{1,2}, 刘英^{1*}, 王健¹, 周昊^{1,2}, 孙强¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为使制冷型中波红外热像仪在不同环境温度下经过非均匀性校正后保持较高的测温精度,研究了考虑非均匀性校正温度效应的中波红外热像仪标定模型。利用不同温度的面源黑体对热像仪进行非均匀性校正,然后对黑体目标进行测温实验,获得了不同校正温度下热像灰度与黑体辐射亮度之间的变化关系,建立了目标的测温数学计算模型,最后对测温结果进行误差分析。结果表明:在不同校正温度下,热像灰度相对非均匀校正辐亮度的漂移可做线性化处理,且与目标温度变化无关。在非均匀性较低的测温范围内热像仪的测温误差小于 ± 0.22 °C,极大减小了制冷型中波红外热像仪在不同校正温度下非均匀性校正后的测温误差。

关键词:非均匀性校正;制冷;中波红外热像仪;红外测温

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20140701.0150

Infrared thermometry technology with different nonuniformity correction temperatures

ZHANG Xiao-long^{1,2}, LIU Ying^{1*}, WANG Jian¹, ZHOU Hao^{1,2}, SUN Qiang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: liuy613@163.com*

Abstract: In order to keep high accuracy of temperature measurement of the cooled medium-wave infrared thermal imager after nonuniformity correction under different ambient temperatures, the calibration model of the medium-wave infrared thermal imager is analyzed with the consideration of the effect of the nonuniformity correction temperature. The nonuniformity of thermal imager is corrected using surface blackbody under different temperatures. The relationship between the gray and blackbody radiance is obtained by thermometry experiment of blackbody target. The mathematical calculation model of target temperature is established and the error of thermometry result is analyzed. The results show that the drift of gray of thermal image as nonuniformity

收稿日期:2013-10-11;修订日期:2013-12-13

基金项目:吉林省与中国科学院合作长吉图开发开放先导区科技创新合作专项资金资助项目(No. 2011CJT0004);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20106015, No. 20125092)

correction radiance under different correction temperatures can be treated linearly, and is independent on the target temperature. When the nonuniformity is low, the temperature measurement error of the thermal imager is less than $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}$, which greatly reduces the temperature measurement error of the cooled medium-wave infrared thermal imager after nonuniformity correction under different correction temperatures.

Key words: nonuniformity correction; cooled; medium-wave infrared thermal imager; infrared temperature measurement

1 引言

近年来,随着红外热成像系统的迅速发展,红外测温技术在军事和民用领域都得到了广泛的应用,如红外制导、红外通信、目标的侦察监视、探测隐身武器装备、红外预警等。但红外探测的抗干扰性较差,且红外焦平面阵列存在固有的非均匀性,会导致较大的测温误差,影响目标识别。为此,世界各国在红外热成像系统的测温和非均匀性校正方面做了大量工作,主要集中在红外焦平面阵列的非均匀性校正方法研究^[1-4]和减小目标发射率、大气、环境温度对测温精度的影响等方面^[5-7],而对红外探测器在不同校正温度下进行非均匀性校正后的测温精度研究很少。

目前,为了方便使用,制冷型中波红外热像仪通常使用镜头盖进行非均匀性校正,其校正温度为环境温度,但是环境温度会因工作环境不同而存在较大差异,即使在同一环境中温度也会存在波动。红外探测器在不同校正温度下进行非均匀性校正之后热像灰度会有很大变化,使得测温精度难以满足要求。针对目前存在的测温问题,本文在特定的校正温度和黑体温度满足热图像均匀性较高的情况下对制冷型中波红外热像仪进行了测温实验研究。

2 黑体辐射亮度的计算

黑体是发射率为1的理想化辐射体,其辐射的光谱分布公式为:

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}), \quad (1)$$

式中, $c_1 = 3.7415 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2$, $c_2 = 1.4382 \text{ K/cm}^2$ ^[8]。

大多数物体(包括黑体)为朗伯辐射体,其光谱辐射亮度 $L(\lambda) = \frac{M_{\lambda}}{\pi}$ 。在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 的光谱范围内绝对黑体的光谱辐射亮度积分的表达式为:

$$L(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} d\lambda. \quad (2)$$

实验中使用的红外热像仪探测器为制冷型中波红外面阵探测器,其光谱响应范围为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 。

3 红外热像仪测温实验

由于需要利用黑体对热像仪进行非均匀性校正,因此实验须采用近距离扩展源法,即目标充满热像仪的视场。将热像仪放置在距离黑体面源 1.2 m 的位置,可以忽略热像仪和黑体间的空气辐射影响。将热像仪和面源黑体置于一透明箱体中,以减小外界杂散辐射和空气流动对探测器的影响,实验模型如图1所示。

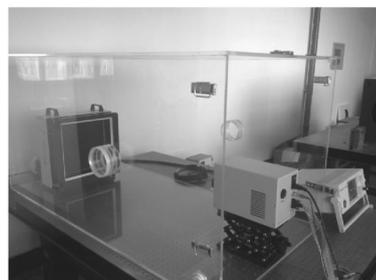


图1 实验实物图

Fig. 1 Physical map of the experiment

实验采用的热像仪的主要性能指标为:

(1) 制冷方式:斯特林制冷;

- (2)工作波段:3.7~4.8 μm ;
- (3)焦距:50 mm;
- (4)像元尺寸:15 μm \times 15 μm ;
- (5)像元数目:640 \times 512;
- (6)非均匀性校正方法:单点校正;
- (7)MRTD:100 mK@1 c/mrad;
- (8)NETD:25 mK。

采用的黑体源为 SR-800-12A/D-LT Source, 图2为面源黑体的整体外观图,其性能指标如下:

- (1)温度分辨率:0.01 $^{\circ}\text{C}$;
- (2)温度范围:-20~150 $^{\circ}\text{C}$;
- (3)稳定性: ± 0.02 $^{\circ}\text{C}$;
- (4)发射率:0.97 \pm 0.01;
- (5)源发射面大小:30 cm \times 30 cm (12 inches \times 12 inches)。



图2 面源黑体

Fig. 2 Surface blackbody

3.1 实验原理

对于面阵探测器,在某光谱范围内探测器像元产生的电子数与该光谱范围内目标的辐射亮度成正比,而像元产生的电子数由图像的灰度级来得到^[9]。为了保证数学模型的精度和线性度,直接标定图像灰度与目标辐射亮度以及校正物体辐射亮度的响应关系。

探测器的理想辐射定标模型为^[10]:

$$DN = aL_b + b, \quad (3)$$

式中, DN 为探测器像元输出的灰度值, L_b 为目标光谱辐射亮度积分, a 为探测器的固定参数, b 为常数项。考虑探测器的非均匀性校正温度效应,不同校正温度下探测器定标模型可以假设为:

$$DN = a'L_b + b' + kL_j, \quad (4)$$

式中, L_j 为校正温度对应的光谱辐射亮度积分。

3.2 实验操作和数据分析

基于上述实验原理,选择了4个黑体温度作为校正温度,分别为:24、20、16、12 $^{\circ}\text{C}$ 。考虑到所拍摄图像的非均匀性要求,每一组实验中测温范围保证热图像非均匀性小于2.75%。具体操作流程如下:

(1)将热像仪置于面源黑体前1.2 m处,打开热像仪电源,调节热像仪方位使黑体充满热像仪视场,并调节热像仪焦距使黑体成清晰热图像;

(2)设定某一黑体温度为校正温度,等待黑体温度稳定且探测器制冷到平衡状态,利用黑体对热像仪进行单点非均匀性校正;

(3)以1 $^{\circ}\text{C}$ 为间隔设置黑体温度,进行测温实验,读取黑体热像的16位灰度值,注意测温范围要保证热图像有较高的均匀性;

(4)改变校正温度值,然后重复上述(2)和(3)操作步骤。

分别对4组不同校正温度下的测温数据进行灰度-辐亮度拟合,拟合曲线如图3所示,可以看出不同校正温度的曲线线性度非常好,且斜率基本相同。线性拟合方程如表1所示,代入式(3),其斜率 a 差值小于1.11%,可认为保持不变,而其截距 b 存在很大差值。此外,每一次非均匀校正后,在校正温度下黑体的热像灰度值保持不变,为32766。

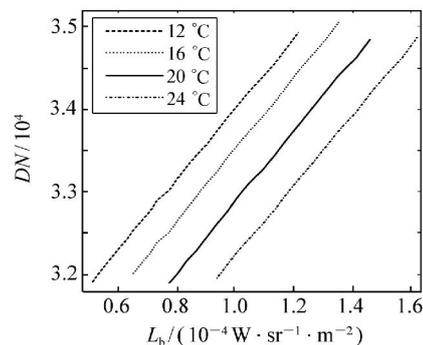


图3 不同校正温度下的灰度-辐亮度响应曲线

Fig. 3 Response curves of gray and radiance under different correction temperatures

表 1 不同非均匀校正温度下灰度-辐亮度关系

Tab.1 Relationship between gray and radiance under different nonuniformity correction temperatures

Correction temperature/°C	12	16	20	24
Fitting equations	$DN = 4.241 \times 10^7 L_b + 29750$ (4 °C < T < 26 °C)	$DN = 4.288 \times 10^7 L_b + 29190$ (10 °C < T < 29 °C)	$DN = 4.269 \times 10^7 L_b + 28608$ (14 °C < T < 31 °C)	$DN = 4.266 \times 10^7 L_b + 27934$ (19 °C < T < 34 °C)

表 1 中, T 表示黑体摄氏温度, 在指定温度范围内热图像非均匀性小于 2.75%。因此, 在不同校正温度下, 热像灰度相对非均匀校正辐亮度的漂移可做线性化处理, 且与目标温度无关。式 (3) 中常数项 $b = 32766 - aL_j$, 相应地, 式 (4) 中 $a' = a, b' = 32766, k = -a$ 。

随着测量时间的延长, 红外探测器的像元会产生灰度值漂移^[7], 因此 4 组测温实验得到的斜率 a 较实际偏大。为此, 追加补偿实验, 在某校正温度下以 6 °C 为间隔快速取 3 个黑体温度值, 并记录其灰度值。通过简单处理可以得到 4 个不同校正温度下的斜率值, 取其平均值 $4.244 \times 10^7 \text{ sr} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ 作为热像仪的灰度 - 辐亮度响应系数。这样不同校正温度下热像仪的标定模型为:

$$DN' = 4.244 \times 10^7 (L_b - L_j) + 32766. \quad (5)$$

可以看出, 不同校正温度引起的灰度值变化和不同目标温度引起的灰度值变化大致是等效的, 校正温度对热像仪测温有非常大的影响。利用热像仪测温时, 根据灰度值可得到待测目标辐亮度 L_b , 进而反推目标温度。

3.3 标定误差分析

为了验证热像仪的标定模型, 利用面源黑体对热像仪进行了验证实验, 分别在不同校正温度下记录一系列黑体温度 and 对应灰度值。将验证实验数据代入式 (5) 可反推出黑体的计算温度。根据黑体的实际温度和计算温度, 可以得到热像仪在不同非均匀性校正温度下的测温误差, 如图 4 所示, 其最大误差小于 $\pm 0.22 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

测温误差的主要来源包括以下 4 个方面:

(1) 热像仪存在灰度值随测量时间漂移的缺陷, 对标定和测温均有一定程度的影响, 由此引起的误差约为 $\pm 0.15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

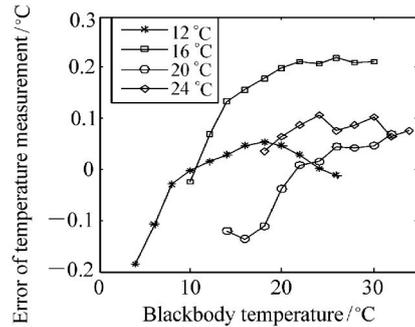


图 4 热像仪在不同校正温度下的测温误差

Fig.4 Temperature measurement error of thermal imager under different correction temperatures

(2) 实验使用的面黑体源的发射率的误差为 ± 0.01 , 温度稳定性为 $\pm 0.02 \text{ }^\circ\text{C}$, 因黑体引起的测温误差约为 1.01% ;

(3) 红外焦平面阵列噪声误差和非均匀性误差约为 1.2%, 且目标温度与校正温度相差越大, 热图像的非均匀性就越差;

(4) 仪器的输出误差大约为 0.6%。

4 结 论

为了减小在不同非均匀性校正温度下制冷型中波红外热像仪的测温误差, 建立了基于不同校正温度的红外焦平面阵列的辐射定标模型。分别在不同校正温度下研究面源黑体灰度随自身温度的变化关系, 得到了探测器的理想定标模型和基于非均匀校正温度的定标模型, 并进行了实验验证。结果表明, 在 12 ~ 24 °C 的范围内, 制冷型中波红外热像仪的非均匀性校正温度效应可作线性化处理且与黑体温度无关。在校正温度分别为 12、16、20、24 °C, 目标温度满足热像非均匀性小

于2.75%的范围内,对热像仪的标定误差进行了分析,其最大测温误差小于 $\pm 0.22\text{ }^{\circ}\text{C}$,大大减小了制冷型中波红外热像仪在不同非均匀性校正温度下的测温误差。

参考文献:

- [1] 陈世伟,杨小冈,张胜修,等.基于变积分时间的红外焦平面非均匀性校正算法研究[J].光子学报,2013,42(4):475-479.
CHEN SH W, YANG X G, ZHANG SH X, *et al.*. Research on nonuniformity correction algorithm of IRFPA based on adjusting integral time[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(4):475-479. (in Chinese)
- [2] 曹扬,金伟其,刘崇亮,等.红外焦平面阵列的自适应非均匀性校正及硬件实现[J].光学精密工程,2011,19(12):2985-2991.
CAO Y, JIN W Q, LIU CH L, *et al.*. Adaptive nonuniformity correction and hardware implementation of IRFPA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2985-2991. (in Chinese)
- [3] 白俊奇,陈钱,钱惟贤,等.基于环境温度的红外焦平面阵列非均匀性校正[J].红外与毫米波学报,2010,29(1):49-52.
BAI J Q, CHEN Q, QIAN W X, *et al.*. Nonuniformity correction for infrared focal plane arrays based on environmental temperature[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2010, 29(1):49-52. (in Chinese)
- [4] DONG L Q, LIU X H, ZHAO Y J, *et al.*. Scene-based nonuniformity correction algorithm for MEMS-based un-cooled IR image system[J]. *SPIE*, 2009, 74190Y:1-12.
- [5] 杨词银,张建萍,曹立华.基于大气透过率比例校正的目标辐射测量[J].光学精密工程,2012,20(7):1626-1635.
YANG C Y, ZHANG J P, CAO L H. Infrared radiation measurement based on proportional corrected atmospheric transmittance[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1626-1635. (in Chinese)
- [6] 孙志远,王晶,乔彦峰.环境中波红外探测器测温精度的影响[J].中国光学与应用光学,2010,3(6):659-664.
SUN ZH Y, WANG J, QIAO Y F. Influence of environment on temperature measurement precision based on middle-wave IRFPA[J]. *Chinese J. Opt. and Appl. Opt.*, 2010, 3(6):659-664. (in Chinese)
- [7] 孙志远,朱玮,乔彦峰.红外测温过程中灰度值漂移的修正[J].中国光学与应用光学,2010,3(4):391-396.
SUN ZH Y, ZHU W, QIAO Y F. Amendment of gray drift of in infrared temperature measurement[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(4):391-396. (in Chinese)
- [8] GEORGE M W, ARCHIE B. Dual-band MWIR/LWIR radiometer for absolute temperature measurements[J]. *SPIE*, 2006, 62050M:4-13.
- [9] 陆子凤.红外热像仪的辐射定标和测温误差分析[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010.
LU Z F. Calibration and the measurement error analysis of infrared imaging system for temperature measurement[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [10] 李宁,杨词银,曹立华,等.3~5 μm 红外焦平面阵列的辐射定标[J].光学精密工程,2011,19(10):2319-2325.
LI N, YANG C Y, CAO L H, *et al.*. Radiance calibration for 3~5 μm infrared focal plane array[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10):2319-2325. (in Chinese)

作者简介:



张晓龙(1986—),男,山东潍坊人,博士研究生,2009年于青岛科技大学获得学士学位,主要从事红外辐射定标、光学设计等方面的研究。E-mail: long1986lucky@163.com



周昊(1989—),男,安徽亳州人,博士研究生,2009年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事红外光学系统设计等方面的研究。E-mail: 89zhouhao@163.com



刘英(1980—),女,山东滨州人,博士,副研究员,2005年于山东师范大学获得学士学位,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事红外光学方面的研究。E-mail:liuy613@163.com



孙强(1971—),男,黑龙江海伦人,博士,研究员,博士生导师,1997年于黑龙江省绥化学院获得学士学位,2000年于长春理工大学获得硕士学位,2003年于南开大学获得博士学位,主要从事现代红外光学仪器、二元光学、红外系统仿真等方面的研究。E-mail:sunq@ciomp.ac.cn



王健(1980—),男,吉林辉南人,博士,副研究员,2002年、2005年于南开大学分别获得学士、硕士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail:mrwangj@yahoo.com.cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04;国内外公开发行,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊数据库 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

编辑出版:《中国光学》编辑部

投稿网址:<http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址:chineseoptics@ciomp.ac.cn; zgxcn@126.com

联系电话:0431-86176852; 0431-84627061

传 真:0431-84627061

编辑部地址:长春市东南湖大路3888号(130033)