

文章编号 1674-2915(2010)06-0659-06

# 环境对中波红外探测器测温精度的影响

孙志远, 王 晶, 乔彦峰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了分析环境辐射和大气吸收对红外辐射特性测量精度的影响, 对基于中波红外探测器的红外测温进行了研究。首先, 介绍了影响中波红外探测器测温精度的几种辐射能, 根据测温模型得出了红外探测器像元灰度值和辐射照度之间的关系公式, 并进一步推导出辐射测温的修正公式。以高精度面黑体为目标进行了测温实验, 对红外探测器像元的灰度值进行修正并计算测温误差。结果显示, 修正前、后测温误差的均方根分别为 3.56 和 0.27, 测温精度得到了显著的提高, 表明该修正公式可准确地修正环境和大气吸收对中波红外探测器测温精度的影响。

关键词: 红外焦平面阵列; 红外测温; 环境辐射修正; 黑体; 平行光管

中图分类号: TN215 文献标识码: A

## Influence of environment on temperature measurement precision based on middle-wave IRFPA

SUN Zhi-yuan, WANG Jing, QIAO Yan-feng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to analysis the influences of environment radiation and atmosphere absorbing on the measurement precision, the infrared temperature measurement by using a middle-wavelength infrared detector is studied. Firstly, several environment radiations which influence the measurement precision of a middle-wave Infrared Focal Plane Array( IRFPA) are introduced, and the relation between the gray and the absorbed radiation of the infrared detector is deduced. Then the amending formulae of environment radiations are achieved. Using the blackbody as the measurement target, the measurement error are 3.56 and 0.27 before and after amendings, respectively, and the measurement precision is improved evidently. The results show that the amending formulae could modify the influences of environment radiation and atmosphere absorbing correctly.

**Key words:** Infrared Focal Plane Array( IRFPA); infrared temperature measurement; environment radiation amending; blackbody; collimator

## 1 引言

20世纪80年代以来,红外搜索跟踪系统和装有红外成像制导装置的各式导弹有了长足的发展,在这种形势下,研究目标的红外辐射特性具有重要的军事意义。一方面,它可为红外系统提高探测、识别和跟踪精度提供基础数据,为红外系统仿真提供目标的物理特性及数字模型;另一方面,也可为目标红外隐身技术的研究提供一定的理论依据。

环境辐射和大气吸收对目标的红外辐射特性影响很大,因此,进行红外辐射特性测量时必须考虑这些影响因素。近年来,红外焦平面阵列(IRFPA)已广泛应用于目标红外辐射特性的测量,由于大气吸收及杂散辐射的影响,红外探测器像元的灰度值并不是目标能量的真实响应,必须对目标图像的灰度值进行相应地修正,才可以准确测量得到目标的表面温度值等辐射特性。本文基于中波红外焦平面阵列进行了红外测温研究。介绍了影响中红外探测器测温精度的辐射能,推导出了红外探测器像元灰度值和辐照度之间的关系公式,并得出了辐射测温的修正公式。最后以面黑体为对象进行了测温实验。

## 2 环境辐射能

使用红外探测器测量目标的辐射特性时,探测器接收到的能量不仅包括目标自身的辐射能,还包括目标表面反射的周围环境辐射能,目标和红外探测器之间大气通道的辐射能及红外相机内部的非聚焦能量,如图1所示。

(1) 目标反射周围环境的辐射能:这部分能量是由周围环境的辐射能通过目标的反射到达探测器的能量,与目标的散射特性和周围环境的温度相关,可用下式表示<sup>[1,2]</sup>

$$M_{\text{ref}} = (\rho) \cdot M_b(T_{\text{sur}}) + (1 - \rho) \cdot M_b(T_{\text{sur}}), \quad (1)$$

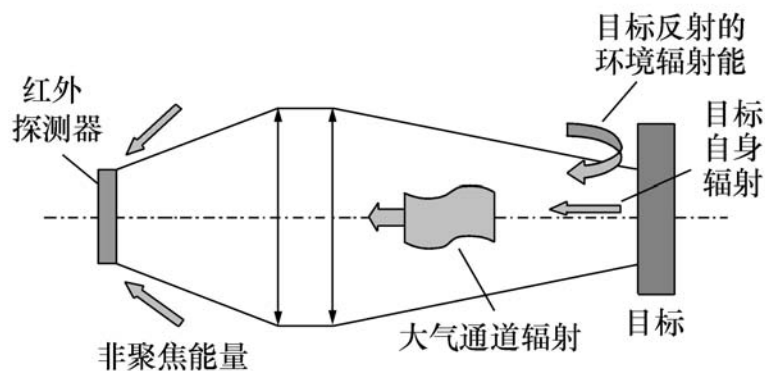


图1 红外探测器接收到的能量示意图

Fig.1 Energy focused on infrared detector

其中,  $\rho$  和  $\epsilon$  分别为目标的反射率和发射率,  $M_b(T_{\text{sur}})$  为周围环境的辐射能,  $T_{\text{sur}}$  为环境温度。

(2) 大气通道的辐射能:目标和探测器之间的大气辐射能对红外探测器产生的能量叠加。

$$M_{\text{atm}} = (1 - \tau) \cdot M_b(T_{\text{atm}}), \quad (2)$$

式(2)中,  $\tau$  为目标与镜头之间的大气透过率,  $T_{\text{atm}}$  为大气温度,  $M_b(T_{\text{atm}})$  为大气的辐射能,当目标处在一个温度稳定的空间内时,可以认为  $T_{\text{atm}} = T_{\text{sur}}$ 。

(3) 相机内部的非聚焦能量:由于光学系统的冷阑效率没有达到100%,所以相机内壁会有一部分辐射能量通过冷阑而叠加在探测器上,由于该能量没有通过光学系统,所以称该杂散能量为非聚焦能量。

将以上辐射统称环境辐射。

## 3 探测器像元的灰度值与辐射照度的关系

通过理论研究和相关实验分析了环境辐射对红外探测器像元灰度值的影响。

红外光学系统的焦距为  $f$ , 辐射源的面积为  $A_s$ , 与红外系统的距离为  $l$ , 辐射源通过红外光学系统在探测器上形成的像的面积为  $A_i$ , 如图2所示。

在中波红外探测器的响应波段  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$  内,表面温度为  $T$ , 发射率为  $\epsilon(T)$  的目标在红

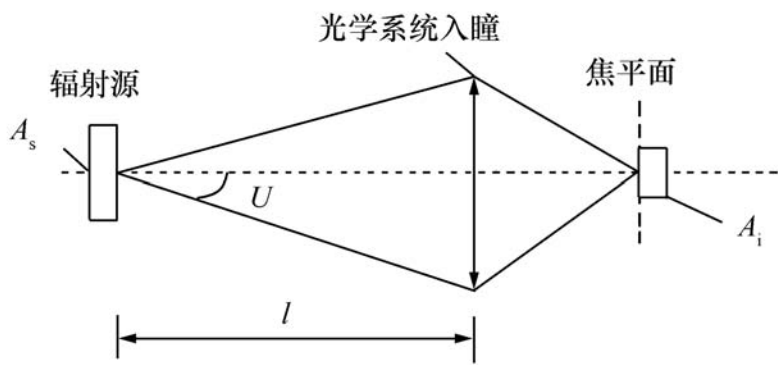


图 2 目标通过红外光学系统成像时的物像关系

Fig. 2 Relation of object and image

外探测器像元上的辐照度  $E$  可以表示为<sup>[3,4]</sup>

$$E = \frac{\tau_{opt} \tau_{air} M D^2 \dot{I}}{f^2 (4f^2 + D^2)}$$

$$M = \tau_{opt} \tau_{air} \frac{C_1}{5} \frac{1}{e^{C_2/T} - 1} d, \quad (3)$$

式中  $\tau_{opt}$  为光学系统的透过率,  $\tau_{air}$  为大气透过率,  $M$  为目标的辐射出射度 ( $W/m^2$ ),  $D$  为光学系统入瞳直径,  $C_1$  和  $C_2$  分别为第一辐射常数和第二辐射常数。

探测器像元对该能量响应的灰度值  $h$  可以表

$$\frac{h}{E} = \frac{G \frac{C_1 R_c}{4(e^{C_2/T} - 1)} d}{\frac{C_1}{5(e^{C_2/T} - 1)} d} = \frac{GR_c}{c} \cdot \frac{\frac{C_1}{4(e^{C_2/T} - 1)} d}{\frac{C_1}{5(e^{C_2/T} - 1)} d} \quad (7)$$

令

$$K_{Eh} = \frac{\frac{C_1}{4(e^{C_2/T} - 1)} d}{\frac{C_1}{5(e^{C_2/T} - 1)} d}, \text{ 并计算不同温度时}$$

的  $K_{Eh}$  值, 结果如表 1 所示。

表 1 目标在不同温度时的  $K_{Eh}$  值

Tab. 1 Values of  $K_{Eh}$  at different temperatures

温度值 /	$K_{Eh}$
10	4.403
30	4.388
50	4.374
55	4.370

从表 1 可以看出,  $K_{Eh}$  在 10 ~ 55 变化了

示为:

$$h = G \frac{C_1 R(\lambda)}{5(e^{C_2/T} - 1)} d = \frac{GD^2 \dot{I}_{opt\ air}}{f^2 (4f^2 + D^2)} \tau_{opt} \tau_{air} \frac{C_1 R(\lambda)}{5(e^{C_2/T} - 1)} d, \quad (4)$$

式中,  $G$  为探测器响应灰度值和电压之间的增益系数。

假设目标的发射率在探测器的响应波段 3.7 ~ 4.8  $\mu m$  内变化不大 (多数目标满足该情况), 则探测器像元的灰度值  $h$  和辐射照度  $E$  的比值可表示如下:

$$\frac{h}{E} = \frac{G \frac{C_1 R(\lambda)}{5(e^{C_2/T} - 1)} d}{\frac{C_1}{5(e^{C_2/T} - 1)} d}, \quad (5)$$

根据光子探测器的光谱响应曲线公式<sup>[5]</sup>:

$$R(\lambda) = \frac{\lambda}{\lambda_c} \cdot R_c, \quad (6)$$

式中,  $\lambda_c$  为截止波长,  $R_c$  为截止波长处的响应率。

将式 (6) 代入式 (5) 得到

0.7%, 可以近似认为:

$$\frac{h}{E} = G \cdot \frac{R_c}{c} \cdot K_{Eh} \text{ 常数.} \quad (8)$$

依据上述分析, 对于 3.7 ~ 4.8  $\mu m$  波段的红外探测器, 当目标的表面温度在较窄的温度范围内变化时, 红外探测器像元的灰度值与辐射照度之间可以近似认为是线性的响应关系:

$$h = C_{Eh} \cdot E, \quad (9)$$

式中  $C_{Eh}$  为红外探测器像元的灰度值  $h$  与辐射照度  $E$  之间响应系数。

## 4 环境辐射的修正研究

令

$$M_t = \tau_{opt} \tau_{air} \frac{C_1}{5} \frac{1}{e^{C_2/T} - 1} \cdot d. \quad (10)$$

对于表面温度为  $T_0$ , 发射率为  $\epsilon$  的目标, 距离红外探测器的距离为  $L$ , 探测器像元的灰度值可表示为:

$$h_{\text{measure}} = U_1 M_t(T_0) + V_1. \quad (11)$$

其中  $U_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 C_{\text{Eh}} \tau_{\text{air}}$ ,

$$V_1 = C_{\text{Eh}} \left[ \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 (\tau_{\text{opt}} M_{\text{atm}} + \tau_{\text{air}} \tau_{\text{opt}} M_{\text{ref}}) + M_{\text{non-focus}}/J \right].$$

而对于表面温度与目标相同的黑体放置在镜头前标定得到的灰度值可以表示为:

$$h_{\text{measure}} - h_{\text{dem}} = C_{\text{Eh}} \left[ \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 (\tau_{\text{air}} \tau_{\text{opt}} M_t(T_0) + \tau_{\text{opt}} M_{\text{atm}} + \tau_{\text{air}} \tau_{\text{opt}} M_{\text{ref}}) + M_{\text{non-focus}}/J - C_{\text{Eh}} \left[ \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \tau_{\text{opt}} M_t(T_0) + M_{\text{non-focus}}/J \right] - \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \tau_{\text{opt}} C_{\text{Eh}} (1 - \tau_{\text{air}}) [M_t(T_{\text{sur}}) - M_t(T_0)] \right]. \quad (15)$$

当  $T_{\text{sur}} = T_0$  时,

$$h_{\text{measure}} = h_{\text{dem}}. \quad (16)$$

又由于

$$\frac{h_{\text{measure}} - V_1}{U_1} = \frac{h_{\text{dem}} - V_2}{U_2}. \quad (17)$$

可得

$$h_{\text{dem}} = \frac{U_2 (h_{\text{measure}} - V_1)}{U_1} + V_2 = \frac{U_2 h_{\text{measure}}}{U_1} - \frac{U_2 V_1}{U_1} + V_2 = \frac{h_{\text{measure}}}{k} + b, \quad (18)$$

其中,  $k = \frac{U_1}{U_2} = \tau_{\text{air}}$ ,  $b = V_2 - \frac{V_1}{k}$ .

根据式(16), 对于环境温度点  $(T_0, h_0)$ , 有:

$$h_0 = \frac{h_0}{k} + b. \quad (19)$$

计算得到:

$$b = h_0 - \frac{h_0}{k} = \left(1 - \frac{1}{k}\right) h_0. \quad (20)$$

将  $k$  和  $b$  代入(18)式, 整理得到:

$$h_{\text{dem}} = \frac{h_{\text{measure}}}{k} + b = \frac{h_{\text{measure}}}{\tau_{\text{air}}} + \left(1 - \frac{1}{\tau_{\text{air}}}\right) h_0. \quad (21)$$

本文把  $k$  和  $b$  统称为测温修正系数, 其中  $k$  为斜率修正系数,  $b$  为偏置修正系数。对目标像元的灰度值进行修正后就可以准确地计算目标的

$$h_{\text{dem}} = C_{\text{Eh}} \left[ \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \tau_{\text{opt}} M_t(T_0) + M_{\text{non-focus}}/J \right] = U_2 M_t(T_0) + V_2, \quad (12)$$

式中,  $U_2 = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 C_{\text{Eh}} \tau_{\text{opt}}$ ,  $V_2 = C_{\text{Eh}} M_{\text{non-focus}}$ .

当环境温度变化不大时, 大气通道辐射和目标反射的环境辐射能可以表示为:

$$M_{\text{atm}} = (1 - \tau_{\text{air}}) M_t(T_{\text{atm}}) = (1 - \tau_{\text{air}}) M_t(T_{\text{sur}}). \quad (13)$$

$$M_{\text{ref}} = (1 - \epsilon) M_t(T_{\text{sur}}). \quad (14)$$

则

表面温度。如果已知目标的发射率和大气透过率<sup>[8~10]</sup>, 就可以准确地计算不同材料目标的表面温度。

## 5 实验

以放置在红外平行光管焦平面处的黑体靶为目标进行测温实验。

### 5.1 实验设备

主要实验设备有高精度面黑体及平行光管。

(1) 面黑体: 以 CI 公司的“SR-800”宽范围、高精度面黑体作为标定源, 对红外探测器进行标定。

(2) 红外平行光管: 平行光管由两个离轴反射镜组成, 平行光管的口径为 600 mm, 焦距为 6 m, 两个反射镜反射率均为 0.95。

(3) 黑体靶: 放置在平行光管焦平面处, 且黑体靶的温度稳定可控。

### 5.2 实验方案

实验室的环境温度约为 28℃, 实验步骤如下:

(1) 非均匀校正: 红外探测器开机并进行非均匀校正;

(2) 标定过程: 将“SR-800”宽范围高、精度面黑体放置在红外相机镜头前, 设定标定范围为 10

~54, 标定间隔选择 2, 将黑体放置在镜头前进行标定<sup>[6]</sup>。

(3) 测量过程: 将大面阵黑体放置在平行光管的焦平面处, 通过平行光管成像, 设定大面阵黑体的起始温度为 12, 间隔 6 采集一次温度数据, 共 7 个温度点。采集各温度点的红外图像。

### 5.3 实验结果

式(21)的斜率修正系数和偏置修正系数的计算需要已知目标发射率  $\epsilon$  和大气透过率  $\tau_{air}$ , 其中, 黑体发射率为 0.97; 由于实验处在一个较稳定的环境中, 而且目标距离红外探测器距离较近, 所以大气透过率可以近似为平行光管两个反射镜反射率的乘积  $0.95 \times 0.95 = 0.9$ 。

表 2 修正前、后测温误差的比较

Tab. 2 Temperature measurement errors before and after amending conditions

目标温度 /	修正前 /	测温误差	修正后 /	测温误差
12	17.00	5	11.78	- 0.22
18	20.89	2.89	17.65	- 0.35
24	25.12	1.12	23.82	- 0.18
30	29.53	- 0.47	30.01	0.01
36	34.16	- 1.84	36.19	0.19
42	38.88	- 3.12	42.18	0.18
48	43.60	- 4.4	47.89	- 0.11
54	48.16	- 5.84	53.45	- 0.55
均方根		3.56		0.27

在消除红外探测器的灰度漂移条件下<sup>[7]</sup>, 分别计算未经任何修正和环境影响修正后两种情况下的测温误差, 单位为, 结果如表 2 及图 3 所示。

### 参考文献:

[1] DATCU S, IBOS L, CANDAU Y, et al. Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography[J]. *Infrared Physics Technol.*, 2005, 46(6): 451-467.

[2] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. *红外技术*, 1997, 21(4): 20-24.  
YANG L. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager[J]. *Infrared Technol.*, 1997, 21(4): 20-24. (in Chinese)

[3] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 70-71.  
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 70-71. (in Chinese)

[4] 《红外与激光工程》编辑部. 红外成像系统测试与评价[M]. 张正辉, 魏宇飞, 译. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.  
《Infrared and Laser Engineering》Editorial Office. Testing and Evaluating of Infrared Imaging System[M]. ZHANG ZH

从图 3 的误差曲线可以看出, 未做任何修正时, 测温误差在环境温度附近(28)是准确的,

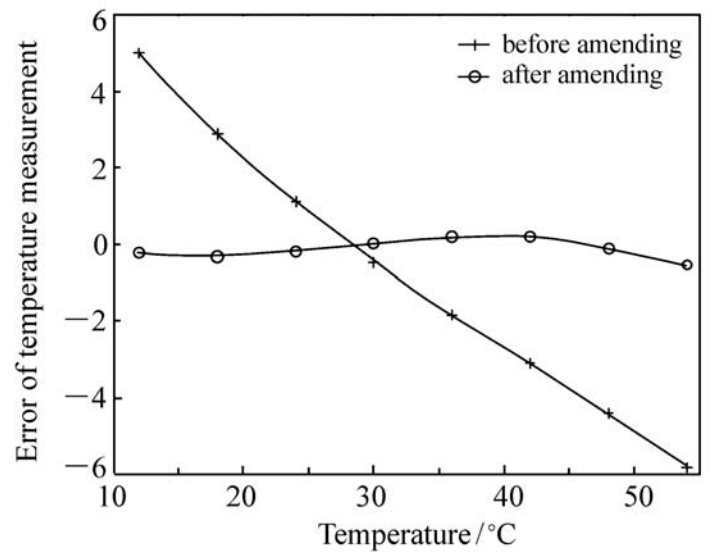


图 3 补偿前、后测量误差曲线

Fig. 3 Error curves before and after amendings

而当目标温度低于或高于环境温度, 与环境温度温差越大时, 测温误差也越大。经过环境影响修正后, 测温误差在误差为零的横轴上下跳动且较稳定; 经计算, 环境影响修正前后的测温均方根误差分别为 3.56 和 0.27, 测温精度得到了明显的提高。

## 6 结 论

本文基于中波红外探测器的测温进行了理论及实验研究, 并在实验室以黑体为目标进行了测温实验, 实验结果表明, 经过环境影响修正后的测温精度得到了显著的提高, 证明了本文中环境影响的修正方法是准确可行的, 为提高中波红外系统测温精度提供了重要的参考依据。

- H, WEI Y F. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. ( in Chinese)
- [5] 范纪红, 侯西旗, 杨照金. 红外探测器光谱响应度测试技术研究[ J]. 应用光学, 2006, 27( 5) : 461-462.  
FAN J H, HOU X Q, YANG ZH J. Technology research of infrared detector s spectrum response[ J]. *Appl. Opt.*, 2006, 27( 5) : 461-462. ( in Chinese)
- [6] 邢强林. 红外焦平面成像探测辐射特性测量标定方法研究[ J]. 飞行器测控学报, 2007, 26( 4) : 68-71.  
XING Q L. Calibration for FPA infrared radiation measuring system[ J]. *J. Spacecraft TT&C Technol.*, 2007, 26( 4) : 68-71. ( 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 in infrared temperature measurement[ J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3( 4) : 391-396. ( in Chinese)
- [8] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究[ J]. 光学 精密工程, 1998, 6( 4) : 35-43.  
WU H P. Research into theoretical calculation method on engineering of transmittance of infrared radiation through atmosphere[ J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6( 4) : 35-43. ( in Chinese)
- [9] 李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[ J]. 光学 精密工程, 2007, 15( 9) : 1336-1341.  
LI Y H, SUN X G, YUAN G B. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager[ J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15( 9) : 1336-1341. ( in Chinese)
- [10] 胡剑虹, 宁飞, 沈湘衡, 等. 目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响[ J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3( 2) : 152-156.  
HU J H, NING F, SHEN X H, *et al.*. Influence of surface emissivity of objects on measuring accuracy of infrared thermal imagers[ J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3( 2) : 152-156. ( in Chinese)

作者简介: 孙志远( 1982—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 副研究员, 主要从事红外辐射特性测量、红外系统设计方面的研究。

E-mail: zhiyuansun1982@ yahoo. com. cn