

红外辐射特性测量中环境影响的修正研究

孙志远, 朱 玮, 乔彦峰, 沈铨武

(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: 红外辐射特性测量是导弹预警和识别的主要手段, 相关研究具有较大的军事应用价值。而红外辐射特性测量过程中的环境影响修正一直是影响测量精度的难点。介绍了通过放置在目标附近的大面源灰体修正环境影响的方法, 经过理论分析及实验验证, 发现“黑体标定曲线”和“参考曲线”相交于环境温度点, 并且根据这两个曲线可计算出环境影响的斜率修正系数和偏置修正系数, 对目标的灰度值进行相应的修正就可以准确地计算出目标的温度等红外辐射特性。

关键词: 红外辐射特性; 环境修正; 大面源灰体

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

Atmosphere amending research in infrared radiation characteristic measurement

SUN Zhi-yuan, ZHU Wei, QIAO Yan-feng, SHEN Cheng-wu

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

Abstract: Infrared radiation characteristics measurement is the main method for the precaution and discrimination of missiles, relevant research is worthy in military application. And the atmosphere amending is a difficulty which influences precision in infrared radiation characteristic measurement. The method amending atmosphere influence is introduced, which places large area gray body beside the target. After academic analysis and experiment research, it is found that the “black body demarcation curve” and “reference curve” intersect at the atmosphere temperature point, and the slope amending coefficient and offset amending coefficient could be calculated based this two curve. After corresponding amending on target gray, the infrared radiation characteristics could be calculated by rule and line.

Key words: infrared radiation characteristic; atmosphere amending; large area gray body

1 引言

目标红外辐射特性的测量对于红外系统的应用具有重要作用, 但是红外辐射信号在大气中传输受到大气的衰减, 同时大气或太阳的辐射又会构成一定的背景辐射, 对辐射测量及系统应用的准确性带来一定的影响。目前已发展了 10 余种大气辐射传输数值的计算方法, 如 LOWTRAN 及 MODTRAN 等多种软件, 并在大气修正中得到广泛应用。但由于环境影响因素较多, 所以使用以上软件获得的参数与实际外场情况仍有较大差异, 本文提出了一种使用大面源灰体修正环境影响的

方法。

2 基于红外探测器的测温模型建立

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 1 所示。

通过理论推导得到, 表面温度为 T , 发射率为 $\varepsilon(\lambda, T)$ 的扩展源在红外探测器像面上形成的红外图像灰度值可以表示为^[1]:

作者简介: 孙志远(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事红外辐射特性测量研究。E-mail: zhiyuansun1982@yahoo.com.cn

收稿日期: 2009-08-18

$$h = G \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot E'(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \tau_{opt} \cdot \tau_{air} \cdot G \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot M(\lambda, T) \cdot d\lambda \quad (1)$$

式中, G 为系统增益; $R(\lambda)$ 为红外探测器的光谱响应率; $E'(\lambda, T)$ 为像元的辐射照度; D/f 为系统的相对孔径; τ_{opt} 和 τ_{air} 分别为光学系统的透过率和大气透过率; $M(\lambda, T)$ 为目标的辐射出射度。

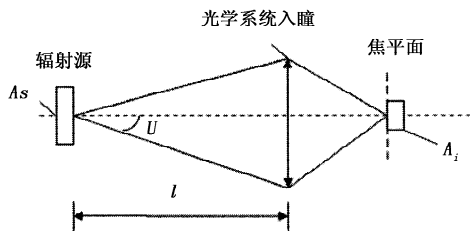


图1 目标通过红外光学系统成像时的物像关系

3 杂散辐射能概述

公式(1)是在理想的环境条件下推导得到的, 实际测量时, 红外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, 目标和红外相机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2所示。

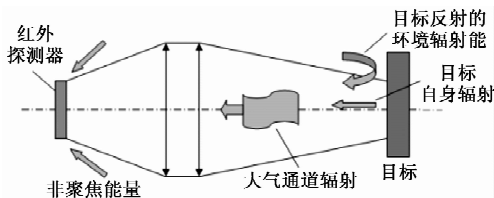


图2 杂散辐射影响

下面详细介绍三种杂散辐射能:

(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。可以用如下公式表示^[2-3]:

$$M_{反射} = \rho(\lambda) \cdot M_b(T_{sur}) = (1 - \varepsilon(\lambda)) \cdot M_b(T_{sur}) \quad (2)$$

式中, $M_b(T) = \sigma \cdot T^4$ 为目标的全波段辐射能; T_{sur} 为环境温度; $\rho(\lambda)$ 为目标的反射率。

(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。

$$M_{大气通道} = (1 - \tau(\lambda)) \cdot M_b(T_{atm}) \quad (3)$$

式中, $\tau(\lambda)$ 为目标与镜头之间的大气透过率; T_{atm} 为大气的温度。当目标处在一个温度稳定的空间内时, 可以认为 $T_{atm} = T_{sur}$ 。

(3) 相机内部的非聚焦能量: 由于光学系统的冷栏效率没有达到 100%, 所以相机内壁会有一部

分辐射能量会通过冷栏而叠加在探测器上, 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。

4 环境影响的修正

根据以上分析, 必须对目标像元的灰度值进行杂散辐射和大气吸收(统称为环境影响)的修正后, 才能准确地计算目标的辐射特性, 下面通过公式推导环境影响的修正方法。假设探测器的波段范围为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$, 并定义:

$$M_t = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (4)$$

4.1 修正方法

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。即:

$$h = C_{Eh} \cdot E' \quad (5)$$

式中, C_{Eh} 为常数。

对于表面温度为 T_0 , 发射率为 ε 的目标, 探测器像元的灰度值可以表示为:

$$h_{目标} = C_{Eh} \cdot \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot (\tau_{air} \cdot \tau_{opt} \cdot \varepsilon \cdot M_t(T_0) + \tau_{opt} \cdot M_{大气} + \tau_{air} \cdot \tau_{opt} \cdot \Delta M_{反射}) + \Delta M_{非聚焦} \right] = U_1 \cdot M_t(T_0) + V_1 \quad (6)$$

式中, $U_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot C_{Eh} \cdot \tau_{air} \cdot \tau_{opt} \cdot \varepsilon$, $V_1 = C_{Eh} \cdot \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot (\tau_{opt} \cdot \Delta M_{大气} + \tau_{air} \cdot \tau_{opt} \cdot \Delta M_{反射}) + \Delta M_{非聚焦} \right]$ 。

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:

$$h_{黑体} = C_{Eh} \cdot \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \tau_{opt} \cdot M_t(T_0) + \Delta M_{非聚焦} \right] = U_2 \cdot M_t(T_0) + V_2 \quad (7)$$

式中, $U_2 = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot C_{Eh} \cdot \tau_{opt}$, $V_2 = C_{Eh} \cdot \Delta M_{非聚焦}$

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:

$$\Delta M_{大气} = (1 - \tau_{air}) \cdot M_t(T_{atm}) = (1 - \tau_{air}) \cdot M_t(T_{sur}) \quad (8)$$

$$\Delta M_{反射} = (1 - \varepsilon) \cdot M_t(T_{sur}) \quad (9)$$

则:

$$\begin{aligned}
& h_{\text{目标}} - h_{\text{黑体}} = \\
& C_{Eh} \cdot \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 (\tau_{\text{air}} \cdot \tau_{\text{opt}} \cdot \varepsilon \cdot M_l(T_0) + \tau_{\text{opt}} \cdot M_{\text{大气}} + \right. \\
& \left. \tau_{\text{air}} \cdot \tau_{\text{opt}} \cdot \Delta M_{\text{反射}}) + \Delta M_{\text{非聚焦}} \right] - C_{Eh} \cdot \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cdot \right. \\
& \left. \tau_{\text{opt}} \cdot M_l(T_0) + \Delta M_{\text{非聚焦}} \right] = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cdot \tau_{\text{opt}} \cdot C_{Eh} \cdot \\
& [(1 - \tau_{\text{air}} \cdot \varepsilon) \cdot (M_l(T_{\text{sur}}) - M_l(T_0))] \quad (10)
\end{aligned}$$

定义标定过程得到的黑体温度和探测器像元灰度值之间的关系曲线为黑体标定曲线,定义目标温度和探测器像元灰度值之间的关系曲线为参考曲线,从上式可以看出黑体标定曲线和参考曲线相交于环境温度点。

又由于:

$$\frac{h_{\text{目标}} - V_1}{U_1} = \frac{h_{\text{目标}} - V_2}{U_2} \quad (11)$$

即:

$$\begin{aligned}
h_{\text{黑体}} &= U_2 \times \frac{h_{\text{目标}} - V_1}{U_1} + V_2 \\
&= \frac{U_2}{U_1} \times h_{\text{目标}} - \frac{U_2}{U_1} \times V_1 + V_2 \\
&= \frac{h_{\text{目标}}}{k} + b \quad (12)
\end{aligned}$$

式中, $k = \frac{U_2}{U_1} = \tau_{\text{air}} \cdot \varepsilon$, $b = V_2 - \frac{1}{k} \times V_1$ 。

因为两条曲线交于点常温点(T_0, h_0), 即:

$$h_0 = \frac{h_0}{k} + b \quad (13)$$

计算得到:

$$b = h_0 - \frac{h_0}{k} = \left(1 - \frac{1}{k}\right) \cdot h_0 \quad (14)$$

将 k 和 b 带入式(12), 得:

$$h_{\text{黑体}} = \frac{h_{\text{目标}}}{k} + b = \frac{h_{\text{目标}}}{\tau_{\text{air}} \cdot \varepsilon} + \left(1 - \frac{1}{\tau_{\text{air}} \cdot \varepsilon}\right) \cdot h_0 \quad (15)$$

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根据该像元的测量曲线准确地计算目标的表面温度值。从公式可以看出, 如果已知目标的表面发射率和大气透过率, 就可以准确地计算不同材料目标的表面温度值。

4.2 测温修正系数的获得方法

4.1.1 斜率修正系数的计算

斜率修正系数是大气透过率 τ_{air} 和目标表面发

射率的乘积:

$$k = \tau_{\text{air}} \cdot \varepsilon \quad (16)$$

通过在目标处放置一个已知发射率为 $\varepsilon_{\text{参考}}$ 的大面源灰体来计算该段距离处的大气透过率, 具体方法为: 设置灰体的温度分别为 T_1 和 T_2 , 灰体在红外图像上的像元坐标为 (x, y) , 对红外图像进行处理, 得到该像元相应温度 T_1 和 T_2 的灰度值分别为 h_1 和 h_2 ; 将黑体放置在镜头前, 设定黑体温度分别为 T_1 和 T_2 , 对红外图像进行处理, 得到像元 (x, y) 的灰度值分别为 h'_1 和 h'_2 。则该段大气的透过率可以表示为:

$$\tau_{\text{air}} = \frac{h'_2 - h'_1}{h_2 - h_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{\text{参考}}} \quad (17)$$

将大气透过率数值和目标的表面发射率带入式(16)就可以计算斜率修正系数 k 。

4.1.2 偏置修正系数

对于像元 (x, y) , 拟合得到标定曲线公式, 查询环境温度 T_0 对应的灰度值 h_0 , 根据下面公式就可以计算偏置修正系数 b :

$$b = \left(1 - \frac{1}{k}\right) \cdot h_0 \quad (18)$$

5 实验

5.1 黑体标定曲线和参考曲线的比较

将黑体放置在红外平行光管焦平面处进行实验, 平行光管由离轴反射镜组成, 平行光管的通光口径为 600 mm, 焦距为 6 m, 实验装置如图 3 所示, 图中黑体的辐射能通过离轴反射镜 1 和 2 后形成平行光, 由放置在平台上的红外相机接收。

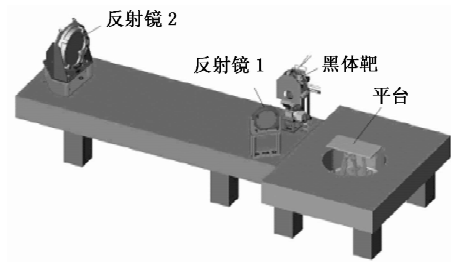


图3 平行光管示意图

实验具体过程如下:

(1) 将黑体放置在镜头前标定, 标定的温度范围为 $14 \sim 28 \text{ }^\circ\text{C}$, 标定间隔为 $2 \text{ }^\circ\text{C}$, 采集每个温度点的红外图像。

(2) 将黑体放置在平行光管焦平面处, 设定的黑体温度值与以上标定过程相同, 采集每个温度点的红外图像。

使用黑体附带的温度传感器测量环境温度, 在整个实验过程中, 环境温度保持在 $18.5 \sim 19.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

对以上数据进行处理,画出探测器中心像元放置在镜头前的标定曲线和放置在平行光管焦平面处的参考曲线,如图4所示。从图中可以看出,两条曲线交于常温点附近。实验结果与理论分析的结果相同。

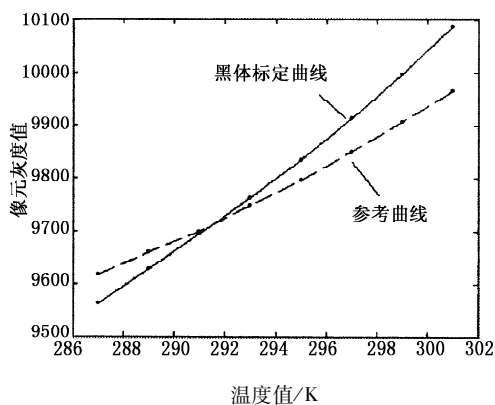


图4 镜头前标定曲线和平行光管焦平面处参考曲线

计算得到环境影响修正系数 k 和 b 的数值分别为 0.6689 和 -4810,根据这两个系数就可以根据公式计算公式(15)计算得到的灰度值计算目标的温度等红外辐射特性。

5.2 测温误差计算

将另一个大面阵黑体(作为目标进行测温实验)放置在平行光管的焦平面处,通过平行光管成像,设定大面阵黑体的温度值分别为 14 °C, 15 °C, 16 °C, ..., 28 °C,采集各温度点的红外图像,将14 ~ 28 °C,间隔 1 °C 的所有温度点的图像采集过程为一组,共循环测量 4 组,用时约 2 h。在目标图像上选择一点进行测温实验,分别计算未经修正和环境影

响修正后的测温误差,统计每一组测温误差的均方根值,单位为 °C,如表1所示。

表1 环境影响修正后和修正前测温误差的比较

单位/°C	第一组	第二组	第三组	第四组	平均值
未做修正	1.3985	1.8000	2.1897	2.4721	1.9651
环境影响修正	0.0962	0.0917	0.0792	0.1245	0.0979

从表中可以看出,经过环境影响修正后,测温误差小于 0.1 °C,测温精度得到了明显的提高。

6 结束语

本文使用大面源灰体对环境影响进行修正,在实验室取得了较好的效果。但与室内实验相比,室外环境变化的很快,所以修正存在一定的误差,对已进行的室外实验进行总结后发现,室外实验与室内实验得到的规律近似相同,但黑体标定曲线和参考曲线与环境温度的交点有误差。其中原因需要进一步的外场实验分析。

参考文献:

- [1] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,1999:70-71.
- [2] Stefan Datcu, Laurent Ibos, Yves Candau, et al. Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2005, 46:451-467.
- [3] 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.