

# 基于大气修正的目标红外辐射测量

杨词银<sup>1</sup>, 张建萍<sup>1</sup>, 郭立红<sup>1</sup>, 曹立华<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2.长春理工大学 理学院, 长春 130022)

**摘要:** 目标红外辐射测量是目标特性获取和目标识别的重要手段之一。在大气中测量目标辐射特性时, 需要考虑目标与红外测量系统之间的大气透过率和程辐射。建立了大气中目标辐射测量模型, 分析了辐射测量精度。利用长波红外相机对 ISDC 黑体进行了红外辐射测量实验, 并利用 MODTRAN 软件计算大气透过率和程辐射, 对测量数据进行大气修正。实验结果显示, 目标辐射反演精度在 9.5% ~ 12.3% 左右。

**关键词:** 红外辐射; 大气透过率; 辐亮度; 红外相机; 黑体

中图分类号: TP732.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870 (2010) 04-0001-03

## Infrared Signature Measurement of Targets Based on Atmospheric Correction

YANG Ciyin<sup>1</sup>, ZHANG Jianping<sup>1</sup>, GUO Lihong<sup>1</sup>, CAO Lihua<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract:** Infrared radiation signature measurement of targets is one of important ways for target signature acquirement and target recognition. When measuring the infrared signature of a target in the atmosphere, it is necessary to consider the atmospheric transmittance and the air path radiation between the target and the IR measurement system. A model for target radiation measurement and inversion was established, and precision analysis on the model was given. A longwave infrared camera was used to perform infrared signature measurement experiment on an ISDC extended-area blackbody. Based on atmospheric parameters, the atmospheric transmittance and the air path radiation between the blackbody target and the camera were calculated by using the MODTRAN software, for the use in atmospheric correction in the target radiation inversion process. The experimental results showed that radiation inversion precisions were about 9.5%~12.3%.

**Key words:** IR radiation; atmospheric transmittance; radiance; IR camera; blackbody

随着红外成像和红外探测技术的发展, 目标红外辐射特性测量已成为国内外重要的研究方向, 它是获取目标特征、对目标进行识别的重要手段之一。目标辐射特性测量可为目标识别提供重要的特征信息, 包括目标辐射亮度、辐射强度及辐射谱特征等重要参数, 同时可为目标探测与识别设备的波段优化设计和探测能力分析提供依据。世界强国尤其是美国对目标与环境辐射特性测量极为重视, 建立了基于地基、空基、天基的平台, 覆盖了从紫外到长波红外波段的复杂辐射特性测量体系<sup>[1-4]</sup>。

目标红外辐射特性测量主要包括三个步骤: (1) 在实验室标定红外测量系统, 以确定红外系统的辐射响应度, 即系统输入辐射量与输出信号值之间的关系; (2) 利用红外系统对目标进行测量, 得到目标测量数据, 同时利用大气观测设备和大气辐射传输计算软件获得大气透过率和大气程辐射数据; (3) 根据红外系统的辐射响应度以及大气透过率等数据, 从目标测量数据反演得到目标红外辐射特性。

在此, 对一种长波红外相机进行了辐射定标, 并利用该相机进行了目标红外辐射测量实验, 给出

收稿日期: 2010-07-22

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目

作者简介: 杨词银 (1975-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事辐射定标、辐射测量的研究, E-mail: yangciyin@163.com。

了实验结果。

## 1 相机辐射定标

在利用红外相机测量目标辐射特性之前,需要先对相机进行辐射定标,以确定其辐射响应度。在此,采用美国 ISDC IR150 型面源黑体作为标准红外辐射源对长波红外相机进行辐射定标。相机辐射定标模型如下:

$$DN = \alpha \cdot L + DN_0 \quad (1)$$

其中 DN 为相机输出值,  $\alpha$  为待标定的相机辐亮度响应度,  $L$  为黑体在相机测量波段( $8\mu\text{m} \sim 9.2\mu\text{m}$ )内的辐亮度,  $DN_0$  是由相机自身光子结构热辐射、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

$$L = \frac{C_1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_2 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda \quad (2)$$

式(2)中,  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  为相机测量波段,  $\varepsilon$  为黑体发射率,  $T$  为黑体工作温度(K),  $C_1$  为第一辐射常数,  $C_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4)$ ,  $C_2$  为第二辐射常数,  $C_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$ 。

表1给出了长波红外相机的技术参数,表2给出了 ISDC IR150 黑体的技术参数。

表1 长波红外相机的技术参数

Tab.1 Technical parameters of the LW IR camera

参数	值
工作波段	$8\mu\text{m} \sim 9.2\mu\text{m}$
探测器单元尺寸	$25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$
相机输出值位数	16 位
相机镜头口径	$\Phi 180\text{mm}$

表2 ISDC IR150 黑体的技术参数

Tab.2 Technical parameters of the ISDC IR150 blackbody

参数	值
辐射面积	$300\text{mm} \times 300\text{mm}$
工作温度范围	环境温度 $\sim 50$
发射率	0.97
温度分辨率	0.1
温度精度	$\pm 0.2 \pm 1\text{digit}$
温度稳定性	0.2

图1给出了该相机的辐射定标结果,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(2),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

$$DN = 925.5 \cdot L + 5174 \quad (3)$$

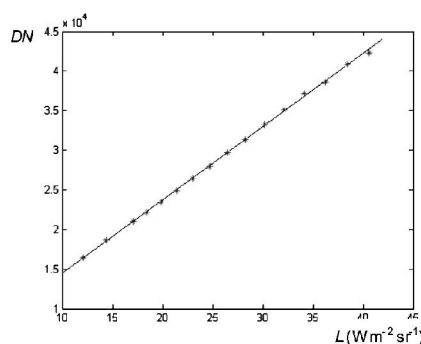


图1 长波红外相机辐射定标结果

Fig.1 Calibration results for the LW IR camera

## 2 辐射测量模型

当在大气中对测量目标辐射特性时,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。大气中的目标辐射测量模型为:

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

式(4)中, DN 为红外相机的数码输出值,  $\alpha$  为相机辐亮度响应度,  $L_t$  为被测目标的辐亮度,  $DN_0$  是由相机自身光子结构热辐射、散射背景辐射以及探测器暗电流引起的偏移值。  $\tau_a$  为目标与红外相机之间的大气透过率,  $L_{path}$  为目标与相机之间的大气程辐射,一般可利用大气观测设备测量大气参数,然后用大气辐射传输计算软件如 MODTRAN 计算  $\tau_a$  和  $L_{path}$ 。

由式(4)可反演得到目标辐亮度

$$L_t = \left( \frac{DN - DN_0}{\alpha} - L_{path} \right) / \tau_a \quad (5)$$

由式(5)可知,目标辐亮度  $L_t$  的反演精度取决于系统输出值 DN、偏移值  $DN_0$ 、辐亮度响应度  $\alpha$  以及大气透过率  $\tau_a$  和程辐射  $L_{path}$  的不确定度,分析如下:

1. 在当前红外成像技术水平下,红外相机输出值 DN 的不确定度一般优于 1%;

2. 辐亮度响应度  $\alpha$  的不确定度一般可控制在 5% ~ 10%<sup>[5]</sup>;

3. 偏移值  $DN_0$  的不确定度取决于相机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  $\pm 1$  的环境温度稳定性带来的  $DN_0$  不确定度约为 2%;

4. 大气透过率  $\tau_a$  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,一般为 10% ~ 20%<sup>[6]</sup>。

### 3 辐射测量实验

#### 3.1 大气透过率计算

将 ISDC IR150 黑体用作待测目标,长波红外相机与待测黑体在水平方向上相距 1.5km 对黑体进行辐射测量。根据式(5),为获得目标自身辐射特性,需要测量计算目标和红外相机之间的大气透过率和程辐射。表3给出了实验期间测量的大气参数和其它参数。

表3 实验期间的大气参数和其它参数

Tab.3 Atmospheric parameters and other parameters during experiment

参数	值
海拔高度	200m
测量距离	1.5km
能见度	15km
气温	10
相对湿度	38%

根据表3中的参数,利用 MODTRAN 软件按中纬度冬季节模型大气计算大气透过率和程辐射,计算结果如下:  $8\mu\text{m} \sim 9.2\mu\text{m}$  波段的平均大气透过率为 0.85,程辐射为  $0.93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

#### 3.2 目标测量及辐射反演

表4 长波红外相机的目标辐射反演结果

Tab.4 Results of target radiance inversion for the LW IR camera

目标测量值	目标真实温度(°C)	目标真实辐亮度( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	反演的目标辐亮度( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	反演误差(%)
16536	45	15.23	13.35	12.3
17520	50	16.52	14.60	11.6
19423	60	19.30	17.02	11.8
21642	70	22.35	19.84	11.2
24143	80	25.67	23.02	10.3
26842	90	29.26	26.45	9.6
29658	100	33.12	30.03	9.5

将 ISDC IR150 黑体作为待测目标设置在不同工作温度,并记录该温度值。然后利用长波红外相机在 1.5km 远处对黑体进行测量,得到测量值  $DN_i$ 。最后,根据式(5),利用相机辐亮度响应度  $\alpha$ 、偏移值  $DN_0$  以及大气透过率  $\tau_a$  和程辐射  $L_{path}$ ,由目标测量值  $DN_i$  反演目标辐亮度  $L_i$ 。表4给出了不同目标

温度下的目标辐射反演结果。

### 4 结论

利用长波红外相机以及黑体目标,在大气环境下进行了目标红外辐射测量实验。由以上分析可知,影响目标辐射测量精度的主要因素包括大气透过率测量精度以及红外相机辐射定标精度。为此,可采取以下措施来提高测量精度:

1.利用大气观测设备获取更详细的大气参数,如  $\text{CO}_2$  含量、大气压强、气溶胶粒子谱分布、气溶胶消光高度分布廓线、水汽含量高度分布廓线等,并采用高精度的大气辐射传输模型软件,如目前最精确的逐线积分辐射传输模型(LBLRTM),来计算大气透过率和程辐射。由此可将大气透过率和程辐射测量精度提高到 5%~15%。

2.如果条件允许,可在目标附近放置辐射亮度已知的标准黑体,借此测量红外相机与目标之间的大气透过率,可将大气透过率测量精度控制在 10% 以内。

3.利用单色红外平行光管(由黑体、红外单色仪和平行光管组成),对红外相机进行光谱定标,获得相机光谱响应函数,由此可将相机辐射定标精度提高到 3%~8%。

另外,目标红外辐射测量新方法和新技术的研究将是我们今后重点开展的工作。

#### 参考文献

- [1] 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[J].红外与毫米波学报,2007,26(6):425-428.
- [2] 吴瑕,周焰,崔建,等.导弹防御系统中红外光电识别技术分析[J].红外与激光工程,2009,38(5):759-766.
- [3] 陈杜,徐秀芳,刘银年,等.空间目标红外辐射谱测量技术研究[J].红外,2005(7):8-12.
- [4] 邢强林,谭谦,唐嘉.美国光学特性测量技术发展情况及特点[J].飞行器测控学报,2007,26(1):7-12.
- [5] 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[J].光电子激光,2006,17(2):175-178.
- [6] 魏合理,陈秀红,詹杰,等.红外辐射测量的大气修正[J].大气与环境光学学报,2007,2(6):472-478.