文章编号 1004-924X(2016)08-1871-07

利用大气修正因子提高目标红外辐射特性测量精度

郭立红[1],郭汉洲[1,2*],杨词银[1],李 宁[1]

(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.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:提出了利用大气修正因子修正大气透过率来提高测量目标红外辐射特性精度的方法。建立了目标红外辐射特性测量模型,给出了基于大气修正因子的目标红外辐射特性测量方法。该方法将短距离大气透过率实测结果和 MODTRAN 模拟计算的大气透过率之比定义为基础大气修正因子,然后依据长距离与短距离的不同数量关系得到增强大气修正因子,最后利用该因子对 MODTRAN 计算的长距离大气透过率进行修正并进行目标的辐射反演,从而获得目标辐射特性。对中波红外摄像机进行了定标,利用中波红外摄像机和面源黑体开展了目标红外辐射特性测量实验。实验结果表明,利用大气修正因子修正大气透过率的目标辐射测量方法得到的目标辐射特性测量精度在 8%左右,高于传统的利用 MODTRAN 计算方法得到的 20%的测量精度。得到的结果显示本文方法较传统方法较大程度地提高了目标辐射特性测量精度。

关 键 词:大气修正因子;大气透过率;红外摄像机;红外辐射特性测量;测量精度
中图分类号:TP732.2;TN215 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20162408.1871

Improvement of radiation measurement precision for target by using atmosphere-corrected coefficients

GUO Li-hong[1], GUO Han-zhou[1,2*], YANG Ci-yin[1], Li Ning[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanic and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: guohanzhou1@163.com*

Abstract: A method to improve the infrared radiation measurement precision of a target based on correcting atmospheric transmittance by using an atmosphere-corrected coefficient was proposed. A measuring model of infrared radiation characteristics for the target was established, and the measuring method of the infrared radiation characteristics for the target was given. The method defines the ratio between the really-measured atmospheric transmittance at a short distance and the calculated one by using MODTRAN as an atmosphere-corrected coefficient. Then, it obtains the enhanced atmosphere-corrected coefficient according to the different quantitative relationships between the short distance and other distance. Finally, it uses the enhanced atmosphere-corrected coefficient to correct the long

收稿日期:2015-12-07;**修订日期**:2016-02-01.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61205143)

distance atmospheric transmittance and to invert the radiation of the target, so that to obtain the radiation characteristics of the target. A middle wavelength infrared camera was calibrated and the measuring experiment of the infrared radiation characteristics for the target was carried out by the middle wavelength infrared camera and a black body. The results show that the radiation measurement precision obtained by using MODTRAN is about 20% and that obtained by the proposed method is about 8%. It demonstrates that the radiation measurement precision has improved greatly as comparing with that of the conventional method.

Key words: atmosphere-corrected coefficient; atmospheric transmittance; infrared camera; infrared radiation measurement; measurement precision

1 引　言

目标红外辐射特性测量可以提供目标辐射温度、辐射亮度、辐射强度和辐射谱特征等重要参数，从而为设备的目标探测与识别能力分析提供依据，所以是设计、论证、武器系统研制的重要环节[1]。无论是敌方目标的红外侦查和跟踪制导，还是我方目标的红外隐身和仿真，都需要目标红外辐射特性作为依据[2]，因此，测量和研究目标红外辐射特性是一项既基础又重要的工作[3-4]。

目标红外辐射特性的获取方法主要有仿真计算和实际测量。前者不受实验环境和成本的限制，得到了广泛应用，但是其有效性和准确性无法得到验证，只能作为辅助手段；后者是直接获取目标真实红外辐射特性的唯一手段，也是本文使用的测量方法[5]。

目标红外辐射特性的测量步骤如下：

(1)进行红外辐射特性测量系统的辐射定标，目的是确定红外辐射特性测量系统的辐射响应度；

(2)利用红外辐射特性测量系统测量目标，得到目标辐射特性数据，并获得当前大气环境的大气透过率和大气程辐射；

(3)根据辐射响应度、大气透过率和大气程辐射等数据反演计算得到被测量目标的红外辐射特性数据。

其中，大气透过率和大气程辐射是先通过大气观测设备得到一些大气参数，然后输入大气辐射传输计算软件计算得到的，精度一般为 20%左右，不过气象条件比较恶劣的情况下测量精度会下降 10%左右，由此导致目标红外辐射特性的测量精度在 20%～30%左右[6]。

本文将短距离实际测量的大气透过率和大气辐射传输计算软件计算的大气透过率之比定义为基础大气修正因子，依据长距离与短距离的不同数量关系改变基础大气修正因子得到增强大气修正因子，借此修正长距离的大气辐射传输计算软件计算的大气透过率，提高大气透过率的测量精度。然后利用长距离修正后的大气透过率校正目标的红外辐射特性测量数据，提高目标辐射特性的测量精度。

2 目标红外辐射特性测量模型

在测量目标红外辐射特性时，要考虑到测量系统和被测目标之间的大气影响。大气中的分子和气溶胶粒子等对来自目标的红外辐射进行散射和吸收，同时大气自身辐射也会与目标辐射相叠加。因此，目标的红外辐射测量模型为[7]：

$$DN=\alpha[\tau_a L_t+L_{path}]+DN_0, \tag{1}$$

式中：DN 为红外摄像机的测量输出值，α 为红外摄像机的辐亮度响应度，τ_a 为被测目标和红外摄像机之间的大气透过率，L_t 为被测目标的辐亮度，L_{path} 为被测目标与红外摄像机之间的大气程辐射，DN_0 是由红外摄像机自身热辐射和背景辐射等因素引起的偏置值。

根据式(1)进行辐射反演得到目标的辐亮度为：

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

式中：α 和 DN_0 是通过红外摄像机的辐射定标获

得的系统参数值；大气透过率 τ_a 和大气程辐射 L_{path} 是利用大气观测设备测量大气参数，然后输入到大气辐射传输计算软件中计算得到的。

根据式(2)可知，目标辐亮度 L_t 的反演精度取决于红外摄像机的测量输出值 DN、红外摄像机偏置值 DN_0、红外摄像机辐亮度响应度 α、大气程辐射 L_{path} 以及大气透过率 τ_a 的不确定度。根据前人在相关方面的研究和总结，不确定度分析如下：

(1)红外摄像机的测量输出值 DN 的不确定度优于 1%；

(2)红外摄像机偏置值 DN_0 在常温下的不确定度为 2%左右；

(3)红外摄像机辐亮度响应度 α 的不确定度一般可控制在 5%左右；

(4)大气程辐射 L_{path} 以及大气透过率 τ_a 的不确定度主要取决于大气参数的测量精度，一般在 20%左右。

由以上分析可知，目标红外辐射的测量精度在 22%左右，影响最大的因素为大气程辐射 L_{path} 以及大气透过率 τ_a。

3　利用大气修正因子的红外辐射特性测量方法

在距离红外摄像机 R_0 处设置一个黑体。将黑体分别设置在低工作温度 T_L 和高工作温度 T_H，利用红外摄像机分别测量两种温度下的黑体，得到测量输出值 DN_L 和 DN_H[8]：

$$DN_L=\alpha[\tau_{R_0}L_L+L_{R_0}]+DN_0, \tag{3}$$

$$DN_H=\alpha[\tau_{R_0}L_H+L_{R_0}]+DN_0, \tag{4}$$

其中：α 为红外摄像机的辐亮度响应度，τ_{R_a} 为被测黑体和红外摄像机之间的大气透过率，L_L 和 L_H 分别为低工作温度 T_L 和高工作温度 T_H 下的黑体辐亮度，L_{R_0} 为被测黑体与红外摄像机之间的大气程辐射，DN_0 是由红外摄像机自身热辐射和背景辐射等因素引起的偏置值。

根据式(3)和式(4)计算得到实际测量的大气透过率为：

$$\tau_{R_0}=\frac{DN_H-DN_L}{\alpha(L_H-L_L)}. \tag{5}$$

利用大气观测设备得到气温、气压、相对湿度等当前环境下的大气参数，输入到大气辐射传输计算软件得到距离 R_0 的理论大气透过率 τ'_{R_0}。由此可得基础大气修正因子 C_0：

$$C_0=\tau_{R_0}/\tau'_{R_0}. \tag{6}$$

根据式(6)进一步得到增强大气修正因子 C_H：

$$C_H=0.99^{[\log_2(R_H/R_0)+0.5]}\times C_0, \tag{7}$$

其中：R_H 为被测目标与红外摄像机之间的距离，[ ]表示取整。

在测量距离为 R_H 的目标时，先用大气辐射传输计算软件计算出当前大气环境条件下距离 R_H 的理论大气透过率 τ_{R_H}，再乘以增强大气修正因子，得到修正后的大气透过率 τ_{R_H}：

$$\tau_{R_H}=\tau'_{R_H}\times C_H. \tag{8}$$

由此利用式(2)进行辐射反演得到目标的辐亮度。根据式(5)，短距离实际测量的大气透过率 τ_{R_0} 的测量精度取决于红外摄像机辐亮度响应度 α、红外摄像机测量高温黑体的输出值 DN_H 和测量低温黑体的输出值 DN_L、高温黑体辐亮度 L_H 和低温黑体辐亮度 L_L 的不确定度，具体分析如下：

(1)红外摄像机辐亮度响应度的不确定度一般可控制在 5%左右；

(2)红外摄像机的测量输出值 DN 的不确定度优于 1%；

(3)黑体辐亮度 L_L 和 L_H 的不确定度一般可控制在 2%左右。

由此可知，短距离实际测量大气透过率的测量精度在 5.9%左右。

根据式(6)、式(7)和式(8)，长距离修正后的大气透过率 τ_{R_H} 的测量精度取决于距离 R_0 的实际测量大气透过率和理论大气透过率 τ_{R_0}、距离 R_H 的理论大气透过率 τ_{R_H}，黑体和红外摄像机之间的距离 R_0、被测目标与红外摄像机之间的距离 R_H 的不确定度，具体分析如下：

(1)实际测量大气透过率 τ_{R_0} 的不确定度在 5.9%左右；

(2)距离 R_0 和 R_H 的测量精度分别在 1%左右；

(3)理论大气透过率 τ_{R_0} 和 τ_{R_H} 的不确定度取

决于距离 R_0，R_H 以及大气辐射传输计算软件的计算精度。综合可知，不确定度分别在 3.2% 左右。

由此可知，长距离修正后的大气透过率的测量精度在 7.6%左右。

根据式(2)，利用长距离修正后的大气透过率对目标进行辐射反演的精度在 17.7%左右，优于传统的大气透过率辐射反演的精度。

4 外场测量实验

4.1 红外摄像机辐射定标

本文选取中波红外摄像机作为红外辐射特性测量系统。测量之前需要先对中波红外摄像机进行辐射定标，确定红外摄像机的辐射响应度。采用 ISDC IRl50 面源黑体作为辐射定标的标准辐射源。红外摄像机辐射定标模型如下[9-10]：

$$DN=\alpha\cdot L+DN_0, \tag{9}$$

式中：DN 为红外摄像机的测量输出值，α 为待定标的红外摄像机的辐亮度响应度，L 是面源黑体在红外摄像机测量波段(3.7～4.8 μm)内的辐亮度，DN_0 是由红外摄像机自身热辐射和背景辐射等因素引起的偏置值。黑体的辐亮度通过普朗克公式计算[11-13]，即：

$$L=\frac{\varepsilon}{\pi}\int_{\lambda_2}^{\lambda_1}C_1\lambda^{-5}(\mathrm{e}^{C_2/\lambda T}-1)^{-1}\mathrm{d}\lambda, \tag{10}$$

式中：λ_1，λ_2 为红外摄像机的测量波段，ε 为黑体发射率，T 为黑体工作温度，c_1 和 c_2 分别为第一、第二辐射常数[14]。c_1，c_2 分别为：

$$c_1=3.741\ 771\ 790(46)\times10^{-16},$$

$$c_2=1.438\ 777\ 36(83)\times10^{-2}.$$

表 1、表 2 分别给出了中波红外摄像机和 ISDC IRl50 面源黑体的技术参数。

表 1　中波红外摄像机的技术参数

Tab. 1　Parameters of mid-wave infrared camera

参数	值
工作波段/μm	3.7～4.8
摄像机输出值位数	14
摄像机镜头口径/mm	Φ200
摄像机镜头焦距/mm	400

表 2　ISDC IRl50 面源黑体的技术参数

Tab. 2　Parameters of ISDC IRl50 black body

参数	值
有效辐射面积/mm²	300×300
工作温度/℃	25～500
发射率	0.97
温度分辨率/℃	0.1

通过改变面源黑体的温度，得到不同的黑体辐亮度值 L，中波红外摄像机测量面源黑体得到不同的测量输出值 DN。设定积分时间为 2.5 ms。图 1 是中波红外摄像机的辐射定标结果，横坐标代表面源黑体的辐亮度 L，纵坐标代表红外摄像机测量输出值 DN。

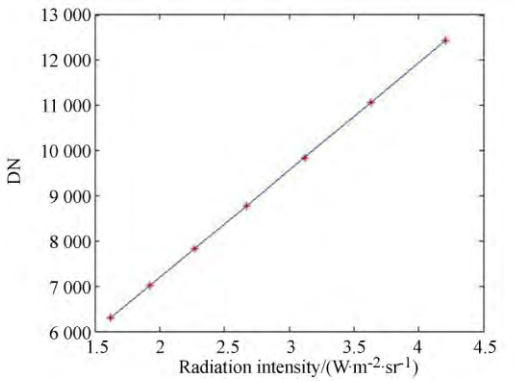


图 1　中波红外摄像机的辐射定标结果

Fig. 1　Result of radiation calibration of medium wave infrared camera

根据式(9)，利用最小二乘法对中波红外摄像机的辐射定标结果进行线性拟合，得到中波红外摄像机的辐亮度响应关系为：

$$DN=2\ 372\times L+2\ 425. \tag{11}$$

4.2 目标红外辐射特性测量实验

为了验证本文方法在实际测量中的可行性，利用前文已经标定好的中波红外摄像机对目标进行红外辐射特性测量实验。首先，将参考辐射源 ISDC IRl50 面源黑体放置在距离中波红外摄像机 200 m 处进行测量，以获得大气透过率。中波红外摄像机的积分时间为 2.5 ms，面源黑体的温度分别设置在 45 ℃和 60 ℃，对应的辐亮度分别为 L_L 和 L_H，红外摄像机对面源黑体的测量输出值分别为 DN_L 和 DN_H。表 3 给出了 200 m 处面源黑体的中波红外摄像机测量结果。图 2 是 200

m 处中波红外摄像机得到的面源黑体图像。

表 3　200 m 处面源黑体的中波红外摄像机测量结果

Tab. 3　Radiance values of black body measured by mid-wave infrared camera at 200 m

黑体温度 /℃	黑体辐亮度/ (W·m^{-2}·sr^{-1})	摄像机输出值/ (W·m^{-2}·sr^{-1})
45	2.274	6 480
60	3.633	8 689



图 2　200 m 处中波红外摄像机得到的面源黑体图像

Fig. 2　Image of black body captured by mid-wave infrared camera at 200 m

根据式(5)和式(11)，由表 3 的数据可以得到 200 m 处实际的大气透过率为：

$$\tau_{R_0}=\frac{8\ 689-6\ 480}{2\ 372\times(3.633-2.274)}=0.685. \quad (12)$$

实验期间的大气环境温度为 −4 ℃，相对湿度为 40%，长春地区海拔 210 m，能见度为 10 km。根据以上大气参数，利用大气辐射传输计算软件 MODTRAN 计算理论大气透过率为：

$$\tau'_{R_0}=0.767\ . \quad (13)$$

根据式(6)得到基础大气修正因子为：

$$C_0=\tau_{R_0}/\tau'_{R_0}=0.685/0.767=0.893. \quad (14)$$

根据式(7)获得距离分别为 391 m 和 810 m 的增强大气修正因子为：

$$C_{391}=0.99^{[\log_2(391/200)+0.5]}\times 0.893=0.884, \quad (15)$$

$$C_{810}=0.99^{[\log_2(810/200)+0.5]}\times 0.893=0.875. \quad (16)$$

利用大气辐射传输计算软件 MODTRAN 计算距离为 391 m 和 810 m 的大气透过率 τ_{R_H} 和大气程辐射 L_{R_H}。之后根据式(8)计算得到修正后的大气透过率 τ_{R_H}。表 4 给出了各测量距离下利用 MODTRAN 计算得到的大气透过率和修正后的大气透过率。

表 4　各测量距离下利用 MODTRAN 计算的大气透过率和修正后的大气透过率

Tab. 4　Corrected atmosphere transmittances based on eqution (8) and atmosphere transmittance calculated by MODTRAN at different distances

测量距离 /m	MODTRAN 计算大气程辐射 L_{R_H}/(W·m^{-2}·sr^{-1})	MODTRAN 计算大气透过率 τ_{R_H}	增强大气修正因子 C_H	修正后大气透过率 τ_{R_H}
391	0.129	0.715	0.884	0.632
810	0.160	0.667	0.875	0.584

将面源黑体作为被测目标分别放置在 391 m 和 810 m 处，对黑体设置不同的温度，利用中波红外摄像机测量目标黑体，得到红外摄像机的测量输出值。根据式(2)，利用大气辐射传输计算软件 MODTRAN 计算的大气透过率对目标黑体进行辐射反演，得到辐亮度图 3 为长距离下中波红外摄像机得到的目标黑体图像。表 5 给出了利用 MODTRAN 计算的大气透过率的目标辐亮度

表 5　利用 MODTRAN 计算的大气透过率进行目标辐亮度反演的结果

Tab. 5　Results of radiation inversion using atmosphere transmittances calculated by MODTRAN

测量距离 /m	目标温度 /℃	目标测量值	MODTRAN 计算大气透过率 τ_{R_H}	目标辐亮度/ (W·m^{-2}·sr^{-1})	反演辐亮度/ (W·m^{-2}·sr^{-1})	误差 /%
391	45	6 194	0.715	2.274	2.042	10.2
	50	6 726		2.671	2.356	11.8
	60	8 067		3.633	3.146	13.4
810	45	5 761	0.667	2.274	1.869	17.8
	50	6 257		2.671	2.182	18.3
	60	7 454		3.633	2.939	19.1

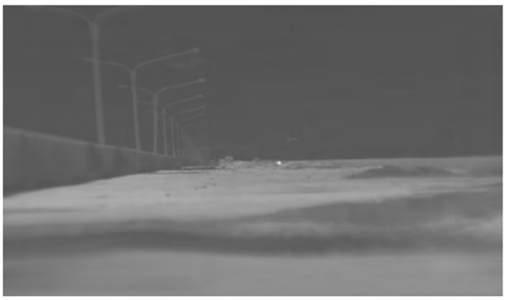


图 3　长距离下中波红外摄像机得到的目标黑体图像

Fig. 3　Image of black body captured by mid-wave infrared camera at a long distance

反演结果。根据式(2)，利用修正后的大气透过率对目标黑体进行辐射反演，得到辐亮度值 L_t。表 6 给出了长距离利用修正后的大气透过率进行目标辐亮度反演的结果。

对比表 5 和表 6 可知，利用经过增强大气修正因子修正后的大气透过率对目标进行辐射反演的精度，优于利用 MODTRAN 计算的大气透过率对目标进行辐射反演的精度，反演精度由 20% 左右提高到 8% 左右。

表 6　利用长距离修正后的大气透过率的目标辐亮度反演结果

Tab. 6　Results of radiation inversion based on corrected atmosphere transmittances at long distance

测量距离 /m	目标温度 /℃	目标测量值	修正后大气透过率 τ_{R_H}	目标辐亮度/ (W·m^{-2}·sr^{-1})	反演辐亮度/ (W·m^{-2}·sr^{-1})	误差 /%
391	45	6 194	0.632	2.274	2.310	1.6
	50	6 726		2.671	2.665	0.2
	60	8 067		3.633	3.559	2.0
810	45	5 761	0.584	2.274	2.134	6.1
	50	6 257		2.671	2.492	6.7
	60	7 454		3.633	3.356	7.6

5　结　论

本文利用中波红外摄像机和 ISDC IR150 面源黑体开展了目标红外辐射特性测量实验。实验结果表明，与利用 MODTRAN 计算的大气透过率的目标辐射测量方法相比，本文利用经过增强大气修正因子修正后的大气透过率的目标辐射测量方法可将测量精度由 20% 左右提高到 8% 左右。

由于本文所进行的实验的大气环境为水平大气，且测试距离较近，所以该测量方法的适用环境为水平大气近距离情况。由于实验室拥有的最大面源黑体尺寸是 300 mm×300 mm，中波红外摄像机的单元探测器的瞬时视场最小是 0.075 mrad×0.075 mrad，因而无法开展更远距离的目标辐射特性测量。今后将购置新的实验器材，并改善实验条件，开展更远距离的目标辐射特性测量实验，进一步验证本文提出方法的有效性。本文计算增强大气修正因子的模型较为简单，获得目标红外辐射特性的增强大气修正因子的精确度不高。今后将完善增强大气修正因子计算模型，采用二次或更高次曲线模型，获得更精确的增强大气修正因子，从而进一步提高目标红外辐射特性的测量精度。

参考文献：

[1] 刘俊池，李洪文，王建立，等. 中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J]. 光学 精密工程，2015，23(6)：1548-1557.
LIU J CH，LI H W，WANG J L，*et al*.. Measurement of mid-infrared total atmospheric transmittance and its error analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*，2015，23(6)：1548-1557. (in Chinese)

[2] 李波. 红外隐身技术的应用及发展趋势[J]. 中国光学，2013，6(6)：818-823.
LI B. Application and development trend of infrared stealth technology[J]. *Chinese Optics*，2013，6(6)：818-823. (in Chinese)

[3] 杨词银，曹丽华，张建萍，等. 利用大气实时修正的飞机辐射特性测量[J]. 光学 精密工程，2014，22

(7)：1752-1759.
YANG C Y, CAO L H, ZHANG J P, *et al*.. Measurement of infrared radiation for target airplane based on real-time atmospheric correction[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1752-1759. (in Chinese)

[4] **汪向阳，陈佐龙，金银哲，等. 目标红外辐射特性测量方法探讨[J]. 兵器实验，2013(4)：41-44.**
WANG X Y, CHEN Z L, JIN Y ZH, *et al*.. Research in method of measurement of infrared radiation for target[J]. *Weapon Test*, 2013(4): 41-44. (in Chinese)

[5] **杨词银，张建萍，曹立华，等. 地基空间目标红外辐射特性测量技术[J]. 仪器仪表学报，2013，34(2)：305-310.**
YANG C Y, ZHANG J P, CAO L H, *et al*.. Ground-based spatial object infrared radiation feature measurement technique[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(2): 305-310. (in Chinese)

[6] **杨词银，张建萍，曹立华，等. 利用大气透过率比例校正的目标辐射测量[J]. 光学 精密工程，2012，20(7)：1627-1635.**
YANG C Y, ZHANG J P, CAO L H, *et al*.. Infrared radiation measurement based on proportional corrected atmospheric transmittance[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1627-1635. (in Chinese)

[7] **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)：473-478.**
WEI H L, CHEN X H, ZHAN J, *et al*.. Atmospheric correction in the measurement of infrared radiance[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 473-478. (in Chinese)

[8] **李云红，张龙，王延年，等. 红外热像仪外场测温的大气透过率二次标定[J]. 光学 精密工程，2010，18(10)：2144-2147.**
LI Y H, ZHANG L, WANG Y N, *et al*.. Second calibration of atmospheric transmission coefficients on temperature measurement of infrared thermal imager in fields[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2144-2147. (in Chinese)

[9] **王东，赵威，邵铭，等. 固定翼飞机地面红外辐射特性测量及分析[J]. 红外技术，2015，37(6)：519-522.**
WANG D, ZHAO W, SHAO M, *et al*.. IR radiation measurement and analysis of land airplane[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(6): 519-522. (in Chinese)

[10] **张晓龙，刘英，孙强. 高精度非致冷长波红外热像仪的辐射标定[J]. 中国光学，2012，5(3)：235-241.**
ZHANG X L, LIU Y, SUN Q. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 235-241. (in Chinese)

[11] **杨词银，张建萍，郭立红，等. 利用大气修正的目标红外辐射测量[J]. 长春理工大学学报：自然科学版，2010，33(4)：2-3.**
YANG C Y, ZHANG J P, GUO L H, *et al*.. Infrared signature measurement of targets based on atmospheric correction[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2010, 33(4): 2-3. (in Chinese)

[12] **孙志远，朱玮，乔彦峰，等. 红外辐射特性测量中环境影响的修正研究[J]. 激光与红外，2010，40(2)：163-165.**
SUN ZH Y, ZHU W, QIAO Y F, *et al*.. Atmosphere amending research in infrared radiation characteristic measurement [J]. *Laser & infrared*, 2010, 40(2): 163-165. (in Chinese)

[13] **张晓龙，刘英，王健，等. 不同非均匀性校正温度的红外测温技术[J]. 中国光学，2014，7(1)：150-155.**
ZHANG X L, LIU Y, WANG J, *et al*.. Infrared thermometry technology with different nonuniformity correction temperatures[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 150-155. (in Chinese)

[14] **张建萍，杨词银. 红外目标模拟器辐射校准方法的研究[J]. 仪器仪表学报，2013，34(9)：2046-2050.**
ZHANG J P, YANG C Y. Research on the radiation calibration method of infrared target simulator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(9): 2046-2050. (in Chinese)

作者简介：



郭立红(1964－)，**女，吉林舒兰人，研究员，博士生导师，1986 年于长春光学机械学院获得学士学位，1998 年、2003 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位，主要从事光电对抗装备的总体设计。**E-mail: guolh@ciomp.ac.cn



郭汉洲(1990－)，**男，吉林长春人，硕士研究生，2014 年于长春理工大学获得学士学位，主要从事红外目标特性测量与辐射定标等方面的研究。**E-mail: guohanzhou1@163.com

(版权所有　未经许可　不得转载)