

宽动态范围辐射测温系统的简化定标方法

马冬晓*, 汪家春, 陈宗胜, 王冰, 刘洋

国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 在宽动态范围辐射测温系统中,不同温度的辐射源采用透过率不同的中性密度衰减片以及不同的积分时间,往往需要重新定标,且重新定标过程繁琐,降低了系统的效率。在分析定标理论的基础上,建立了考虑积分时间和中性密度衰减片透过率的宽动态范围辐射定标模型,提出了一种简化的定标方法,经过两次不同积分时间的定标,可以推导出前置不同透过率衰减片、不同积分时间的定标模型;通过对前置透过率为 0.0278% 的衰减片在 0.8 ms 及 1 ms 积分时间下的定标分析,计算出系统由内部暗电流及杂散辐射引起的灰度响应,从而分别推导出前置透过率为 0.0740% 和 0.8193% 的衰减片在不同积分时间下的定标模型,最后通过实验检验定标模型的测温精度。实验结果表明:利用所提出的简化定标方法,透过率为 0.0740% 的衰减片在 0.8 ms 及 1 ms 积分时间下的定标模型的测温误差分别 $\leq 0.36\%$ 和 $\leq 0.46\%$;0.8193% 衰减片在 0.2 ms 积分时间下的测温误差 $\leq 4.5\%$ 。在一定的误差允许范围内,所提定标方法在提高定标效率的同时,保证了一定的测温精度。

关键词 测量; 辐射定标; 宽动态范围; 简化方法; 中性密度衰减片

中图分类号 TN216

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0612003

Simplified Calibration Method for Radiation Temperature Measurement System with Wide Dynamic Range

Ma Dongxiao*, Wang Jiachun, Chen Zongsheng, Wang Bing, Liu Yang

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology,
Hefei, Anhui 230037, China

Abstract The radiation temperature measurement system with a wide dynamic range requires different integration time and neutral density attenuators with different transmittance levels for the radiation sources exhibiting different temperatures. The attenuators and integration time often need to be re-calibrated because of their variation. The re-calibration process is cumbersome, and thus the efficiency of the whole system is reduced. First, based on the calibration theory, a radiation calibration model of the radiation temperature measurement system with a wide dynamic range is developed herein. This model considers the integration time and the transmittance of the neutral density attenuators. A simplified calibration method is also proposed to realize the calibration models of attenuators having different radiation transmittance at different integration time. Two different integration time are calibrated using the proposed method. Then, the gray value response of the system caused by internal dark current and stray radiation is calculated by calibrating at integration time of 0.8 ms and 1 ms using an attenuator having 0.0278% transmittance. Therefore, the calibration models of the attenuators having 0.0740% and 0.8193% transmittances at different integration time can be derived. The precision of temperature measurement is experimentally tested. The experimental results indicate that using the proposed calibration method, the maximum temperature measurement errors of the calibration model for the 0.0740% attenuator at integration time of 0.8 ms and 1 ms are $\leq 0.36\%$ and $\leq 0.46\%$, respectively, and that for the 0.8193% attenuator at integration time of 0.2 ms is $\leq 4.5\%$. As for the proposed method, within a certain error range, the calibration efficiency is improved and a certain precision of temperature measurement is guaranteed.

Key words measurement; radiation calibration; wide dynamic range; simplified method; neutral density attenuator

OCIS codes 120.2440; 120.0280; 120.5630; 040.3060

收稿日期: 2019-01-17; 修回日期: 2019-02-01; 录用日期: 2019-03-11

基金项目: 国防“十三五”预研项目(HJJ2017-0671)

* E-mail: 2864594404@qq.com

1 引 言

温度作为烟火药及特种作战药剂等火工品研发中必不可少的研究参量,其测量手段随着技术的发展越来越先进。传统的接触式测温计由于材料不耐高温、动态范围窄等缺点,已不再适于用作诱饵剂等其他火工品燃温的测量。而具有响应时间快、测温范围广等优点的辐射测温成为火工品燃温测量的主要手段。

在红外诱饵剂的研究过程中,药剂燃温通常较高(>500 °C),常使实验中所用的热像仪由于响应饱和而无法正确测量燃烧温度,为此不少学者建议在热像仪内部或外部加装一片或多片中性密度衰减片来拓宽系统的动态范围^[1]。但对于不同辐射强度的目标,所选用的积分时间和中性密度衰减片的透过率不同,衰减片的更换以及系统积分时间的改变,导致系统必须重新定标,造成了时间上的浪费,也影响了系统的工作效率。

通过分析热像仪测温原理,提出了一种较为简便的宽动态范围辐射定标方法,建立了同时考虑积分时间和衰减片透过率的辐射定标模型,并经过实验验证了其测温精度,实现了在一定温度范围内保证一定测温精度的同时,免去繁杂定标流程的目的,

提高了系统的机动性和工作效率。

2 考虑积分时间与衰减片透过率的辐射定标模型

定标的目的是为了建立目标辐射源辐射亮度与探测器像元响应之间的关系,宽动态范围辐射测温系统通常是由在光学通路中添加一定辐射透过率的中性密度衰减片来实现的。采用传统的近距离小面源法进行辐射定标^[2],将黑体小面源放置在测温系统入瞳前的适当距离处,并在系统入瞳前放置一定辐射透过率的中性密度衰减片,使得小面源黑体经测温系统的光学系统之后,对尽可能多的像元进行标定。探测器工作波段为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$,探测器红外焦平面阵列上接收到的辐射主要来自3个方面:1)温度为 T 、发射率为 ϵ_b 的黑体小面源的辐射;2)黑体面板对周围环境辐射的反射辐射^[3];3)探测器与辐射源之间的大气通道辐射。此外,相机内部因冷靶效率<100%也会引起一定的非聚焦能辐射^[4]。探测器接收到的各部分辐射来源如图1所示,其中IRFPA为红外焦平面,并假设环境辐射发射率为 ϵ_e ,黑体面板的发射率为 ϵ_d ,周围温度为 T_e ,大气温度为 T_{atm} 。

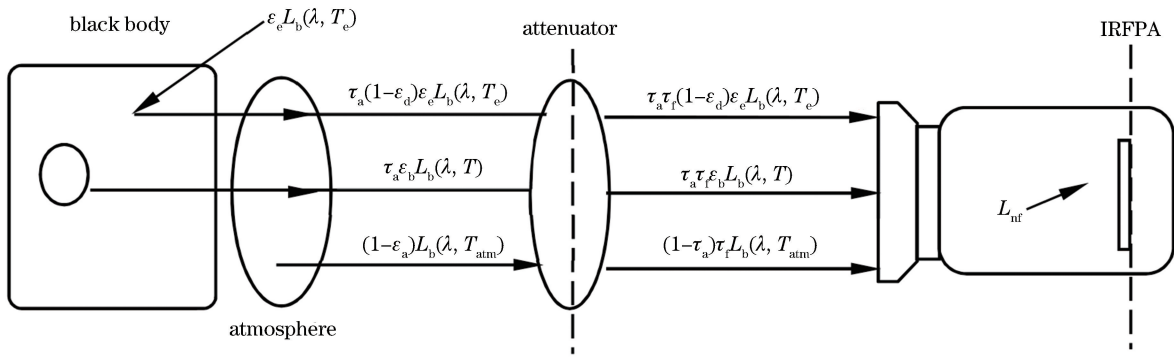


图1 辐射来源示意图

Fig. 1 Schematic of radiation sources

黑体小面源对系统所张视场角比较大,符合宽光束成像的条件,所以测量系统焦平面探测器上接收到的单位波长的辐射照度为

$$E' = \frac{\tau_{opt} \tau_a \tau_f \pi D^2 l^2}{f^2 (4l^2 + D^2)} \left[\epsilon_b L_b(\lambda, T) + (1 - \epsilon_d) \epsilon_e L_b(\lambda, T_e) + \frac{(1 - \tau_a)}{\tau_a} L_b(\lambda, T_{atm}) \right] + E_{nf}, \quad (1)$$

式中: E_{nf} 为非聚焦能的辐射照度; τ_{opt} 、 τ_a 分别为光学系统和大气透过率; τ_f 为中性密度衰减片的辐

射透过率; D 为系统入瞳直径; l 为黑体小面源与红外测量系统的距离; f 为系统焦距; $L_b(\lambda, T)$ 为目标辐射源(温度为 T)在波长 λ 处对应的黑体光谱辐射亮度。探测器在工作波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内接收到的有效黑体辐射亮度为^[5]

$$L_{b\Delta\lambda}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) L_b(\lambda, T) d\lambda, \quad (2)$$

式中: $R(\lambda)$ 为探测器的相对光谱响应率,表征探测器将辐射能转化为电信号的能力。所以,探测器像元产生的灰度响应 G_N 为

$$G_N = g \cdot t_{\text{int}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) E' d\lambda + g_n, \quad (3)$$

式中: g 为像元灰度值对响应电压的增益; t_{int} 为积分时间; g_n 为系统内部暗电流引起的灰度偏置。由于在窄带工作波段内, 探测器像元灰度响应与入射辐照度近似成线性关系。所以由(1)~(3)式可得:

$$G_N = K\tau_f t_{\text{int}} \left[\epsilon_b L_{\text{b}\Delta}(T) + (1 - \epsilon_d)\epsilon_c L_{\text{b}\Delta}(T_e) + \frac{(1 - \tau_a)}{\tau_a} L_{\text{b}\Delta}(T_{\text{atm}}) \right] + t_{\text{int}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} gR(\lambda) E_{\text{nf}} d\lambda + g_n, \quad (4)$$

$$K = \frac{\tau_{\text{opt}} \tau_a \pi g D^2 L^2}{f^2 (4L^2 + D^2)}, \quad (5)$$

式中: K 为综合了系统、大气透过率、响应增益等影响的线性系数。(4)式中等号右边第二项表示由系统内部非聚焦能引起的像元灰度响应, 令 $\delta = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g \cdot R(\lambda) E_{\text{nf}} d\lambda$, $L = \epsilon_b L_{\text{b}\Delta}(T) + (1 - \epsilon_d)\epsilon_c L_{\text{b}\Delta}(T_e) + \frac{(1 - \tau_a)}{\tau_a} L_{\text{b}\Delta}(T_{\text{atm}})$, 则有:

$$G_N = t_{\text{int}} \tau_f K L + t_{\text{int}} \delta + g_n. \quad (6)$$

(6)式即为考虑积分变量和辐射衰减率变量的定标模型, 其中 $t_{\text{int}} \tau_f K$ 组成了定标模型中的线性系数, 而 $t_{\text{int}} \delta + g_n$ 则组成了定标模型中的线性截距。当系统入瞳前置辐射透过率为 τ_{f1} 的中性密度衰减片, 积分时间设置为 $t_{\text{int}1}$ 时, 由(6)式可得:

$$G_{N1} = t_{\text{int}1} \tau_{f1} K L + t_{\text{int}1} \delta + g_n. \quad (7)$$

保持探测器工作的积分时间不变, 按照一定温度梯度依次升高黑体温度, 记录 $t_{\text{int}1}$ 积分时间下不同辐射源温度所对应的像元灰度响应, 将得到的数据进行线性拟合, 得到 $t_{\text{int}1}$ 积分时间下的定标模型为

$$G_{N1} = A_1 L + B_1, \quad (8)$$

式中: A_1 、 B_1 分别为 $t_{\text{int}1} \tau_{f1} K$ 、 $t_{\text{int}1} \delta + g_n$ 。改变积分时间为 $t'_{\text{int}1}$, 保持中性密度衰减片的透过率 τ_{f1} 不变, 重复上述实验步骤拟合得到同一衰减片在 $t'_{\text{int}1}$ 积分时间下的定标模型为

$$G'_{N1} = A'_1 L + B'_1, \quad (9)$$

式中: A'_1 、 B'_1 分别为 $t'_{\text{int}1} \tau_{f1} K$ 、 $t'_{\text{int}1} \delta + g_n$ 。当前置辐射透过率为 τ_{f2} 的中性密度衰减片时, 其在积分时间 $t_{\text{int}2}$ 下的定标模型为

$$G_{N2} = A_2 L + B_2. \quad (10)$$

由以上分析可知: 未更换衰减片时, 不同积分时间 $t_{\text{int}1}$ 、 $t'_{\text{int}1}$ 下定标模型的线性系数为 A_1 、 A'_1 , 则有 $A'_1 = (t'_{\text{int}1} / t_{\text{int}1}) A_1$; 当衰减片的透过率由 τ_{f1} 变为

τ_{f2} 时, 则有

$$\begin{cases} A'_2 = \frac{t_{\text{int}2} \tau_{f2}}{t_{\text{int}1} \tau_{f1}} A_1 \\ A''_2 = \frac{t_{\text{int}2} \tau_{f2}}{t'_{\text{int}1} \tau_{f1}} A'_1 \\ A_2 = \frac{1}{2} (A'_2 + A''_2) \end{cases}. \quad (11)$$

所以, 由(11)式可以根据透过率为 τ_{f1} 的中性密度衰减片在 $t_{\text{int}1}$ 、 $t'_{\text{int}1}$ 积分时间下定标模型的线性系数 A_1 、 A'_1 推导出透过率为 τ_{f2} 的衰减片在 $t_{\text{int}2}$ 积分时间下定标模型的线性系数 A_2 。对于 $t_{\text{int}2}$ 积分时间下定标模型的线性截距 B_2 , 由(6)式可知, 其与衰减片的透过率无关, 分别由相机内部非聚焦能引起的像元灰度响应和电路暗电流引起的灰度响应组成, 对于 B_1 、 B'_1 有:

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{\text{int}1} & 1 \\ t'_{\text{int}1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \\ g_n \end{pmatrix}. \quad (12)$$

依据(12)式可以解出暗电流引起的灰度响应 g_n 以及单位积分时间内部杂散辐射引起的灰度响应 δ , 所以在 $t_{\text{int}2}$ 积分时间下, 任意透过率的衰减片的定标模型的线性截距为

$$B_2 = t_{\text{int}2} \delta + g_n. \quad (13)$$

所以, 经以上推导便可以得出前置透过率为 τ_{f2} 的衰减片在 $t_{\text{int}2}$ 积分时间下的定标模型, 即:

$$G_{N2} = A_2 L + B_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{t_{\text{int}2} \tau_{f2}}{t_{\text{int}1} \tau_{f1}} A_1 + \frac{t_{\text{int}2} \tau_{f2}}{t'_{\text{int}1} \tau_{f1}} A'_1 \right) L + t_{\text{int}2} \delta + g_n. \quad (14)$$

因此, 只要在任意两个积分时间下对某一已知透过率的衰减片进行定标, 就可以通过(14)式的函数映射关系推出任意积分时间、任意透过率衰减片的辐射定标模型, 免去了衰减片更换带来的宽动态范围测温系统重复定标的繁琐过程, 节省了时间, 提高了工作效率。定标方法的基本流程如图 2 所示。

3 宽动态范围简化定标方法的验证

3.1 定标系统

红外测量定标系统的光学系统 F 数为 2, 镜头焦距为 100 mm, 视场角为 $11^\circ \times 8^\circ$ 。探测器采用响应范围较广、载流子寿命较高的碲镉汞(HgCdTe)材料, 制冷类型为闭合循环斯特林制冷, 工作响应波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 工作温度为 -193.15°C 。黑体源采用以色列 CI System 公司生产的 SR-20-33 型高温黑体炉, 其可调温度范围为 $50 \sim 1200^\circ\text{C}$, 发射

率为 0.99 ± 0.01 。所用测温仪器为美国 FLIR 公司生产的 SC7700M 型中波红外热像仪。透射式红外光学实验系统示意图如图 3 所示。

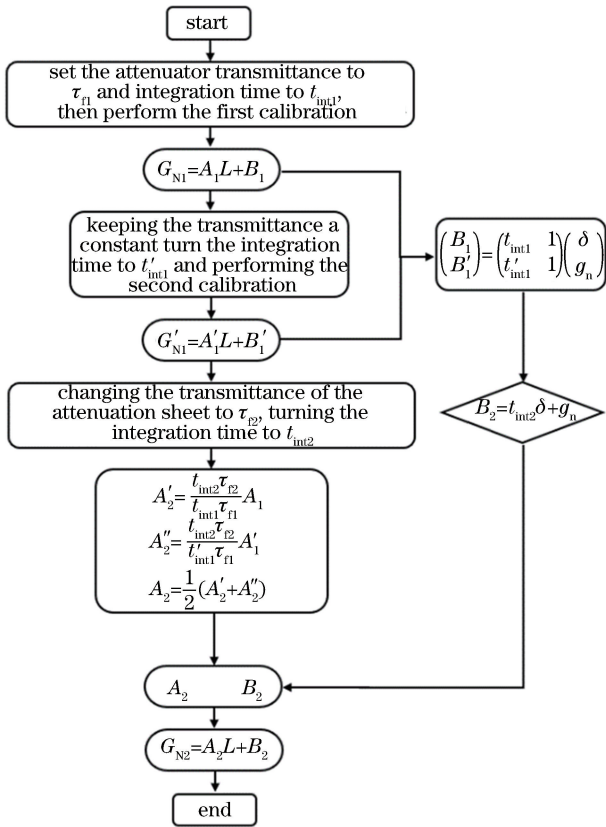


图 2 简化定标方法流程图
Fig. 2 Flow chart of simplified calibration method

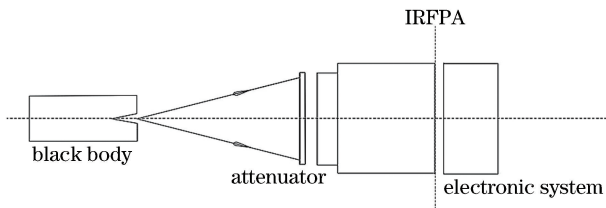


图 3 定标系统示意图
Fig. 3 Schematic of calibration system

图 4(a)、(b) 分别为热像仪视场内定标用小面源黑体的图像以及所使用碲镉汞探测器的相对光谱响应率曲线。探测器总像元个数为 327680, 黑体小面源覆盖的像元为 35588, 探测器信噪比 > 66 dB。

3.2 前置透过率为 0.0278% 的衰减片的辐射定标

辐射测温系统动态范围的展宽主要依赖于在辐射通路中添加中性密度衰减片来实现^[6]。由以上分析可知, 为了求取系统内部暗电流和非聚焦能辐射带来的像元灰度响应, 需要保持衰减片的透过率不变, 在任意两积分时间内进行辐射定标。

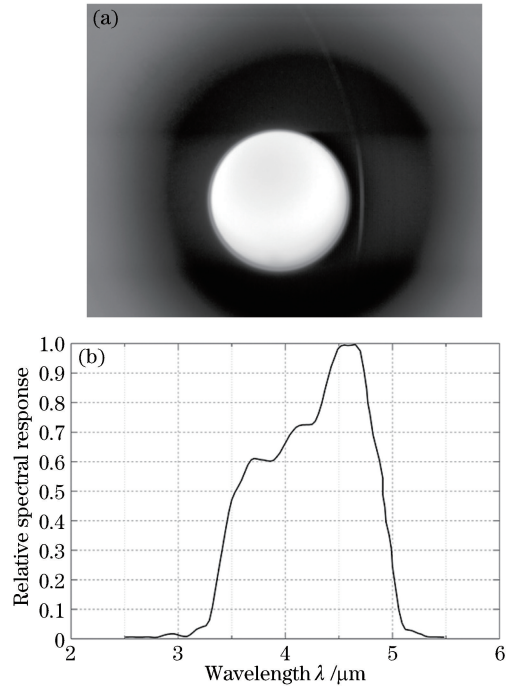


图 4 实验图像和探测器光谱响应参数。
(a) 定标图像; (b) 相对光谱响应

Fig. 4 Experimental image and spectral response parameters of detector. (a) Calibration image; (b) relative spectral response

分别选择 0.8 ms 和 1 ms 两个积分时间进行定标实验, 将定标用黑体小面源放置在系统入瞳前 32 cm 处, 保持环境温度稳定, 在系统入瞳前放置透过率为 0.0278% 的中性密度衰减片, 定标黑体的初温为 300 °C, 温度步长为 100 °C。待黑体小面源温度稳定后, 随机采集 20 帧图像, 读取中心像元区域 20 pixel × 20 pixel 的像元灰度响应值, 求取均值后作为该积分时间下的像元灰度响应, 定标结果如表 1 所示。

为了更直观地得到像元响应与入射辐射亮度的关系, 将像元响应作为因变量, 黑体辐射亮度作为自变量, 采用最小二乘法对表中的数据点进行拟合, 由此得到系统在 0.8 ms 和 1 ms 积分时间下的定标模型, 如表 2 所示。

将两个拟合模型的线性截距及对应的积分时间分别代入(11)式中, 得到不同模型解出的暗电流灰度响应 $\delta = 1085.50$, 单位积分时间由非聚焦能引起的灰度响应 g_n 为 107.50, 由此通过对透过率为 0.0278% 的衰减片在两个积分时间下的辐射定标, 经由定标模型的线性截距得到了整个测温系统的暗电流灰度响应和单位积分时间内由非聚焦能引起的灰度响应值。

表 1 透过率为 0.0278% 的衰减片在不同积分时间下的灰度响应

Table 1 Gray value responses of attenuator with transmittance of 0.0278% at different integration time

Temperature / °C	$L_b /$ ($W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$)	$G_N(0.8 \text{ ms})$	$G_N(1 \text{ ms})$
300	253.61	1045.78	1281.57
400	613.74	1169.13	1436.49
500	1188.69	1359.49	1673.39
600	1988.92	1621.32	2001.71
700	3007.78	1949.87	2413.85
800	4229.26	2335.99	2865.68
900	5633.46	2781.38	3450.40
1000	7199.81	3277.95	4072.91

表 2 透过率为 0.0278% 的衰减片在不同积分时间下的拟合模型

Table 2 Fitting model of attenuator with transmission of 0.0278% at different integration time

Temperature /°C	Integration time /ms	Fitting equation	R-square
From 300 °C to 1000°C with a gradient of 100 °C	0.8	$G_N = 0.3207L_b + 975.9$	0.9999
	1.0	$G_N = 0.4001L_b + 1193$	0.9999

表 3 透过率为 0.0740% 的衰减片在 0.8 ms 和 1 ms 积分时间下定标模型的线性系数

Table 3 Linear coefficients of calibration model for attenuator with transmittance of 0.0740% at integration time of 0.8 ms and 1.0 ms

Integration time /ms	A_1	t_{int1}/ms	t_{int2}/ms	t_{int2}/t_{int1}	τ_{f2}/τ_{f1}	A_2	Average value
0.8	0.3207	0.8	0.8	1.00	2.664	0.8543	0.8535
	0.4001	1.0	0.8	0.80	2.664	0.8527	
1.0	0.3207	0.8	1.0	1.25	2.664	1.0679	1.0669
	0.4001	1.0	1.0	1.00	2.664	1.0659	

表 4 透过率为 0.8193% 的衰减片在 0.2 ms 定标时间下定标模型的线性系数

Table 4 Linear coefficients of calibration model for attenuator with transmittance of 0.8193% at integration time of 0.2 ms

Integration time /ms	A_1	t_{int1}/ms	t_{int2}/ms	t_{int2}/t_{int1}	τ_{f2}/τ_{f1}	A_2	Average value
0.2	0.3207	0.8	0.2	0.25	29.472	2.3629	2.3606
	0.4001	1.0	0.2	0.20	29.472	2.3583	

根据表 3 可以推导出前置透过率为 0.0740% 的衰减片在 0.8 ms 和 1 ms 积分时间下定标模型的线性系数分别为 0.8535、1.0669，再由根据(14)式可求出对应的线性截距分别为 975.9、1193。在 0.8 ms、1 ms 积分时间下的定标模型如表 5 所示。

同理，当前置中性密度衰减片的透过率变为 0.8193%，系统工作的积分时间变为 0.2 ms 时，由前置透过率为 0.0278% 的衰减片在 0.8 ms 和 1 ms 积分时间下的定标模型，可以推导出更换衰减片和积分时间之后定标模型的线性系数为 2.3606，而线

3.3 前置不同透过率衰减片定标模型及测温极限的推导

由 3.2 节的分析可知，电路暗电流引起的像元灰度响应 $g_n = 107.50$ ，单位积分时间内因相机内部非聚焦能引起的像元灰度响应 $\delta = 1085.5$ ，所以不同积分时间下定标模型的响应线性截距 B 为

$$B = 1085.5t_{int} + 107.5. \quad (15)$$

根据已知的透过率为 0.0278% 的衰减片在 0.8 ms 和 1 ms 积分时间下的定标模型，由(11)式便可以推出前置透过率分别为 0.0740% 和 0.8193% 的中性密度衰减片在不同积分时间下的定标模型的线性系数，结果如表 3~4 所示。

表 5 透过率为 0.0740% 的衰减片在不同积分时间下的定标模型

Table 5 Fitting model of attenuator with transmittance of 0.074% at different integration time

Integration time /ms	Fitting equation
0.8	$G_N = 0.8535L_b + 975.9$
1.0	$G_N = 1.0669L_b + 1193$

性截距可以根据(14)式得出，为 324.6，所以当积分时间变为 0.2 ms 时，透过率为 0.8193% 衰减片的定标模型为

$$G_N = 2.3606L_b + 324.6. \quad (16)$$

对于更换衰减片之后系统的测温极限,可以依据探测器灰度响应饱和值反演得出。探测器像元灰度响应的饱和阈值为 10200,将其代入由表 5 推

出的定标模型以及(16)式中可以得出理论最大可探测亮度,从而可以推导出对应的可探测温度极限。透过率分别为 0.0740%及 0.8193%的衰减片定标模型的理论测温极限如表 6~7 所示。

表 6 透过率为 0.0740%的衰减片定标模型的理论测温极限

Table 6 Theoretical temperature measurement limit of calibration model for attenuator with transmittance of 0.0740%

Integration time /ms	Fitting equation	Saturated radiance /($W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$)	Saturated temperature / $^{\circ}C$
0.8	$G_N = 0.8535L_b + 975.9$	10807.38	1203.42
1.0	$G_N = 1.0669L_b + 1193$	8442.22	1073.45

表 7 透过率为 0.8193%的衰减片定标模型的理论测温极限

Table 7 Theoretical temperature measurement limit of calibration model for attenuator with transmittance of 0.8193%

Integration time /ms	Fitting equation	Saturated radiance /($W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$)	Saturated temperature / $^{\circ}C$
0.2	$G_N = 2.3606L_b + 324.6$	4183.43	796.51

3.4 定标模型精度分析

为了检验推导出的定标模型的测温精度,进行实验验证,仍然采用以色列 CI System 公司生产的 SR-20-33 型高温黑体炉,将黑体放置在系统入瞳前 32 cm 处,入瞳附近放置透过率为 0.0740%的中性密度衰减片,工作积分时间设置为 0.8 ms 和 1 ms,将定标黑体源按照 100 $^{\circ}C$ 的温度梯度由 400 $^{\circ}C$ 升至 900 $^{\circ}C$,分别记录每次温度稳定之后的像元灰度响应值,结果如表 8 所示。

表 8 透过率为 0.0740%衰减片在不同积分时间下的灰度响应

Table 8 Gray value responses of attenuator with transmittance of 0.0740% at different integration time

Temperature / $^{\circ}C$	$L_b / (W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1})$	$G_N(0.8 \text{ ms})$	$G_N(1 \text{ ms})$
400	613.74	1494.41	1846.33
500	1188.69	1999.94	2478.33
600	1988.92	2690.30	3041.07
700	3007.78	3566.08	4434.81
800	4229.26	4593.35	5720.96
900	5633.46	5764.37	7183.06

将入瞳附近的衰减片更换为透过率为 0.8193%的衰减片,工作积分时间设置为 0.2 ms。由于衰减片的透过率增大,到达探测器上的辐射增强,使得探测器更容易饱和,所以将定标黑体源按照 50 $^{\circ}C$ 的温度梯度由 300 $^{\circ}C$ 增加到 700 $^{\circ}C$,记录不同温度下的像元灰度响应,如表 9 所示。

将表 8~9 中的理论黑体辐射亮度与各积分时间下对应的像元响应灰度值代入到表 5 和(16)式推

表 9 透过率为 0.8193%的衰减片在 0.2 ms 积分时间下的灰度响应

Table 9 Gray value responses of attenuator with transmittance of 0.8193% at integration time of 0.2 ms

Temperature / $^{\circ}C$	$L_b / (W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1})$	$G_N(0.2 \text{ ms})$
300	253.61	936.50
350	408.38	1331.93
400	613.74	1856.87
450	873.20	2495.05
500	1188.69	3277.75
550	1560.76	4182.47
600	1988.92	5222.68
650	2471.88	6376.99
700	3007.78	7656.27

导出的定标模型中,反演出对应的响应灰度、辐射亮度,并由辐射亮度公式 $L(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\pi \lambda^5} \cdot \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda$ 反演出相应的测试温度,比较反演值与理论值的相对误差,从而验证推导出的定标模型的测量精度^[7],结果如表 10~12 所示。

由表 11 可知,当黑体辐射源温度较低时,辐射亮度反演相对误差与温度反演相对误差均比较大,此时目标辐射源的辐射亮度较小,经过前置中性密度衰减片(透过率为 0.0740%)后被大幅衰减,到达探测器时引起的像元灰度响应较小,靠近探测器工作的截止区内^[8-10],受到内部暗电流噪声和杂散辐射噪声的影响比较大^[11],所以测温误差大大增加。表 12 为放置透过率为 0.8193%的衰减片后,根据透

过率为 0.0278% 的衰减片定标模型推导出的定标模型的反演灰度、反演辐亮度及反演温度的相对误差。可知,随着目标辐射源辐射的增强,测量相对误差大

致呈现先增大后减小的趋势。辐射源温度越高,探测器接收到的能量越多,杂散辐射等噪声的影响越小,测温精度越高。

表 10 放置透过率为 0.0740% 的衰减片后,定标模型在不同积分时间下的反演结果

Table 10 Inversion results of calibration model at different integration time after placing attenuator with transmittance of 0.0740%

Gray value		$L(0.8\text{ ms}) /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$)	$T(0.8\text{ ms}) / ^\circ\text{C}$	$L(1\text{ ms}) /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$)	$T(1\text{ ms}) / ^\circ\text{C}$
0.8 ms	1 ms				
1499.72	1847.79	607.51	398.65	612.36	399.70
1990.44	2461.21	1199.81	501.61	1204.73	502.32
2673.44	3314.98	2008.67	602.16	2013.38	602.67
3543.04	4402.00	3034.78	702.40	3038.53	702.73
4585.58	5705.20	4238.37	800.69	4244.03	801.12
5784.06	7203.34	5610.39	898.45	5614.45	898.72

表 11 反演亮度及反演温度的相对误差

Table 11 Relative error of inversion radiance and inversion temperature

Temperature / $^\circ\text{C}$	$L_b /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$)	Relative error of inversion radiance /%		Relative error of inversion temperature /%	
		0.8 ms	1.0 ms	0.8 ms	1.0 ms
400	613.74	1.01	0.22	0.34	0.07
500	1188.69	-0.94	-1.35	-0.32	-0.46
600	1988.92	-0.99	-1.23	-0.36	-0.45
700	3007.78	-0.90	-1.02	-0.34	-0.39
800	4229.26	-0.22	-0.35	-0.09	-0.14
900	5633.46	0.41	0.34	0.17	0.14

表 12 放置透过率为 0.8193% 的衰减片后,定标模型在 0.2 ms 积分时间下的反演结果及相对误差

Table 12 Inversion results and relative error of calibration model at integration time of 0.2 ms after placing attenuator with transmittance of 0.8193%

Gray value	Relative error /% (gray value)	Inversion radiance $L /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$)	Relative error of inversion radiance /%	Inversion temperature $T / ^\circ\text{C}$	Relative error of inversion temperature /%
923.28	-1.41	259.22	-2.21	302.11	-0.70
1288.62	-3.25	426.72	-4.49	355.61	-1.60
1773.38	-4.50	649.10	-5.76	408.52	-2.13
2385.87	-4.38	919.45	-5.30	459.34	-2.07
3130.61	-4.49	1251.02	-5.24	510.71	-2.14
4008.92	-4.15	1634.27	-4.71	561.19	-2.03
5019.64	-3.89	2074.93	-4.32	611.80	-1.97
6159.72	-3.41	2563.92	-3.72	661.76	-1.81
7424.77	-3.02	3105.85	-3.26	711.83	-1.69

图 5 为实际定标测量灰度值以及推导出的定标模型计算灰度值随目标辐射源辐射亮度变化的曲线,可知:前置透过率为 0.0740% 的衰减片,在 0.8 ms 的积分时间下,利用上述定标方法得到的计算值与实测定标灰度值之间的误差最大为 0.65%;在 1 ms 的积分时间下,计算值与实测值之间的误差

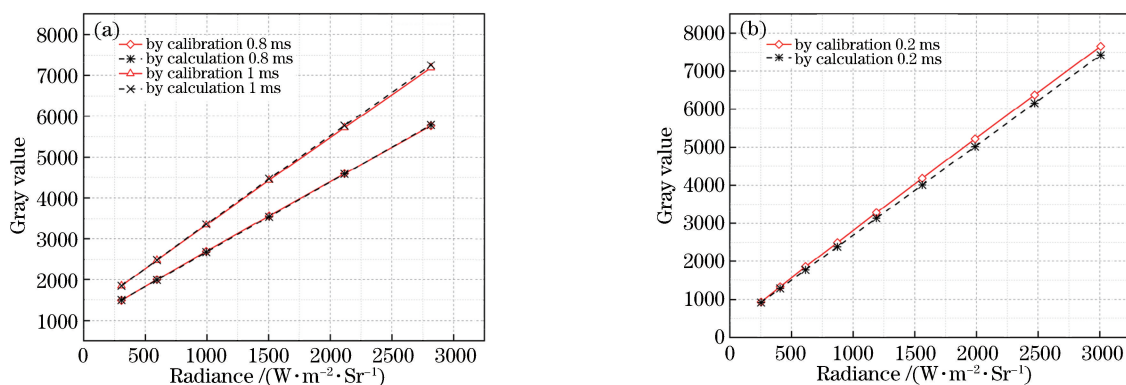


图 5 实际定标值与理论计算值之间的误差。(a)前置透过率为 0.0740% 的衰减片;(b)前置衰减率为 0.8193% 的衰减片

Fig. 5 Error between actual and theoretical calculation values. (a) Attenuator with transmittance of 0.0740%; (b) attenuator with transmittance of 0.8193%

图 6(a)~(d)为前置透过率为 0.0740% 的衰减片在 0.8 ms 和 1 ms 积分时间下辐射亮度和反演温度的测量误差,图 6(e)~(f)为前置透过率为 0.8193% 的衰减片在 0.2 ms 积分时间下辐射亮度和反演温度的相对误差。由图 6(a)~(b)可以看出:两个积分时间下的反演辐射亮度误差与反演温度误差的变化趋势大致相同;在 0.8 ms 的积分时间下,反演温度误差和辐射亮度误差均随着入射辐射强度的增加而基本呈现出先增加后减小之后再增加的趋势;在 1 ms 的积分时间下,反演温度和辐射亮度相对误差随着入射强度也呈现出类似的变化趋势。结合图 6(c)~(d)可知,当积分时间由 0.8 ms 增加到 1 ms 时,辐射亮度和反演温度误差都呈现出先增加后减小的趋势。图 6(e)~(f)为更换衰减片之后的辐亮度和温度测量误差,当前置衰减片的透过率增加后,随着入射辐射强度增加,反演温度和辐射亮度的测量误差基本上是先增加后减小,对于温度较高的辐射源测温更加准确。结合表 10~11 中的数据可知:前置透过率为 0.0740% 的衰减片在 0.8 ms 积分时间下的最大测温误差为 -0.36% ,理论值与反演值最大相差 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 1 ms 积分时间下的最大测温误差为 -0.46% ,理论值与反演值相差 $2.67\text{ }^{\circ}\text{C}$;当入射的辐射强度增加至已知定标模型辐射强度的近 30 倍时,0.2 ms 积分时间下定标模型的最大测温误差为 -2.14% ,理论值与反演值的最大误差

最大为 0.91%;当更换为透过率为 0.8193% 的衰减片后,定标实测值与推导计算值之间的最大、最小误差分别为 4.5%、1.41%。此外,实际测得的像元灰度响应与推导的定标模型的计算值相差不大。可见,所提简化定标方法在简化宽动态范围定标过程的同时,可以很好地反映响应值与目标辐射亮度之间的关系。

为 $-11.83\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见,在一定的误差允许范围内,利用上述简化定标方法得出的定标模型具有较高的测温精度。

虽然在一定误差允许范围内利用该方法简化定标流程的同时,可以取得一定的测温精度,但测温精度仍有提升的空间,比如可以采取一定的措施来削减一定的背景辐射,以修正定标测量模型。最直接的就是在热像仪探测器中加入温度传感器,测出关键部件的温度,在定标时进行相应的温度补偿;还可以在黑体光阑盘前加装冷屏,从而大幅减小背景辐射进入热像仪;第三种办法就是可以在实验时选择无阳光照射的时间,或者设置适当的测试距离,从而主动减小背景辐射对测量结果的影响,进一步提高测量结果的准确性。

4 结 论

通过分析测温系统的定标理论,建立了考虑积分时间和衰减片透过率的辐射定标模型,提出了一种相对简便的宽动态范围辐射测温系统的定标方法,通过不同积分时间、不同温度的辐射定标,计算出系统内部暗电流及非聚焦能引起的像元灰度响应,从而由已知的定标模型推导出改变衰减率之后系统在不同积分时间下的定标模型,省去了更换衰减片导致的重新定标的繁琐过程。经过实验验证,该简化定标方法在近 3600 倍衰减条件下得到衰减

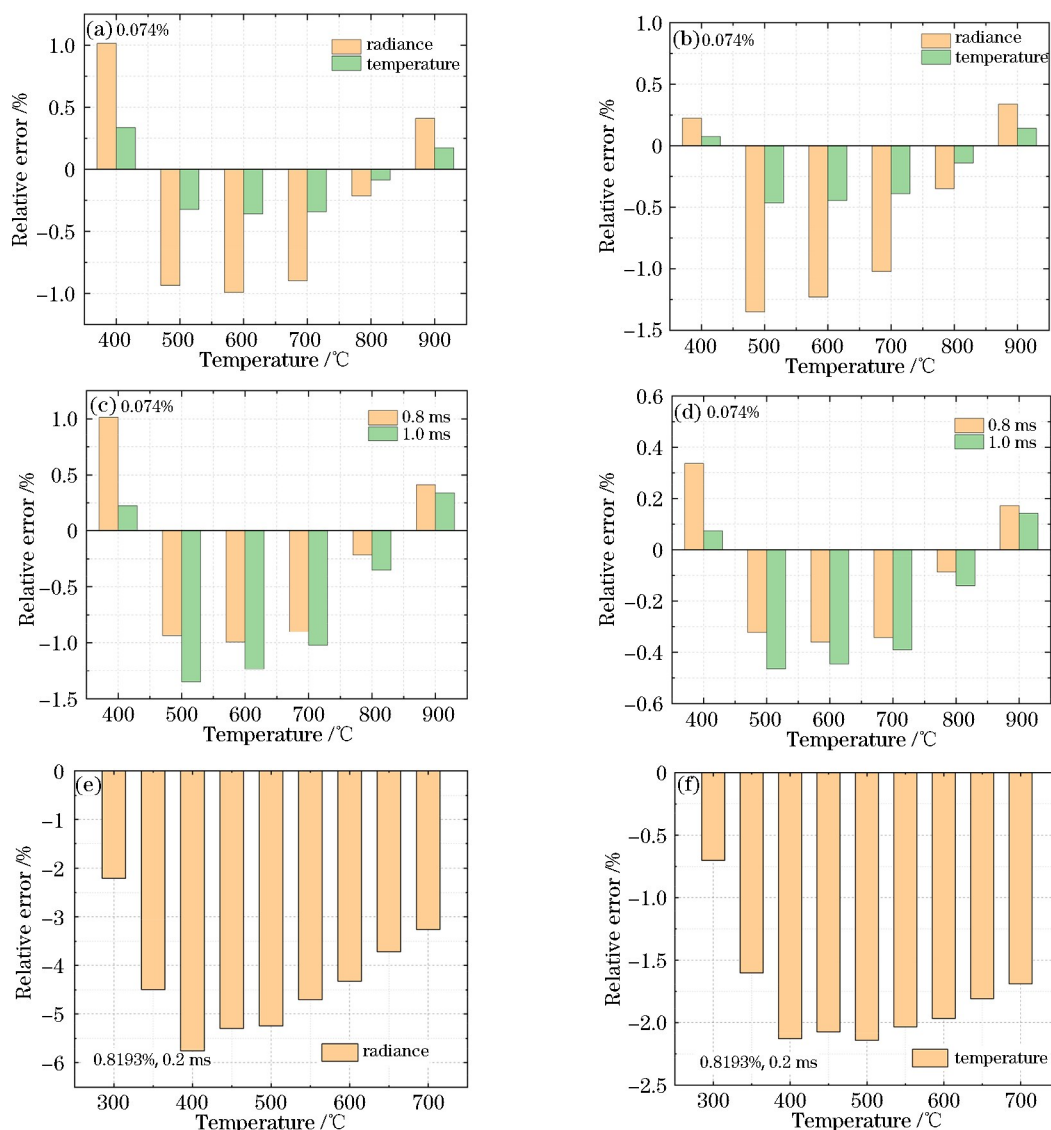


图 6 不同透过率衰减片定标模型在不同积分时间下的反演温度和辐射亮度的相对误差。(a) 0.8 ms;(b) 1 ms;
(c)辐射亮度($\tau_f=0.0740\%$);(d)温度($\tau_f=0.0740\%$);(e)辐射亮度($\tau_f=0.8193\%$);(f)温度($\tau_f=0.8193\%$)

Fig. 6 Relative errors of inversion temperature and radiance of calibration models for different attenuators. (a) 0.8 ms; (b) 1 ms; (c) radiance ($\tau_f = 0.0740\%$); (d) temperature ($\tau_f = 0.0740\%$); (e) radiance ($\tau_f = 0.8193\%$); (f) temperature ($\tau_f = 0.8193\%$)

近 1400 倍条件下的定标模型在 0.8 ms 和 1 ms 积分时间下的测量误差分别 $\leq 0.36\%$ 和 $\leq 0.46\%$, 并且在衰减近 120 倍条件下推导出的定标模型在 0.2 ms 积分时间下的测温误差 $\leq 2.14\%$, 在一定的误差允许范围内具有较高的测温精度。

虽然利用该方法能够对宽动态范围辐射测温系统的定标过程进行一定程度的简化, 但该简化方法的实施需要准确知道所用衰减片的透过率; 此外, 第一次定标的准确程度在很大程度上决定了后续推导模型的测温精度, 并且该简化方法更适用于更换衰减片前后衰减倍数相差不大的宽动态范围辐射测温系统。所以, 该简化方法虽然对宽动态辐射测温系

统具有一定的简化作用, 但它本身具有一定的局限性, 在满足一定条件且在误差允许的范围内, 该方法才能在简化定标过程的同时保证一定的测温精度。所以, 后续研究的重点可以放在对定标模型的修正以及实现强弱衰减转换时测温精度的提高上, 以提高该方法的适用性。

参 考 文 献

[1] Tian Q J, Li Z, Chang S T, *et al.* Measurement method of infrared radiometric characteristics for high-temperature small targets [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1012004.

- 田棋杰, 李周, 常松涛, 等. 高温小目标红外辐射特性测量方法[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1012004.
- [2] Xing Q L. Calibration for FPA infrared radiation measuring system [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2007, 26(4): 68-71.
邢强林. 红外焦平面成像探测辐射特性测量标定方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2007, 26(4): 68-71.
- [3] Sun Z Y, Chang S T, Zhu W. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0712006.
孙志远, 常松涛, 朱玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0712006.
- [4] Sun Z Y, Zhu W, Qiao Y F, *et al.* Atmosphere amending research in infrared radiation characteristic measurement[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(2): 162-165.
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): 162-165.
- [5] Yang C Y, Cao L H. Radiation calibration and error analysis for a large-aperture infrared opto-electric system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1624-1628.
杨词银, 曹立华. 大口径红外光电系统辐射定标及误差分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1624-1628.
- [6] Singh R, Nagarajan R, Poonia K, *et al.* High temperature calibration of thermal imagers for infrared measurements on military platforms [J]. Defence Science Journal, 2017, 67(2): 188-192.
- [7] Yang C Y, Zhang J P, Cao L H, *et al.* Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(3): 284-288.
杨词银, 张建萍, 曹立华, 等. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(3): 284-288.
- [8] Li F W, Zhang Y Q. Influence of integration time on IRFPA imaging system [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(5): 727-730.
李福巍, 张运强. 积分时间对红外焦平面成像系统的影响[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 727-730.
- [9] Luo M J, Zhou J M, Fu J N, *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.
- [10] Liu N, Chen Q, Gu G H, *et al.* Analysis on the integration time and SNR of 640×512 cooled IR detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 43-48.
刘宁, 陈钱, 顾国华, 等. 640×512 制冷探测器积分时间与 SNR 分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 43-48.
- [11] Tian Q J, Chang S T, He F Y, *et al.* Internal stray radiation measurement for cooled infrared imaging systems using ambient temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0712002.
田棋杰, 常松涛, 何锋赟, 等. 根据环境温度测量制冷型红外成像系统内部杂散辐射[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0712002.