

基于实时标校的目标红外辐射测量新方法

杨词银¹, 张建萍¹, 曹立华^{1,2}

(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. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要: 目标红外辐射特性测量是目标特征获取和识别的重要手段之一, 而大气透过率修正是大气中目标辐射测量必需的一个环节. 在传统的辐射测量方法中, 利用大气观测设备和大气辐射传输计算软件测量计算大气透过率及程辐射, 不确定度在 10~20% 左右, 而目标红外辐射反演精度在 12~23% 左右. 为提高辐射反演精度, 提出了一种新的辐射测量方法, 利用目标附近的参考黑体精确测量目标和红外系统之间的大气透过率, 并给出了大气透过率计算模型和目标红外辐射反演模型. 分析表明, 新方法的大气透过率测量不确定度约为 6~10.5%, 目标辐射反演精度优于 3.5%. 利用中波红外相机进行了目标红外辐射测量实验, 结果显示, 传统方法的目标辐射反演精度为 7.5~24.7%, 新方法为 0.1~3.4%. 新方法对于提高目标红外辐射反演精度具有重要意义.

关键词: 红外辐射; 大气透过率; 实时标校; 黑体; 辐射反演

中图分类号: TP732.2 **文献标识码:** A

Infrared radiation measurement based on real-time correction

YANG Ci-Yin¹, ZHANG Jian-Ping¹, CAO Li-Hua^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China;

2. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Infrared radiation measurement is one of the important ways for target signature acquirement and target recognition, wherein atmospheric correction is a requisite step for obtaining the real radiation of the target. In the conventional radiation measurement method, it is necessary to measure atmosphere parameters by using atmosphere observation devices, and calculate the atmospheric transmittance and the air path radiance from these parameters by using a atmospheric radiation transport calculation software. The uncertainty in the atmospheric transmittance obtained by the conventional method is about 10~20%, and the target radiation inversion precision is about 12~23%. To improve the radiation inversion precision, a novel radiation measurement method based on real-time correction was presented, which measured the atmospheric transmittance with high precision by using a reference blackbody near the target. Models for atmospheric transmittance calculation and target radiation inversion were proposed. Analysis showed that the uncertainty in the atmospheric transmittance obtained by the novel method is about 6~10.5%, and the radiation inversion precision obtained by the novel method is better than 3.5%. A radiation measurement was performed by using a MW infrared camera. The results showed that the radiation inversion precision of the conventional method is 7.5~24.7%, while that of the novel method is 0.1~3.4%. The novel method has an important significance for improving the target radiation inversion precision.

Key words: infrared radiation; atmospheric transmittance; real-time correction; blackbody; radiation inversion

PACS: 61.80.Ba

引言

近年来, 随着红外成像和红外探测技术的发展, 目标红外辐射特性已成为目标特性研究的一个重要方面. 目标红外辐射特性测量是获取目标特征、对目标进行识别的重要手段之一. 目标辐射温度、辐射亮度和辐射强度是识别判断的关键性参数, 它们集中

反映了目标物理特征. 如在导弹防御系统中, 利用弹道导弹在不同飞行段的红外辐射特性进行目标识别^[1~3].

目前, 目标红外辐射特性研究主要有仿真计算和辐射测量试验两种手段. 目标辐射仿真计算研究由于不受试验场地条件和成本限制, 而得到广泛应用, 但无法验证其准确性和有效性, 只能作为一种辅

助手段^[4]. 而辐射测量试验是获取目标真实辐射特性的直接手段,也是唯一手段^[5~8].

目标红外辐射特性测量的流程主要包括 3 个步骤: 红外测量系统的辐射定标; 目标测量; 以及目标辐射反演. 当在大气中对目标辐射特性进行测量时, 大气中的分子和气溶胶粒子对目标辐射产生吸收和散射衰减, 同时大气自身辐射又叠加到目标辐射上. 因此, 为获得目标本征辐射信号, 需要同时获得测量系统与目标之间的大气透过率及程辐射数据, 以便在目标辐射反演过程中对目标数据进行大气修正. 如殷晓斌等^[6]在海表面温度红外测量中, 魏合理等^[7]以及 ENGEL Michael 等^[8]在空中目标辐射测量中, 韩玉阁等^[9]在目标与背景红外辐射特性研究中, 都考虑了大气透过率和路径辐射对目标辐射的影响.

常用的大气透过率测量方法是利用激光雷达、太阳辐射计、地面气象站等大气观测设备测量大气参数, 然后提供给大气辐射传输计算软件如 MODTRAN 软件, 来计算测量系统与目标之间的大气透过率和程辐射. 根据文献[7, 8], 大气透过率测量精度一般在 10 ~ 20% 左右, 气象条件比较恶劣的情况下甚至达到 30% 以上. 由此造成目标辐射特性测量精度在 10 ~ 30% 左右.

由以上分析可知, 大气透过率成为限制目标辐射特性测量精度的最重要因素. 本文利用位于目标附近的参考黑体测量计算目标与红外系统之间的大气透过率, 对目标辐射反演进行实时标校, 由此提高大气透过率和目标辐射测量精度.

1 传统目标辐射测量方法

红外辐射测量系统对目标进行测量时, 在系统线性响应范围内系统输出信号与目标辐亮度具有线性关系. 目标辐射测量模型为:

$$DN = \alpha \cdot [\tau_a L_t + L_{path}] + DN_0 \quad (1)$$

式(1)中, DN 为红外测量系统探测器的数码输出值, α 为红外测量系统的辐亮度响应度, L_t 为被测目标辐亮度, τ_a 为目标与红外测量系统之间的测量波段内平均大气透过率, L_{path} 为目标与红外测量系统之间的大气程辐射. DN_0 是由红外测量系统自身光机结构热辐射、散射背景辐射以及探测器暗电流引起的偏移值.

由式(1)可反演得到目标辐亮度

$$L_t = \frac{\left(\frac{DN - DN_0}{\alpha} - L_{path} \right)}{\tau_a} \quad (2)$$

其中, 系统辐亮度响应度 α 和数码偏移值 DN_0 是事先通过对红外测量系统进行实验室辐射定标获得的值. 在传统的目标辐射特性测量方法中, 利用大气观测设备测量气溶胶消光高度分布廓线、地面能见度、大气温湿压高度分布廓线等大气参数, 然后输入到大气辐射传输计算软件如 MODTRAN 软件中, 以计算目标与测量系统之间的大气透过率 τ_a 和程辐射 L_{path} .

由式(2)可知, 目标辐亮度 L_t 的反演精度主要取决于系统输出值 DN 、偏移值 DN_0 、辐亮度响应度 α 以及程辐射 L_{path} 和大气透过率 τ_a 的不确定度, 分析如下:

1) 在当前红外成像技术水平下, 红外系统输出值 DN 的不确定度一般优于 1%, 对反演精度影响很小;

2) 在严格控制辐射定标环境条件的情况下, 可以将辐亮度响应度 α 的不确定度控制在 5 ~ 10% 左右^[10];

3) 偏移值 DN_0 的不确定度取决于系统自身热稳定性以及环境温度稳定性, 如果在 20℃ 常温下进行定标, 则 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的环境温度稳定性带来的 DN_0 不确定度为 2%;

4) 大气透过率 τ_a 和程辐射 L_{path} 的不确定度取决于大气参数的测量精度, 以及大气辐射传输计算软件的计算精度. 根据文献[7, 8], 在当前技术水平下在 10 ~ 20% 左右(受天气条件和路径条件影响).

根据以上分析, 目标辐亮度反演精度在 12 ~ 23% 左右. 其中, 对目标辐射反演精度影响最大的因素是大气透过率测量精度. 为此, 本文利用参考黑体对目标与红外测量系统之间的大气透过率进行高精度测量, 进而提高目标辐射反演精度.

2 基于实时标校的红外辐射测量方法

基于实时标校的红外辐射测量方法原理如图 1 所示. 在被测目标附近放置一参考黑体, 且参考黑体和目标相对于测量系统具有相同或相近的距离和方向. 当红外测量系统测量目标的红外辐射特性时, 同时对参考黑体进行测量.

将黑体设置在低工作温度 T_L 下, 红外测量系统对黑体测量得到输出值 DN_L . 然后将黑体设置在高工作温度 T_H 下, 红外测量系统对黑体测量得到输出值 DN_H . 红外测量系统对目标测量得到的输出值为 DN_t . 根据式(1)辐射测量模型, 有

$$DN_H = \alpha \cdot [\tau_a L_H + L_{path}] + DN_0 \quad (3)$$

$$DN_L = \alpha \cdot [\tau_a L_L + L_{path}] + DN_0 \quad (4)$$

$$DN_t = \alpha \cdot [\tau_a L_t + L_{path}] + DN_0 \quad (5)$$



图1 基于实时标校的辐射测量方法原理

Fig.1 Method of radiation measurement based on real-time radiation correction

其中 α 为红外测量系统的辐亮度响应度, L_H 为高温黑体辐亮度, L_L 为低温黑体辐亮度; L_t 为目标辐亮度; τ_a 为红外测量系统与黑体(或目标)之间的大气透过率; L_{path} 为红外测量系统与黑体(或目标)之间的大气程辐射; DN_0 是由红外测量系统自身光机结构热辐射、散射背景辐射以及探测器暗电流引起的偏移值。

由式(3)~(5)可解得

$$\tau_a = \frac{DN_H - DN_L}{\alpha(L_H - L_L)} \quad (6)$$

$$L_t = \frac{L_H - L_L}{DN_H - DN_L} (DN_t - DN_L) + L_L \quad (7)$$

由式(6)可知,大气透过率 τ_a 的精度取决于 DN_H 、 DN_L 、 α 、 L_H 和 L_L 的不确定度。在当前红外成像技术下, DN_H 和 DN_L 的不确定度均能达到优于1%。在目前常规黑体制造水平下,黑体辐亮度 L_H 和 L_L 的不确定度可优于2%。在严格控制辐射定标环境的情况下,辐亮度响应度 α 的不确定度为5~10%^[10]。从而 τ_a 的不确定度在6~10.5%左右,小于利用大气观测设备测量大气透过率的不确定度。

同样,由式(7)可知,目标辐亮度 L_t 的反演精度取决于系统输出值 DN_H 、 DN_L 、 DN_t 和黑体辐亮度 L_H 和 L_L 的不确定度。由上面分析可知, DN_H 、 DN_L 、 DN_t 的不确定度优于1%, L_H 和 L_L 的不确定度优于2%。从而,目标辐亮度反演精度优于3.5%,优于式(2)的传统方法辐射反演精度。

由以上分析可知,无论是大气透过率测量精度,还是目标辐射反演精度,本文方法均优于传统的目标红外辐射测量方法。

3 辐射测量实验

为了验证本文方法的有效性,利用某一中波红外相机进行目标红外辐射测量实验。该相机如图2所示,参数如下:测量波段3.7~4.8 μm ,探测器像元大小15 μm ,输出位数14位,相机镜头口径 $\phi 80\text{mm}$,焦距160mm。



图2 中波红外相机定标示意图

Fig.2 Schematic diagram of radiation calibration of the MW IR camera

参考黑体及被测目标都采用美国 ISDC IR150 型面源黑体,如图2所示。黑体参数如下:口径300mm × 300mm,温度范围25~500℃,发射率0.97,温度精度0.5%。实验过程如下。

3.1 实验室辐射定标

首先,在实验室利用 ISDC 300mm × 300mm 口径黑体对该中波红外相机进行辐射标定,如图2所示。辐射定标模型为

$$DN = \alpha \cdot L + DN_0 \quad (8)$$

其中, DN 为相机输出值, α 为待标定的相机辐亮度响应度, L 为黑体在相机测量波段(3.7~4.8 μm)内的辐亮度, DN_0 是由相机自身光机结构热辐射、散射背景辐射以及探测器暗电流引起的偏移值。黑体辐亮度 L 通过普朗克公式计算

$$L = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda \quad (9)$$

式(9)中, $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为相机测量波段, ε 为黑体发射率, T 为黑体工作温度(K), $C_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4)$, $C_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$ 。

图3给出了该相机在2ms积分时间下的定标结果,其中横坐标代表黑体辐亮度 $L (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$,纵坐标代表相机输出值 DN 。根据式(8),利用最小二乘法对定标结果进行线性拟合,得到该相机辐亮度响应关系为

$$DN = 1466.9 \times L + 2530 \quad (10)$$

3.2 大气透过率测量

然后,利用 ISDC 面源黑体作为参考黑体,进行大气透过率测量。实验时能见度为8km,用温湿度仪测得大气温度为-2℃,相对湿度45%。将黑体放置在某一办公楼窗户前,并将中波红外相机置于黑体正前方约450m远处,相机积分时间设为2ms。将黑体分别设定在低工作温度 $T_L (55^\circ\text{C})$ 和高工作温度

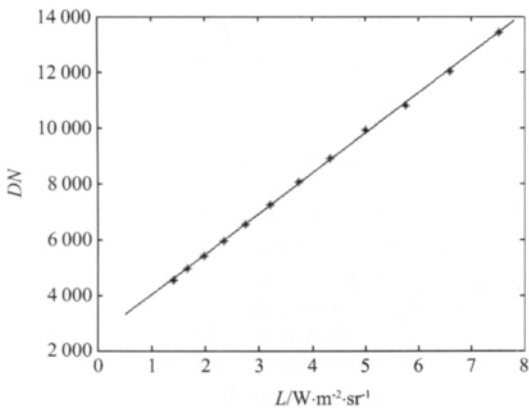


图3 中波红外相机定标结果,积分时间 = 2ms
Fig. 3 Results of radiation calibration for the MW IR camera, integrated time = 2ms



图4 55℃黑体测量图
Fig. 4 Measurement image of the blackbody at 55℃



图5 85℃黑体测量图
Fig. 5 Measurement image of the blackbody at 85℃

$T_H(85^{\circ}\text{C})$ 下,并利用相机对黑体进行测量,分别得到测量值 DN_L 和 DN_H . 图4和图5分别给出了 55°C 和 85°C 黑体的测量图像.

然后 根据式(6) 计算红外相机与黑体之间的大气透过率 τ_a . 表1给出了 55°C 、 85°C 黑体的辐亮度 L_L 、 L_H 对应的相机测量值 DN_L 、 DN_H 以及由此计算得到的大气透过率 τ_a . 其中 黑体发射率 $\varepsilon = 0.97$.

表1 由 55°C 和 85°C 黑体测量值计算的大气透过率
Table 1 Atmosphere transmittance τ_a calculated from measurement values of the blackbody at 55°C and 85°C

a	DN_H	DN_L	$L_H/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	$L_L/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	τ_a
1466.9	9736	5520	7.284	3.122	0.69

表2 利用本文方法由目标测量值反演的被测黑体目标的辐亮度和辐射温度
Table 2 Radiances and temperatures of the blackbody calculated from camera measurement values using the proposed method

目标测量值	目标真实温度($^{\circ}\text{C}$)	反演的温度($^{\circ}\text{C}$)	目标真实辐亮度($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	反演的辐亮度($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	辐亮度反演误差(%)
4243	40	39.0	1.927	1.861	3.4
4588	45	44.1	2.274	2.202	3.2
4983	50	49.1	2.671	2.592	3.0
6080	60	60.4	3.633	3.675	1.2
6605	65	64.9	4.210	4.193	0.4
7262	70	69.9	4.856	4.842	0.3
8012	75	75.1	5.580	5.582	0.1
8819	80	79.9	6.387	6.379	0.2
10724	90	89.9	8.277	8.259	0.2
11835	95	94.9	9.375	9.356	0.2
12993	100	99.7	10.583	10.50	0.8

3.3 目标辐射测量及反演

最后,将 ISDC 面源黑体作为被测目标进行辐射测量. 将黑体设置在任意工作温度下,并记录温度值. 利用中波红外相机对黑体进行测量,得到对应测量值 DN_i .

A. 基于实时标校的辐射反演结果

根据式(7) 以及由 3.2 节得到的 DN_H 、 DN_L 、 L_H 、 L_L 值和目标测量值 DN_i ,来反演被测黑体目标的辐亮度 L_i 和温度 T_i .

表2 给出了利用本文方法由目标测量值反演得到的被测黑体目标的辐亮度和温度. 由表2 可知,最大辐射反演误差为 3.4%. 当被测黑体温度高于 60°C 时,辐射反演误差优于 1%.

B. 传统辐射反演法结果

根据式(2) 的传统辐射反演模型,要从目标测量值反演得到目标辐亮度 L_i ,需要测量和计算 τ_a 和 L_{path} 值. 大气参数及其它参数如下: 实验当地海拔高度 200m, 纬度为北纬 43.84° , 能见度 8km, 大气相对湿度 45%, 气温 -2°C , 水平路径上测量距离 450m. 利用 MODTRAN 软件中纬度冬季模型计算得到红外相机与黑体目标之间的大气透过率 τ_a 为 0.715, 程辐射 L_{path} 为 $0.13\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$.

根据目标测量值 DN_i 、相机辐亮度响应度 α 和

相机偏移值 DN_0 以及上面计算的 τ_a 和 L_{path} 值, 利用式(2) 计算目标辐亮度 L_t . 表 3 给出了利用传统辐射反演方法得到的目标辐亮度和温度.

表 3 利用传统方法由目标测量值反演的被测黑体目标辐亮度和辐射温度

Table 3 Radiance and temperatures of the blackbody calculated from camera measurement values using the conventional method

目标测量值	目标真实温度(℃)	反演的温度(℃)	目标真实辐亮度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)	反演的辐亮度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)	辐亮度反演误差(%)
4243	40	31.8	1.927	1.451	24.7
4588	45	37.7	2.274	1.780	21.7
4983	50	43.4	2.671	2.157	19.2
6080	60	54.0	3.633	3.203	11.8
6605	65	60.7	4.210	3.703	12
7262	70	66.0	4.856	4.330	10.8
8012	75	71.4	5.580	5.045	9.6
8819	80	76.6	6.387	5.814	9.0
10724	90	87.0	8.277	7.630	7.8
11835	95	92.0	9.375	8.690	7.3
12993	100	96.8	10.583	9.794	7.5

对比表 2 和表 3 结果可知: 基于实时标校的辐射测量方法的精度远高于传统方法. 另外, 目标温度或辐亮度的增大有利于提高辐射反演精度.

4 结语

大气透过率测量是目标辐射特性测量中的一个关键环节, 其测量精度在很大程度上决定了目标辐射反演精度. 传统的大气透过率测量方法由于受大气参数观测设备和大气辐射传输计算软件精度的限制, 而精度较低. 本文方法利用位于目标附近的参考黑体, 实现对目标与红外系统之间大气透过率的高精度测量, 大气透过率测量精度达到与红外系统辐射定标精度相近的水平, 进而可提高目标辐射特性反演精度. 借助于中波红外相机和 ISDC 面源黑体的目标辐射特性测量实验也表明了, 本文方法的目标辐射测量精度相比传统方法得到了大幅提高.

本文方法具有较好应用前景. 例如, 地基或空基红外测量系统对地面和空中目标进行测量时, 可在目标附近放置参考黑体, 从而可利用本文方法实现对目标的高精度辐射测量. 另外, 在工业检测领域中, 通过在易发生故障且不易接近的工业设备附近

预先安装黑体, 利用本文方法可对其辐射特性如温度分布进行高精度测量, 进而实现设备故障可靠诊断.

REFERENCES

- [1] ZHANG Guang-Ming, SUN Sheng-Li, ZHANG Wei, et al. Model and application of image plane illumination for the space-based infrared detecting of boost-phase missile [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张光明, 孙胜利, 张伟, 等. 导弹助推段天基红外探测的像面照度模型及其应用. 红外与毫米波学报) 2007 **26** (6): 425—428.
- [2] LIN Liang-Kui, XIE Kai, XU Hui, et al. Research on infrared imaging simulation of midcourse ballistic object target complex [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (林两魁, 谢恺, 徐晖, 等. 中段弹道目标群的红外成像仿真研究. 红外与毫米波学报) 2009 **28** (3): 218—223.
- [3] WU Xia, ZHOU Yan, CUI Jian, et al. Analyses on infrared optoelectric recognition technology in missile defense system [J]. *Infrared and Laser Engineering* (吴瑕, 周焰, 崔建, 等. 导弹防御系统中红外光电识别技术分析. 红外与激光工程) 2009 **38** (5): 759—766.
- [4] LI Yan-Zhi, SUN Bo, WANG Da-Hui. Building Model of Aeroplane Infrared Radiant and Simulation [J]. *Infrared Technology* (李彦志, 孙波, 王大辉. 飞机红外辐射建模与仿真. 红外技术) 2008 **30** (5): 252—255.
- [5] LIU De-Cheng, ZHANG Guo-Ying. Flight test measurement of infrared radiation characteristics of an airplane [J]. *Flight Test* (刘德成, 张国英. 飞机红外辐射特性飞行试验测量. 飞行试验) 2003 **19** (2): 22—26.
- [6] YIN Xiao-Bin, LIU Yu-Guang, WANG Zhen-Zhan, et al. Comparison between infrared and microwave radiometers for retrieving the sea surface temperature [J]. *Marine Science Bulletin* (殷晓斌, 刘玉光, 王振占, 等. 红外和微波辐射计反演海表面温度的比较. 海洋通报) 2007 **26** (5): 3—10.
- [7] WEI He-li, CHEN Xiu-hong, ZHAN Jie, et al. Atmospheric correction in the measurement of infrared radiance [J]. *Journal of atmosphere and environmental optics* (魏合理, 陈秀红, 詹杰, 等. 红外辐射测量的大气修正. 大气与环境光学学报) 2007 **2** (6): 472—478.
- [8] ENGEL M, BALFOUR L S. Quantitative evaluation of errors in remote measurements using of Thermal Imager [C]. *SPIE* 1990 **1442**: 298—307.
- [9] HAN Yu-Ge, XUAN Yi-Min. Effect of atmosphere transmission on IR radiation feature of target and background [J]. *Applied Optics* (韩玉阁, 宣益民. 大气传输特性对目标与背景红外辐射特性的影响. 应用光学) 2002 **23** (6): 8—11.
- [10] LI Xian-Sheng, REN Jian-Wei, ZHANG Li-Guo, et al. Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electrics system on spot [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (李宪圣, 任建伟, 张立国, 等. 大口径红外光电系统现场辐射定标装置的研究. 光电子激光) 2006 **17** (2): 175—178.