

文章编号:1001-5078(2008)03-0238-04

· 红外材料与器件 ·

## 红外探测器的漂移特性对测温精度的影响

孙志远<sup>1,2</sup>, 乔彦峰<sup>1</sup>, 朱 珮<sup>1</sup>

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**介绍了基于黑体标定的目标表面温度测量系统的系统组成及测量原理, 利用黑体对红外探测器标定得到表面温度的测量曲线。分析了红外探测器的漂移特性, 拟合漂移曲线并对探测器的能量漂移进行补偿。对一个温度可控的面辐射源进行测温实验, 比较漂移补偿前后的测温数据, 补偿后的测温精度得到了明显的提高。

**关键词:**表面温度测量; 能量漂移; 黑体标定

**中图分类号:**TN219      **文献标识码:**A

### Influence of IRFPA Drifting Characteristic on Measurement Precision

SUN Zhi-yuan<sup>1,2</sup>, QIAO Yan-feng<sup>1</sup>, ZHU Wei<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;  
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The principle and configuration of surface temperature measurement system based on blackbody demarcation is introduced, and the blackbody is used to demarcate the IRFPA in order to gain the surface temperature's measurement curve. The drift characteristic of IRFPA is analyzed, and the drift curve is fit to compensate the energy drift. Measurement experiment is carried through on a radiation target which temperature is controllable, the measurement data is compared between the fore-and-aft compensation. The precision of temperature measurement after compensation is improved obviously.

**Key words:** surface temperature measurement; energy drift; blackbody demarcation

### 1 引言

自然界中在热力学零度以上的物体均发出热辐射。通过红外探器对物体的热辐射进行探测, 将物体热辐射的功率信号转换成电信号, 就可以将物体表面温度的空间分布经电子系统处理, 得到与物体表面热分布相应的热像图, 即温度场。运用这一方法, 便能实现对目标进行远距离热成像和测温, 并进行分析判断。使用黑体对红外探测器进行标定, 即可实现对物体表面温度的准确测量。使用黑体标定测温曲线的过程中发现: 随着测量时间的增加, 红外探测器像元的能量近似线性增加, 即红外探测器的像元产生能量漂移。本文主要研究这种漂移对温度测量精度的影响。

### 2 系统组成与测温原理

#### 2.1 测量系统的组成

表面温度测量系统由红外光学系统、红外光谱滤光片、红外相机、信号处理等部分组成。表面温度测量过程框图如图1所示, 目标表面的辐射能经过光学系统和滤光片聚焦在红外相机上转变为相应的电信号, 形成红外图像。滤光片选择3.7~4.2 μm, 4.2~4.8 μm两个波段(下面简称为3波段和4波段), 由电控装置调节交替出现在光学系统与红外相机之间。红外相机的探测器为制冷型中波FPA

**作者简介:**孙志远(1982-), 男, 博士生, 主要研究工作是红外辐射特性测量。E-mail: zhiyuansun1982@tom.com

收稿日期:2007-09-08

探测器,光敏面像元数  $640(H) \times 512(V)$ ;像元尺寸  $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ ;响应波段为  $3.7 \sim 4.8\mu\text{m}$ 。

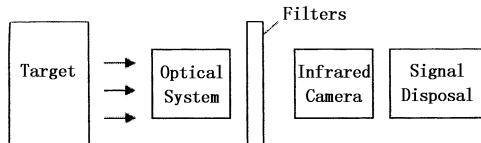


图 1 表面温度测量过程框图

Fig. 1 surface temperature measurement process frame

这里有一个问题我们必须考虑,由于红外相机在采集红外图像前都有一个非均匀校正的过程<sup>[1]</sup>,所以我们必须利用红外相机提供的校正系数表对红外图像进行反推处理,以得到探测器各像元对辐射能量的真实响应。本文后面所述的灰度值都指经过反推处理的真实响应。

## 2.2 测量原理

发射率为  $\varepsilon(\lambda, T)$  的目标的辐射能量可以由普朗克公式表示<sup>[2]</sup>:

$$M = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  是波长;  $T$  为标的热力学温度;  $c_1$  和  $c_2$  分别为第一和第二辐射常数。

假设红外相机的探测器在  $[\lambda_1 \sim \lambda_2]$  波段范围内的光谱响应函数为  $R(\lambda)$ , 则目标通过红外相机形成的红外图像灰度值表示为<sup>[3-4]</sup>:

$$h = \frac{1}{4} A \cdot \cos\theta \cdot \mu \cdot t \cdot \tau_{\text{opt}} \cdot \tau_{\text{air}} \cdot \left( \frac{D}{f} \right)^2 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

式中,  $A$  为灰度值与红外相机光敏面输出电流之间的转换系数;  $\cos\theta$  为被测表面与观测方向的夹角;  $t$  为积分时间间隔;  $\tau_{\text{air}}$  为大气透过率;  $\tau_{\text{opt}}$  为光学系统的透过率;  $D/f$  是光学系统的相对孔径。

假设目标的发射率为  $\varepsilon_0(\lambda T)$ , 表面温度为  $T_0$ , 则目标通过 3、4 波段滤光片在红外相机上形成红外图像的灰度比值经整理后得到:

$$\frac{h_3}{h_4} = \frac{\tau_3 \cdot \int_{3.7}^{4.2} \varepsilon_0(\lambda, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_0} - 1} \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda}{\tau_4 \cdot \int_{4.2}^{4.8} \varepsilon_0(\lambda, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_0} - 1} \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3)$$

式中,  $\tau_3$  和  $\tau_4$  分别为目标与测量系统之间在 3 波段和 4 波段的大气透过率。

可以根据测量当时的大气条件计算大气透过

率<sup>[5]</sup>。假设目标的发射率随波长的变化相对缓慢(一般物体多是这样), 则式(3)可以简化为:

$$\frac{h_3}{h_4} / \frac{\tau_3}{\tau_4} = \frac{\int_{3.7}^{4.2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_0} - 1} \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{4.2}^{4.8} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_0} - 1} \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (4)$$

从式(4)可以看出, 目标的表面温度只与目标在两个红外波段形成的红外图像灰度值比值相关, 如果我们使用黑体标定出不同温度物体在两个波段的灰度比值和温度之间的关系曲线, 就可以根据该曲线计算目标的表面温度值。

## 3 测温曲线的标定

我们选用 CI 公司的 SR-800 宽范围高精度面黑体, 黑体温度稳定度为  $\pm 0.001^\circ\text{C}$ 。具体标定过程为: 将黑体放置在红外相机前, 使黑体充满红外相机的视场。设定黑体温度, 待温度稳定后开始标定, 使用电控装置将滤光片分别调到 3 波段处和 4 波段处, 得到该温度黑体通过两个波段在红外相机上形成的灰度图像并存储。

使用黑体标定测温曲线, 我们进行了三次标定实验。第一次标定黑体的温度范围设定为  $10 \sim 35^\circ\text{C}$ , 以  $5^\circ\text{C}$  为采样间隔; 第二次标定黑体的温度范围设定为  $5 \sim 40^\circ\text{C}$ , 以  $5^\circ\text{C}$  为采样间隔; 第三次标定黑体的温度范围设定为  $10 \sim 40^\circ\text{C}$ , 以  $2^\circ\text{C}$  为采样间隔。得到的三条标定曲线如图 2 所示。从图中可以看到, 三次标定的一致性比较好, 所以我们使用其中的一条标定曲线作为测温曲线, 通过最小二乘法进行曲线拟合就可以得到温度测量曲线。

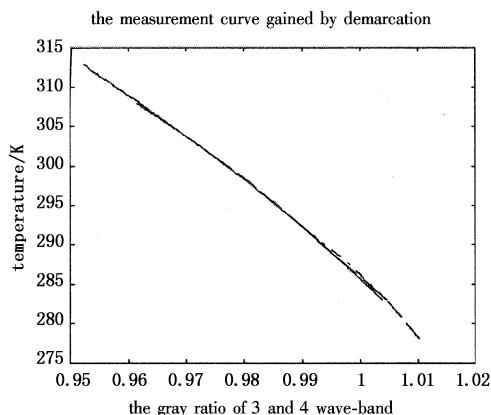


图 2 三个标定曲线比较

Fig. 2 the compare of three demarcation curve

## 4 红外探测器的漂移特性

我们进行如下实验: 开机后对红外探测器进行

非均匀校正。黑体距离测量系统约10m,使黑体成像在红外探测器像面的中心位置;将黑体的温度设定在25℃并在整个测量过程中保持不变,每隔10min对黑体进行一次图像采集。

我们在像面的黑体成像区域任取三个像元点进行仿真得到探测器像元响应的灰度值随时间的变化曲线,如图3所示。

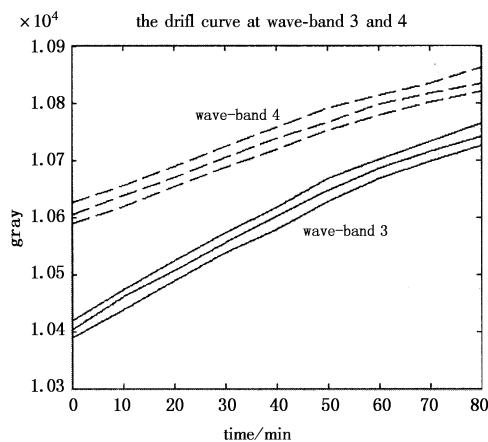


图3 探测器的三个像元在3、4波段的漂移曲线

Fig.3 drift curve at cells of detector

图3中,横坐标为测量时间,纵坐标为灰度值。这里“测量时间”指采集图像的时间与开机时间的间隔。从图3中我们可以看出,红外探测器像元响应的灰度值随测量时间的增加而增加,即红外探测器像元在跟踪测量过程中存在能量漂移,并且探测器每个像元的漂移规律近似相同。

根据图3的漂移曲线我们可以仿真出25℃时黑体在3波段和4波段的灰度比值随测量时间的变化曲线,如图4所示。

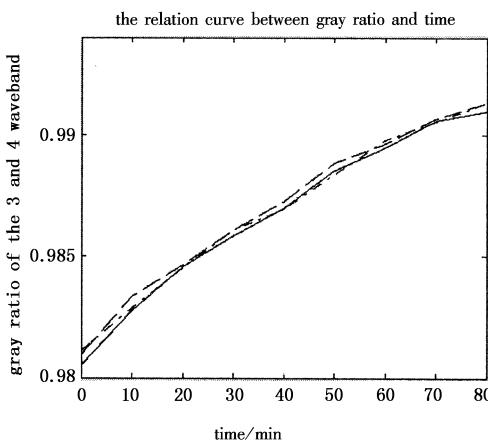


图4 灰度比值随测量时间的变化曲线

Fig.4 the relation curve between gray ratio and time

图4为探测器三个像元在3、4波段灰度比值随测量时间的变化情况,可以看到,目标的灰度比值随

测量时间增加而变大,由于测温曲线是负斜率的,所以随着测量时间的增加,测量得到的目标温度值变小。我们以图4中一个像元的变化曲线为例,仿真了温度的测量值随测量时间的变化曲线,如图5所示。

the relation curve between measurement error and time

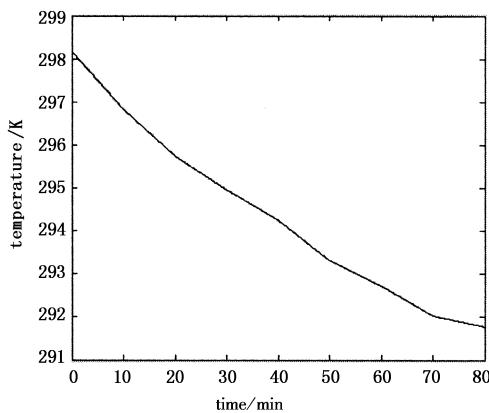


图5 测量误差随时间的变化曲线

Fig.5 the relation between measurement error and time

图5中,横坐标为测量时间,纵坐标为测量得到的目标温度值,不同测量时间的测量误差如表1所示。

表1 不同测量时间的测量误差

Tab.1 the measurement error at different time

time/min	10	20	30	60	80
measure error/K	-1.1621	-2.2708	-3.0428	-5.2790	-6.2211

从表1可以看到,探测器能量漂移引起的测量误差比较大,所以我们需要补偿相机漂移引起的测量误差。

因为探测器的不同像元在3、4波段的灰度比值随时间的变化曲线近似重合(如图4所示),所以我们可以任意选择其中一个像元的漂移曲线,用来补偿探测器像元的能量漂移引入的误差。利用最小二乘法仿真得到黑体温度为25℃时,3、4波段的灰度比值随时间的变化曲线为:

$$y = 0.510817 \times 10^{-7} \cdot x^3 - 0.442010 \times 10^{-5} \cdot x^2 + 0.266744 \times 10^{-3} \cdot x + 0.980509 \quad (5)$$

式中,x为测量时间;y为3、4波段的灰度比值。

下面我们分析目标源温度值不同时探测器像元响应灰度比值随测量时间的变化曲线,将黑体温度分别设定为15℃,20℃,25℃和30℃,得到如图6所示曲线。

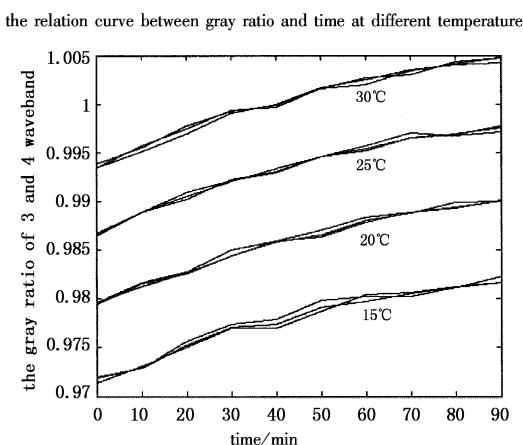


图 6 不同温度目标的灰度比值随时间的变化曲线

Fig. 6 the relation curve between gray ratio and time at different temperature

从图 6 中可以看出, 目标的温度不同, 探测器像元响应灰度比值随温度的变化曲线近似相同, 只是曲线的初始点不同。根据以上分析, 参考公式(5), 漂移补偿可以使用如下通用公式:

$$y = 0.510817 \times 10^{-7} \cdot x^3 - 0.442010 \times 10^{-5} \cdot x^2 + 0.266744 \times 10^{-3} \cdot x + c \quad (6)$$

将测量时间和该时间的灰度值代入式(6), 可以计算  $c$  值的大小, 即目标未经漂移影响的灰度比值, 查询黑体标定得到的测温曲线, 得到  $c$  值对应的温度值, 就是目标的表面温度值。

## 5 实验结果分析

我们进行了下面一组测量: 相机开机后对相机进行非均匀校正, 记录校正后的时间; 将一个表面均匀且温度可控的目标(温度稳定度  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ) 放置在距离相机镜头约 50m 处的位置, 改变可控温目标体的温度, 存储该温度目标通过 3、4 波段滤光片形成的红外图像, 同时记录时间。对图像进行处理以计算目标的表面温度值。

表 2 未进行漂移补偿的测量数据

Fig. 2 the measurement data without drift compensation

measure time /min	real temperature of target/K	measure result /K	error /K
10	303	301.7577	-1.2423
15	298	296.6334	-1.3666
32	298	294.759999	-3.2401
43	303	298.9059	-4.0941
47	300	295.244390	-4.7557
56	298	292.710590	-5.2895

表 3 漂移补偿后的测量数据

Fig. 3 the measurement data after drift compensation

measure time /min	real temperature of target/K	measure result /K	error /K
10	303	302.8860	-0.1140
15	298	298.5684	0.5684
32	298	298.2087	0.2087
43	303	302.6875	-0.3125
47	300	299.7960	-0.2040
56	298	298.0881	0.0881

表 2 为未进行漂移补偿的测量数据, 从表中可以看出, 温度测量误差随着测量时间的增加而增加。通过拟合红外相机的漂移曲线对相机的漂移曲线进行补偿, 得到表 3 的测量数据, 从表中可以看出, 补偿后的测量精度得到了明显的提高。

## 6 结束语及进一步工作

本文使用黑体对红外探测器进行标定的方法测量目标的表面温度值, 补偿了红外相机的能量漂移后得到了精确度比较高的测量结果。本文的测量实验是在实验室条件下进行的, 但在实际测量环境下, 恶劣的天气条件、周围物体的干扰辐射等因素均会对测量精度产生影响<sup>[6]</sup>, 需要进一步的实验研究如何减小这些因素对测量精度的影响。

## 参考文献:

- [1] Hou He-kun, Zhang Xin. Recent development of infrared focal plane arrays nonuniformity correction [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(1): 79–82. (in Chinese)
- [2] Zhang Jian-qi, Fang Xiao-Ping. Infrared physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 57–58. (in Chinese)
- [3] Yu Dao-yin, Tan Heng-ying. Eengineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 131. (in Chinese)
- [4] Li Han-zhou, Pan Quan, ZHANG Hong-cai, et al. A study of algorithms of temperature measurement based on digital image processing [J]. China electrical engineering transaction, 2003, 23(6): 195–199. (in Chinese)
- [5] Wu Han-ping. Research into theoretical calculation method on engineering of transmittance of infrared radiation through atmosphere [J]. Optics and precision engineering, 1998, 6(4): 35–43. (in Chinese)
- [6] Lü Xiang-yin, Ling Yong-shun, Huang Chao-chao. Calculation of surface temperature and infrared radiation for ground target [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 563–566. (in Chinese)