

根据环境温度进行红外成像系统漂移补偿

余毅^{1,2} 王旻² 常松涛^{2,3} 姜会林¹

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 采用红外成像系统进行目标辐射特性测量时,环境温度变化引起的输出灰度漂移是一项重要的误差来源。通过研究环境温度对制冷型红外成像系统输出灰度的影响机理,提出了一种直接根据环境温度对输出灰度漂移进行补偿的方法。分析了红外成像系统灰度漂移来源,推导了漂移量与环境温度的函数关系,建立了理论模型,并在此基础上提出一种简便的漂移修正方法。通过辐射定标实验对该方法的有效性进行验证,结果表明,提出的方法不仅保证了红外系统测量精度,而且在系统线性响应范围内可以直接通过计算实现任意积分时间下的漂移补偿,提高了辐射定标和测量效率。

关键词 成像系统;辐射测量;漂移;环境温度;杂散辐射;积分时间

中图分类号 TP732.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1004002

Drift Compensation of Infrared Imaging System Using Ambient Temperature

Yu Yi^{1,2} Wang Min² Chang Songtao^{2,3} Jiang Huilin¹

¹ School of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For radiation measurement using infrared imaging systems, gray value drift caused by ambient temperature variation is a significant source of error. By studying the effects of ambient temperature on the output gray value of cooled infrared systems, a drift compensation method is proposed. The sources of gray value drift are analyzed, and the relationship between drift and ambient temperature is derived to establish a theoretical model. A simple drift correction method is proposed. The radiometric calibration experiment is carried out for verification. The results indicate that proposed method can not only improve the measurement accuracy of the infrared imaging system, but also achieve drift compensation under arbitrary integration time, which improves the efficiency of radiometric calibration and measurement.

Key words imaging systems; radiation measurement; drift; ambient temperature; stray radiation; integration time

OCIS codes 040.2480; 040.3060; 120.5630

1 引言

随着红外探测器和测控技术的发展,越来越多

的高精度地基红外测量系统被广泛应用于军事目标的辐射特性测量。辐射定标是目标辐射特性测量的

收稿日期: 2014-04-14; **收到修改稿日期**: 2014-05-20

基金项目: 吉林省自然科学基金(201115124)

作者简介: 余毅(1979—),男,博士研究生,主要从事靶场光学测量总体技术方面的研究。

E-mail: 13756006195@139.com

导师简介: 姜会林(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事光学系统设计、光学 CAD 技术、光电仿真技术和光电检测技术等方面的研究。E-mail: jianghuilin001@sina.com

前提,要实现高精度的辐射测量,首先要对红外成像系统进行精确的辐射定标^[1-7]。定标和测量过程中环境温度的变化会引起红外成像系统输出灰度漂移,限制辐射测量的精度,因此通常要求定标和测量在同一稳定环境条件下进行。实际上红外系统定标过程往往比较繁琐但是测量任务要求时间短,导致定标和测量无法同时进行,甚至由于外场条件限制,定标过程只能提前在实验室内完成。因此定标持续时间长,而且定标和测量间隔时间也可能较长,定标过程中的温度变化引起的漂移以及定标与测量过程中环境温度差异引起的漂移都会影响辐射测量精度。另外,如果辐射测量任务持续时间较长,这一时间段内的环境温度变化同样会影响测量精度,并且各个时刻的输出灰度漂移量难以预测。现有的红外成像系统漂移研究主要着眼于小型非制冷探测器,改变环境温度进行辐射测量实验,通过曲线拟合获得温度与漂移量的关系曲线,对漂移结果进行定性研究^[8-11]。但是由于非制冷探测器本身温度随环境和工作状态变化显著,引起系统的响应率变化和输出灰度漂移^[10],不利于进行辐射测量。目前用于高精度辐射测量的红外探测器一般为制冷型,探测器温度稳定,其漂移来源主要是外部因素,即到达探测器的杂散辐射。目前杂散辐射(杂散光)计算主要通过软件模拟来实现,计算结果与实际差别较大^[11-12]。本文针对环境温度变化对红外系统输出灰度漂移量的影响机理进行了研究,分析了漂移来源,对杂散辐射进行简化处理,推导了单个像元灰度随环境温度漂移的理论计算公式,提出了一种直接利用环境温度进行漂移补偿的方法,并设计实验进行了验证。

2 环境温度对系统输出灰度的影响

2.1 考虑积分时间和环境因素的定标模型

要实现高精度的目标辐射特性测量,首先要保证辐射定标精度。通常采用近距离扩展源方法进行定标,得到某积分时间下目标(黑体辐射源)辐射亮度与红外成像系统输出灰度值的关系如下^[5-7]:

$$h = G \cdot L_t + B, \quad (1)$$

式中 h 为红外探测器单个像元的输出灰度值,单位为 DN, G 为该像元对目标辐射亮度的响应率, L_t 为目标辐射亮度, B 为偏置。

$$L_t = \varepsilon \cdot L(T_t) = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_t) d\lambda, \quad (2)$$

式中 ε 为目标发射率, $L(T_t)$ 是温度为 T_t 的理想黑体辐射亮度, $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为探测器工作波段范围, $W(\lambda, T_t)$ 为由普朗克公式得到的光谱辐射力,单位为 $W/(m^2 \cdot \mu m)$ 。定标原理如图 1 所示。

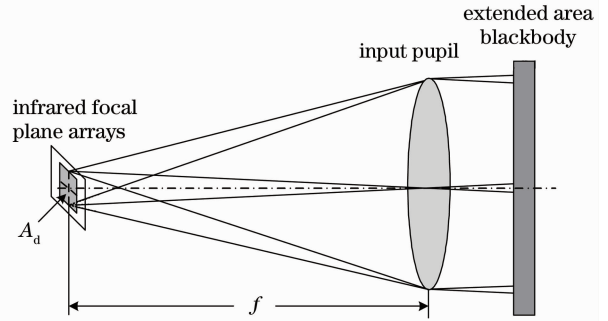


图 1 面源黑体辐射定标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radiometric calibration using extended area blackbody

目标黑体入射到探测器单个像元的辐射通量为

$$\Phi_t = \frac{\pi \cdot \varepsilon \tau_{opt}}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot A_d \cdot L(T_t) = \varepsilon \cdot k_t L(T_t), \quad (3)$$

式中 $k_t = \frac{\pi \tau_{opt}}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 A_d$, τ_{opt} 为光学系统透射率, D 为入瞳直径, f 为焦距, A_d 为探测器单个像元的面积,因此对某一红外系统而言 k_t 是常数。由(1)~(3)式得到探测器单个像元对入射辐射通量的响应为

$$G' = \frac{G}{k_t}. \quad (4)$$

(1)式中 B 为目标表面对环境辐射的反射、红外成像系统杂散辐射和探测器暗电流等因素引起的偏置。设目标表面反射到达探测器像元的辐射通量为 Φ_b , 到达探测器像元的杂散辐射通量为 Φ_{sys} , 探测器暗电流等内部因素引起的偏置为 h_{det} , 则有

$$B = G' \cdot \Phi_b + G' \cdot \Phi_{sys} + h_{det}. \quad (5)$$

为了满足目标辐射亮度测量范围需求,即扩展红外成像系统的动态范围,通常设置多个积分时间档位。(5)式中 $G' \cdot \Phi_b$ 和 $G' \cdot \Phi_{sys}$ 为探测器对辐射通量的响应,在探测器响应线性区间内与积分时间成正比^[13-15]。而 h_{det} 为制冷型探测器内部因素对输出灰度产生的影响,与环境温度无关,可设为积分时间的函数 $h_{det}(t)$, 则(1)式可修改为

$$h = t \cdot G' (\Phi_t + \Phi_{sys} + \Phi_b) + h_{det}(t), \quad (6)$$

式中 t 为积分时间(单位为 ms), 那么 G' 为积分时间 1 ms 时的辐射通量响应率。对于近距离扩展源定标而言,由于目标与探测器距离近,可以忽略大气吸

收、程辐射、湿度和气压等因素的影响。

2.2 输出灰度漂移分析

为消除辐射定标和测量中系统输出灰度漂移对精度的影响,需要对漂移产生机理进行研究。制冷型红外热像仪的探测器温度稳定在 77 K 左右,因此理论上探测器响应 G' 不会随着外部环境温度改变。由于目标黑体温度稳定,目标入射到单个像元的辐射通量 Φ_i 不变,因此漂移产生的原因主要是杂散辐射、表面反射和暗电流等因素的变化。

对近距离面源黑体定标而言,成像系统的杂散辐射主要来源于光学系统自身的热辐射,包括镜组辐射、镜筒辐射、遮光筒辐射和冷反射^[16-19]。冷反射是制冷型探测器自身辐射经过光学系统的反射,通常采用降低关键反射面反射率的方法来削弱这一影响,对于一个定焦系统而言,理论上冷反射与环境无关,文中将其归入 $h_{\text{det}}(t)$ 中。镜筒和遮光筒的辐射会通过镜组反射、透射以及结构件的漫发射到达探测器。考虑单个探测器接收到的镜筒和遮光筒辐射,设微元面 ds 的镜筒或遮光筒在 (θ, φ) 方向的辐射经过多次反射和透射到达探测器像元^[19-21],则该像元接收到的辐射通量为

$$d\Phi_{\text{sys1}} = \varepsilon(\theta, \varphi) \cdot ds \cdot L(T_{\text{amb}}) \cdot P \cdot R, \quad (7)$$

式中 ε 为微元面的发射率, P 和 R 分别为传输路径上的透射率和反射率。那么该像元接收到的所有来自镜筒和遮光筒的辐射通量为

$$\Phi_{\text{sys1}}(T_{\text{amb}}) = \sum_{i=1}^M \varepsilon_i(\theta, \varphi) \cdot s_i \cdot L(T_{\text{amb}}) \cdot P_i \cdot R_i, \quad (8)$$

式中 M 为微元面总数。对于镜组辐射,可以将光学系统近似等效为直径为 D_0 , 焦距为 f_0 的单透镜系统,其发射率为 ε_0 , 温度与周围环境相同,为 T_{amb} , 则单个像元所接收到的镜组辐射通量为^[22-23]

$$\Phi_{\text{sys2}}(T_{\text{amb}}) = \frac{\pi \varepsilon_0}{4} \left(\frac{D_0}{f_0} \right)^2 \cdot A_d \cdot L(T_{\text{amb}}), \quad (9)$$

杂散辐射总量为

$$\Phi_{\text{sys}}(T_{\text{amb}}) = \Phi_{\text{sys1}}(T_{\text{amb}}) + \Phi_{\text{sys2}}(T_{\text{amb}}) = k_{\text{sys}} \cdot L(T_{\text{amb}}), \quad (10)$$

式中 $k_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^M \varepsilon_i(\theta, \varphi) \cdot s_i \cdot P_i \cdot R_i + \frac{\pi \varepsilon_0}{4} \left(\frac{D_0}{f_0} \right)^2 A_d$, 对红外系统来说 k_{sys} 是常数。由于目标发射率不为 1, 其表面反射到达单个像元的辐射通量为

$$\Phi_0 = \frac{\pi(1-\varepsilon)\tau_{\text{opt}}}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cdot A_d \cdot L(T_{\text{amb}}) = k_b L(T_{\text{amb}}), \quad (11)$$

式中 $k_b = \frac{\pi(1-\varepsilon)\tau_{\text{opt}}}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cdot A_d$ 。代入(6)式得到

$$h(t, T_t, T_{\text{amb}}) = t \cdot GL_t(T_t) + t \cdot G'(k_{\text{sys}} + k_b)L(T_{\text{amb}}) + h_{\text{det}}(t). \quad (12)$$

保持积分时间不变,设环境温度由初始温度 $T_{\text{amb}0}$ 升高(降低)到 $T_{\text{amb}1}$, 则探测器输出灰度变化量为

$$\Delta h = h(t, T_t, T_{\text{amb}1}) - h(t, T_t, T_{\text{amb}0}) = t \cdot G' \cdot (k_{\text{sys}} + k_b) \cdot [L(T_{\text{amb}1}) - L(T_{\text{amb}0})]. \quad (13)$$

令 $\Delta L(T_{\text{amb}}) = L(T_{\text{amb}1}) - L(T_{\text{amb}0})$, 由(13)式可知,保持积分时间不变,只要得到一组 $[\Delta L(T_{\text{amb}}), h]$ 进行线性最小二乘拟合即可得到 $G' \cdot (k_{\text{sys}} + k_b)$, 代入(13)式得到任意积分时间下的输出灰度漂移量,就可以直接根据环境温度变化进行漂移补偿。

3 灰度漂移理论的验证

为了验证提出的漂移补偿理论,利用 FLIR 公司的中波制冷型红外相机进行辐射定标实验。相机参数如下:工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 探测器像元数为 $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, 输出位数为 14 bit, 焦距为 50 mm, F 数为 2。定标采用的辐射源为 CI 公司的 SR-800 高精度面源黑体,发射率为 0.97, 辐射面大小为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 温度精度为 $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ 。实验装置如图 2 所示。

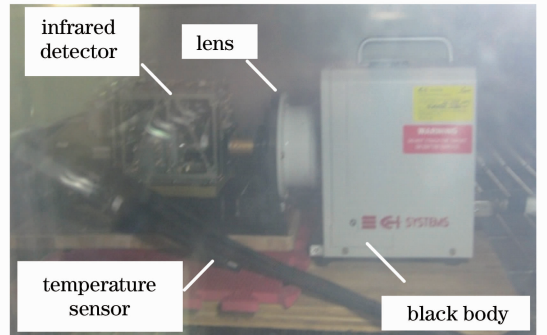


图 2 不同环境温度下辐射定标实验现场图

Fig. 2 Radiometric calibration at different ambient temperatures

将红外系统和黑体放入高低温试验箱,实验时箱内的温度变化范围设置为 $0 \text{ }^\circ\text{C} \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$, 间隔 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。同时使用温度传感器(精度为 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$)监测试验箱内的环境温度,由于高低温试验箱存在温控误差,以温度传感器显示的温度值为箱内温度基准值。

将黑体的温度设置为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 相机积分时间为 1 ms , 设定高低温试验箱的温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 以 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 为温

度梯度进行升、降温实验,待温度稳定后每隔 5 min 采集一帧图像,得到输出灰度漂移量的变化规律如图 3 所示,可见输出灰度值随环境温度升高而增大,且当环境温度稳定时输出灰度值也较为稳定,温度下降段相当于重复性实验,同样证明了上述结论。

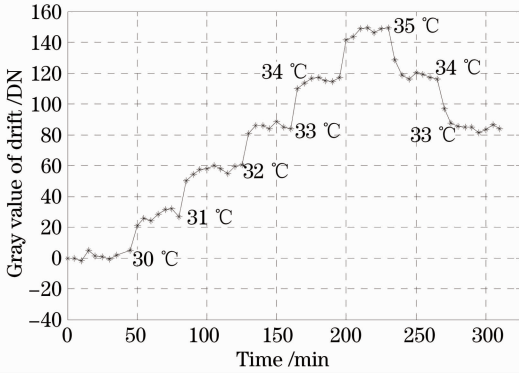


图 3 输出灰度漂移量随环境温度变化规律
Fig. 3 Gray value drift variation with the ambient temperature

为研究探测器响应率是否随环境温度变化,高低温实验箱内温度由 0 °C 升高到 50 °C,目标黑体温度设置为 30 °C 和 50 °C 进行辐射定标,得到探测器对入射辐射亮度的响应率变化曲线如图 4 所示。计算得到环境温度由 0 °C 上升到 50 °C 时探测器辐射亮度响应率 G 的最大相对误差为 0.87%,且不具有增大或者减小的整体趋势,说明制冷型探测器的响应率不随环境温度变化。

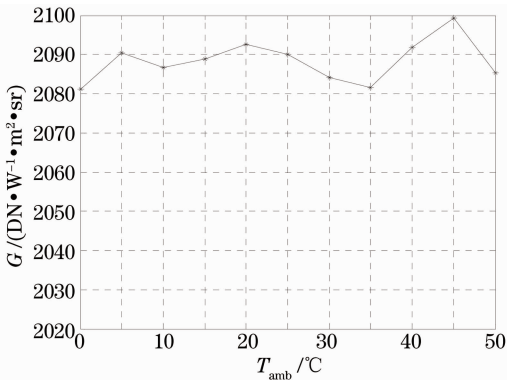


图 4 探测器辐射亮度响应率随环境温度变化
Fig. 4 Radiance response rate of detector as a function of ambient temperature

将黑体温度分别设为 30 °C、40 °C、50 °C 和 60 °C,初始环境温度设置为 0 °C,实验时上升到 15 °C、25 °C、35 °C 和 45 °C,积分时间 1 ms,得到探测器灰度漂移量与环境温度的关系如图 5 所示。

可见当目标黑体设为不同温度时漂移量几乎相等,说明漂移量与目标温度(目标辐射亮度)无关,即

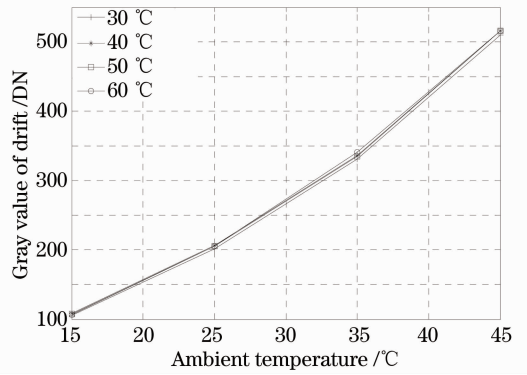


图 5 不同目标温度下输出灰度漂移量与环境温度关系
Fig. 5 Relationship between gray value drift and ambient temperature at different target temperatures

(13)式中不含参数 T_t 。

黑体温度为 50 °C,环境温度由 20 °C 上升到 40 °C,那么 $\Delta L(T_{amb}) = L(40\text{ °C}) - L(20\text{ °C})$,积分时间(单位为 ms)设定为 0.2、0.5、0.8、1.0、1.2、1.5、1.8 和 2.0,得到积分时间与探测器输出灰度漂移量之间的关系如图 6 所示。

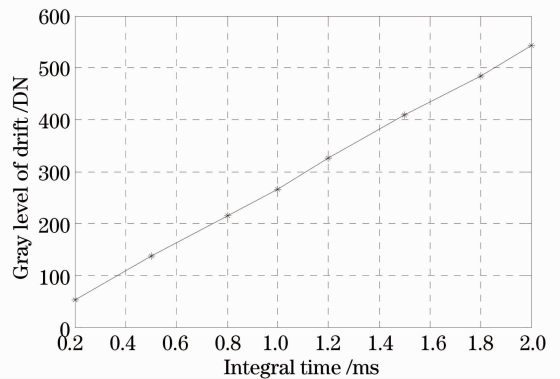


图 6 漂移量与积分时间的关系曲线
Fig. 6 Gray value of drift as a function of integration time

可见积分时间与漂移量近似呈线性关系,证明了(13)式的合理性。

4 漂移补偿实验

设计了环境实验对提出的漂移补偿方法进行验证,将红外系统和黑体放入高低温实验箱。设置黑体温度为 50 °C,积分时间为 1 ms,高低温实验箱内温度分别设为 10 °C 和 20 °C,得到两个温度下的输出灰度值,计算出漂移量,代入(13)式得到 $G' \cdot (k_{sys} + k_b)$,即可获得任意积分时间和温度变化量对应的漂移量。根据实验数据得到 20 °C 时输出灰度值为 5855,10 °C 时为 5771,因此 $G' \cdot (k_{sys} + k_b) = (5855 - 5771) / (0.9739 - 0.6556) = 263.90$,可代入

(13)式得到所有积分时间和环境温度下的漂移量。

黑体温度设为 50 °C, 积分时间为 0.5 ms 和 1 ms。高低温实验箱初始温度设为 20 °C, 以 5 °C 为间隔记录环境温度 0 °C ~ 15 °C 与 25 °C ~ 50 °C 时每个积分时间下的输出灰度值。以 20 °C 时的输出灰度值为基准值, 0.5 ms 和 1 ms 分别对应 2966 DN

和 5855 DN, 通过漂移补偿公式对不同积分时间和环境温度下的输出灰度进行修正, 得到漂移修正前后的系统输出灰度结果如图 7 所示, 图 7(a) 和 7(b) 分别对应 0.5 ms 和 1 ms 积分时间。表 1 中为漂移修正计算的结果及误差。

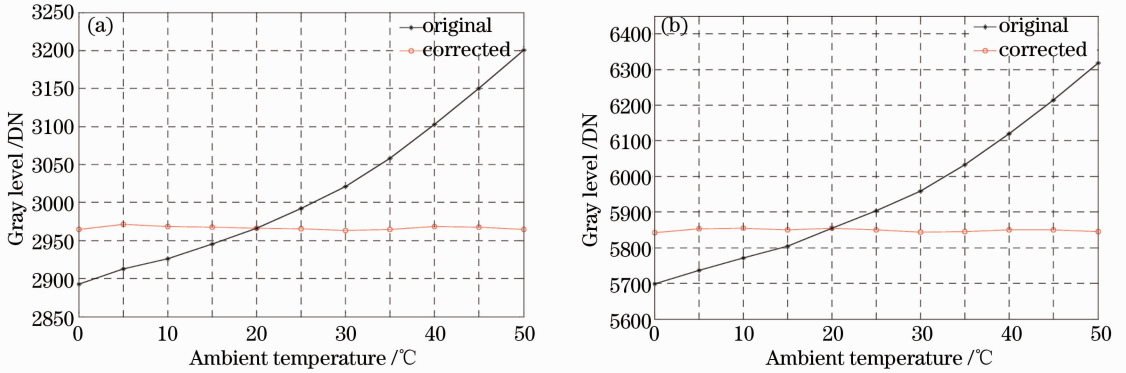


图 7 单个像元漂移修正前后的灰度值。(a) 积分时间 0.5 ms; (b) 积分时间 1 ms

Fig. 7 Original and corrected gray level of a pixel. (a) At an integration time of 0.5 ms; (b) at an integration time of 1 ms

表 1 实际漂移量与漂移补偿结果

Table 1 Measured gray value of drift and correction results

Integration time / ms	Ambient temperature / °C	Gray level / DN	Error of gray level / %	Real drift / DN	Calculated drift / DN	Calculation error of drift / %	Corrected gray level / DN	Correction error of gray level / %
0.5	0	2893	-2.46	-73	-71.9	-1.51	2964.9	-0.04
	5	2913	-1.79	-53	-58.3	10.00	2971.3	0.18
	10	2926	-1.35	-40	-42.0	5.00	2968	0.07
	15	2945	-0.71	-21	-22.7	8.10	2967.7	0.06
	25	2992	0.88	26	26.6	2.31	2965.4	-0.02
	30	3021	1.85	55	57.6	4.73	2963.4	-0.09
	35	3058	3.10	92	93.5	1.63	2964.5	-0.05
	40	3103	4.62	137	134.9	-1.53	2968.1	0.07
	45	3150	6.20	184	182.4	-0.87	2967.6	0.05
	50	3201	7.92	235	236.6	0.68	2964.4	-0.05
1.0	0	5698	-2.68	-157	-143.8	-8.41	5841.8	-0.23
	5	5737	-2.02	-118	-116.5	-1.31	5853.5	-0.03
	10	5771	-1.43	-84	-84.0	0.00	5855	0.00
	15	5805	-0.85	-50	-45.5	-9.00	5850.5	-0.08
	25	5903	0.82	48	53.2	10.83	5849.8	-0.09
	30	5959	1.78	104	115.2	10.77	5843.8	-0.19
	35	6033	3.04	178	187.1	5.11	5845.9	-0.16
	40	6120	4.53	265	269.8	1.81	5850.2	-0.08
	45	6214	6.13	359	364.8	1.62	5849.2	-0.10
	50	6318	7.91	463	473.2	2.20	5844.8	-0.17

由表 1 中数据可见, 各积分时间下漂移量的计算值与实际值最大误差为 10.83%。漂移导致的该红外系统输出灰度误差最大为 7.92%, 且与环境温

度变化量正相关。通过漂移补偿后系统输出灰度值最大误差降低到 0.23%, 且误差分布与温差和积分时间均不存在明显的相关性。0.5 ms 下的漂移补

偿结果说明,在 1 ms 积分时间下获得的漂移补偿公式能够进行其他积分时间下的漂移补偿。因此提出的漂移补偿方法能够提高红外系统测量精度,并且可以完成任意积分时间下的漂移补偿。

5 结 论

本文通过对辐射定标的理论模型的分析及高低温实验箱内的漂移实验,提出了一种直接根据环境温度进行红外成像系统漂移补偿的方法,并通过实验对该方法进行了验证。结果表明通过漂移补偿后红外系统输出灰度最大误差(即由漂移引起的系统测量误差)由 7.92%降低到 0.23%。说明该漂移补偿方法可以有效地完成任意积分时间和环境温度下的灰度补偿,能够有效地提高红外系统的辐射测量和定标精度。该方法大大地提高了红外测量系统的环境适应性,使红外系统在环境温度变化较大的情况下,仍然保持较高的测量精度,对靶场辐射特性测量研究具有重要意义。

该方法的应用前景之一是直接采用实验室定标数据进行辐射测量任务,具体做法是根据实验室定标时的环境温度对辐射测量时的输出灰度进行漂移补偿,采用实验室定标结果作为现场定标数据进行计算;对持续时间长温度变化明显的辐射测量任务数据进行漂移补偿,以提高测量精度;可用于校正各像元漂移量之间差异引起的非均匀性,对红外图像非均匀校正具有一定的参考价值。下一步的工作是进行多种不同红外系统的漂移补偿实验,以验证该方法的适用性。另外由于高低温实验箱内空间有限,无法进行大口径红外成像系统辐射测量过程中的漂移补偿实验,因此还需要进一步研究。

参 考 文 献

- William L Wolfe. Introduction to Radiometry [M]. Bellingham: SPIE Press, 1998. 105-117.
- R L Edson, B M Shaughnessy, M S Whalley, *et al.*. The mechanical and thermal design and analysis of the VISTA infrared camera [C]. SPIE, 2004, 5497: 508-519.
- J P Emerson, W J Sutherland. VISTA: status and performance [C]. SPIE, 2010, 7733: 773306.
- Jim Emerson, Will Sutherland. Visible and infrared survey telescope for astronomy; overview [C]. SPIE, 2002, 4836: 35-42.
- Tang Jia, Gao Xin. Calibration method for radiation characteristics measuring system of test range [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(10): 266-270.
唐 嘉, 高 昕. 靶场红外辐射特性测量系统标定方法研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(10): 266-270.
- Li Xiansheng, Ren Jianwei, Zhang Liguo, *et al.*. Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared optoelectric on spot [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2006, 17(2): 175-178.
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制[J]. 光电子·激光, 2006, 17(2): 175-178.
- Li Ning, Yang Ciyin, Cao Lihua, *et al.*. Radiance calibration for 3~5 μm infrared focal plane array [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2319-2325.
李 宁, 杨词银, 曹立华, 等. 3~5 μm 红外焦平面阵列的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2319-2325.
- Dong Shidu, Yang Xiaofan, He Bo, *et al.*. A transplantable compensation scheme for the effect of the radiance from the interior of a camera on the accuracy of temperature measurement [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 27(11): 1517-1528.
- Dong Shidu, Huang Song, Yan He, *et al.*. A calibration method for removing the effect of infrared camera self-radiance on the accuracy of temperature measurement [J]. Transactions on Edutainment IX, Lecture Notes in Computer Science, 2003, 7544: 252-261.
- Dong Shidu, Yang Xiaofan, Yang Wu, *et al.*. A method for removing the effect of the camera radiance on the infrared image [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 29(5): 499-507.
- Wang Pengcheng, Cao Yang. Athermalization design of dual-wavelength infrared optical system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 062202.
王鹏程, 曹 阳. 双波段红外光学系统无热化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 062202.
- Eric C Fest. Stray Light Analysis and Control [M]. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2012.
- C P Cavedoni, T G Hawarden, T C Chuter, *et al.*. The UKIRT upgrades programme: control of the telescope thermal environment [C]. SPIE, 1999, 2871: 685-694.
- Thomas Svensson, Ingmar Renhorn, Patrik Broberg. A study of the radiometric calibration of spectral bands in the mid wave infrared (MWIR) spectral range, 1.5~5.5 μm [C]. SPIE, 2009, 7300: 73000Z.
- Luo Maojie, Zhou Jinmei, Fu Jingneng, *et al.*. Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 36-40.
罗茂捷, 周金梅, 傅景能, 等. 考虑积分时间变量的红外系统辐射响应定标[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 36-40.
- Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0928002.
李 岩, 刘剑峰. 红外遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0928002.
- Zhang Bao, Hong Yongfeng, Shi Guanghui. Application of non-uniformity correction to stray radiation suppression of infrared optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2421-2428.
张 葆, 洪永丰, 史光辉. 非均匀性校正红外杂散辐射抑制中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2421-2428.
- Liu Yang, An Xiaoqiang. Analysis and control of narcissus effect of cooling IR focal plane system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222007.
刘 洋, 安晓强. 制冷型红外焦平面系统冷反射效应的分析与控制[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222007.
- Lin Jianchun, Sun Liwei, Chen Boyang, *et al.*. Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photomask [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0116001.
林剑春, 孙丽葳, 陈博洋, 等. 同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0116001.
- Stephen M Pompea. Assessment of black and spectrally selective

- surfaces for stray light reduction in telescope systems [C]. SPIE, 2010, 7739: 773921.
- 21 Liu Yang, An Xiaoqiang, Wang Qian. Accurate and fast stray radiation calculation based on improved backward ray tracing [J]. Appl Opt, 2013, 52(4): 131–139.
- 22 Li Yan, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Design of large zoom ratio middle wavelength infrared zoom optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422005.
- 李岩, 张葆, 洪永丰. 大变倍比中波红外变焦光学系统设计 [J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422005.
- 23 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, *et al.*. Analysis and calculation of space-based infrared detection system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 768–771.
- 牛金星, 周仁魁, 刘朝辉, 等. 天基红外探测系统的杂散光分析与计算 [J]. 光学学报, 2010, 30(3): 768–771.

栏目编辑：何卓铭