

基于背景偏置对消的面目标辐射亮度计算方法

贺元兴, 司文涛*, 张浩元, 甘世奇, 吴统邦

中国人民解放军 95859 部队, 甘肃 酒泉 735018

摘要 利用大量外场实验数据,研究了红外测量系统输出灰度及定标背景偏置随环境温度的变化规律,分析了背景偏置变化对面目标辐射测量精度的影响。在此基础上,提出了一种基于背景偏置对消的面目标辐射亮度计算新方法。该方法消除了对环境温度依赖较大的背景偏置项的影响,可有效提高动态目标红外辐射特性的测量精度。采用传统方法和新方法对某型飞机的动态特性测试数据进行了处理和比较,结果验证了新方法的有效性。

关键词 测量; 辐射亮度; 面目标; 灰度漂移; 测量精度; 背景偏置

中图分类号 O432.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.121204

Calculation Method for Extended Source Target Radiance Based on Background Offset Cancellation

He Yuanxing, Si Wentao*, Zhang Haoyuan, Gan Shiqi, Wu Tongbang

95859 Army Unit of PLA, Jiuquan, Gansu 735018, China

Abstract Based on a large amount of test data, the variations of the output gray value and the calibration background bias of an infrared measurement system with ambient temperature were analyzed. Further, the influence of background bias on the precision of the surface target-radiance measurements was assessed. Based on the results, a new method for calculating the surface target radiance based on background offset cancelling is proposed. This method can improve the measurement accuracy of the infrared radiation characteristics of dynamic targets by eliminating the influence of background bias, which is influenced by ambient temperature. The dynamic characteristics of a particular type of aircraft were calculated and compared using both the traditional and the proposed methods. The results verify the effectivity of the newly proposed method.

Key words measurement; radiance; extended source target; grayscale drift; measurement accuracy; background offset

OCIS codes 120.4800; 120.5630; 040.3060

1 引言

红外辐射特性是衡量武器装备隐身性能和战场生存能力的重要指标,实现对其精确测量一直是国内外目标特性测试机构追求的目标^[1-6]。红外辐射特性测试包括辐射定标、目标红外图像采集、大气参数测量和数据处理等环节。与实验室较为稳定的环境条件相比,外场环境状况变化更为复杂,红外测量系统受太阳辐照及地表环境温度变化的影响,辐射定标及红外测量所面临的不确定性因素增多,红外辐射测量精度通常难以保证。研究发现,环境温度

变化对光学系统的性能具有较大影响^[7-9],尤其是对定标结果的影响给目标辐射特性计算引入较大误差。为消除环境温度变化带来的影响,文献^[10-13]中通过建立红外传感器“温漂”补偿模型来修正灰度漂移量,在实验室内取得了较好的结果,但是受外场多变的环境条件影响,温度补偿模型存在模型相对单一且需大量实验数据进行校验等现实问题,实际操作和推广性不强。

本文在分析灰度漂移对面目标辐射亮度计算结果影响的基础上,提出了一种减小环境温度影响,提高中/长波辐射测量精度的方法,即基于背景偏置对消

方法的辐亮度计算模型。新方法消除了对环境温度依赖较大的背景偏置项的影响,可有效提高地空动态目标红外辐射特性的测量精度,在外场各类航空目标红外辐射特性测试数据处理中得到较好的应用。

2 灰度漂移对面目标辐亮度计算的影响

2.1 面目标辐射亮度传统计算方法

航空目标飞行高度大多处于 10 km 以下,利用大口径地基红外测量系统对航空目标进行测量时,目标在面阵探测器上形成扩展图像,此时,采用辐射亮度来定量描述该类面目标的红外辐射特性。面目标辐射亮度的传统计算公式为^[14]

$$L_{i,j} = \frac{h_{i,j} - B - G \cdot L_{\text{path}}}{\tau_{\text{atm}} \cdot G}, \quad (1)$$

式中: $L_{i,j}$ 为目标辐射亮度分布; $h_{i,j}$ 为目标图像上第 (i,j) 像素的灰度; G 和 B 分别为红外测量系统辐射定标的增益系数和背景偏置; τ_{atm} 为目标探测路径上的斜程大气透过率; L_{path} 为地基红外测量系统与目标之间的路径程辐射。

外场开展地空动态目标红外辐射特性测试,就是测量获取(1)式右边各参数,进而计算出面目标辐射亮度分布。整个测试过程包括设备辐射定标、目标红外图像的获取、大气参数测量等环节。其中,设备辐射定标是依托大口径面源黑体提供标准值来建立红外系统输入亮度和输出灰度间的数学关系^[15-16],通常安排在事前或事后开展,通过定标可以得到增益系数 G 和背景偏置 B ;红外图像获取是利用红外系统对航空目标进行跟踪测量,并记录红外原始数据;大气参数测量是利用激光雷达、太阳辐射计和地面气象站等大气测量仪器实时采集大气数据,通过大气传输计算软件(CART)完成大气透过率 τ_{atm} 和路径程辐射 L_{path} 的计算。

2.2 灰度漂移对辐亮度计算的影响

地基红外测量系统本身是一种热系统,与可见光电视相比灵敏度高且对热能更敏感。高精度的红外辐射特性测量设备普遍采用制冷型红外焦平面阵列探测器,它保证了探测器单元自身温度的稳定,其响应率基本不随外部环境温度的变化而变化。然而,由于制冷型探测器在制冷过程中不断地向外散热,废热若不能及时导出将造成系统内部温度发生变化;同时,红外光机结构受周围环境、太阳辐射等影响会产生温度变化,这些因素

共同作用于探测器,将导致红外系统不可避免地发生灰度漂移^[6,17]。

图1为外场某地基红外测量系统中波相机输出灰度随时间的变化曲线,图中同时给出在该时间段内环境温度的变化情况。可以看出,在实验时间段内,中波红外相机的输出灰度并不恒定,而是随时间呈先增大后减小的变化趋势,灰度最大漂移约1500 ADU(灰度量单位)。与此同时,周围环境温度也呈现十分相似的变化趋势,红外系统灰度漂移与周围环境温度的变化密切相关,环境温度的起伏是引起红外探测器发生灰度漂移的重要原因。

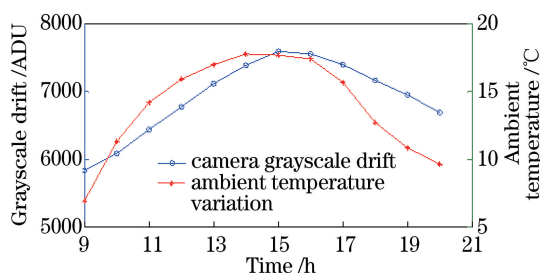


图1 红外相机灰度漂移及环境温度随时间的变化

Fig. 1 Grayscale drift of infrared camera and ambient temperature versus time

正是由于环境温度的起伏,红外系统发生灰度漂移,因此,在不同时间段开展辐射定标,当环境温度存在较大差异时,将直接影响到红外系统辐射定标的背景偏置。在外场不同季节、不同温度环境条件下开展了多次定标实验,实验过程中同时记录环境温度。图2为中波定标背景偏置随环境温度的变化情况及其拟合结果。其中,中波红外的积分时间设置为3 ms,滤光片档位分别取1,2和3,对应能量透过率分别为100%,50%和20%。由图2可以看出,随着环境温度由15℃升高至36℃时,中波定标偏置亦呈现出逐渐增大的变化趋势,二者之间的变化过程可近似用线性函数拟合。图3给出了长波定标背景偏置随环境温度的变化情况及其拟合结果。其中,长波红外相机的积分时间设置为0.3 ms,滤光片档位为1档,能量透过率为100%。可以看出,与中波红外的定标结果类似,长波定标偏置随环境温度的增加同样呈现出逐渐增大的变化趋势,可近似用线性函数拟合。通过将长波红外系统的滤光片设置为1,2和3档,对应能量透过率分别为100%,55%和25%。统计发现其对应的背景偏置随环境温度的变化趋势相同,但近似拟合直线的截距有所差异。

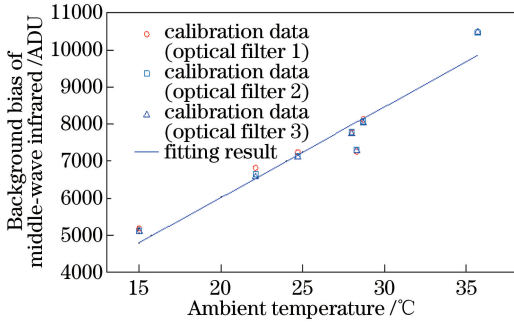


图2 中波红外探测器定标背景偏置随环境温度的变化
Fig. 2 Calibration background bias of middle-wave infrared detector versus ambient temperature

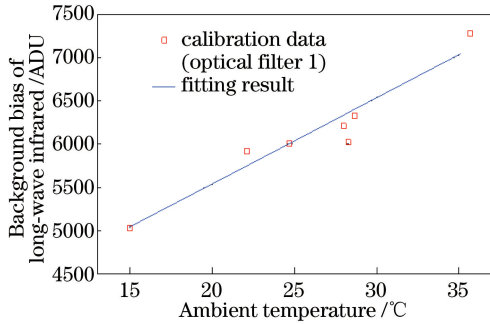


图3 长波红外探测器定标背景偏置随环境温度的变化
Fig. 3 Calibration background bias of long-wave infrared detector versus ambient temperature

红外测量系统定标背景偏置对环境温度具有依赖性,这对于高精度测量目标红外辐射特性十分不利。外场在采用事先/事后定标数据计算面目标辐射亮度时,由于地面环境温度变化快,当测试时的环境温度与系统事前/事后定标时的环境温度差异较大时,将给目标辐射亮度的测量结果带来3种不同情况。

1) 辐射亮度为负值。当开展辐射定标时的环境温度明显高于测试时的环境温度时,由于系统工作状态的改变,辐射定标背景偏置比测试过程中系统定标真实偏置大,此时,利用(1)式计算辐射亮度,辐射亮度容易出现负值,这种情况在处理面目标数据时常常会遇到。

2) 辐射亮度较真实值偏小。当开展辐射定标时的环境温度略高于测试时的环境温度时,辐射定标背景偏置比测试过程中系统定标真实偏置稍高,此时辐射亮度计算值并不会出现负值情况,但较真实值偏小。

3) 辐射亮度较真实值偏大。当开展辐射定标时的环境温度低于测试时的环境温度时,辐射定标背景偏置比测试过程中系统定标真实偏置偏小,此

时辐射亮度计算值会比真实值偏大。

3 基于背景对消的辐射亮度计算方法

由上可知,确保红外系统工作状态的稳定是保证面目标辐射亮度测量精度的重要前提和基本要求,然而外场这一条件较难控制和满足。灰度漂移是红外系统工作状态不稳定的主要表现,需要研究消除灰度漂移对计算结果影响的方法。

不妨设地基红外测量系统采集目标图像的当前帧时间为 t ,则对应于当前 t 时刻的系统辐射定标方程可表示为

$$h = G_t \cdot L + B_t, \quad (2)$$

式中: h 为红外系统输出图像灰度; G_t 为增益系数; B_t 为背景偏置。

根据定标方程,红外测量系统在 t 时刻采集到的目标红外图像灰度为

$$h_t = \tau_{\text{atm}} \cdot G_t \cdot L(T_t) + G_t \cdot L_{\text{path}} + B_t, \quad (3)$$

式中: τ_{atm} 为 t 时刻对应的斜程大气透过率; L_{path} 为 t 时刻对应的大气程辐射。

同时,当前帧 t 时刻红外图像的背景灰度 h_b 可表示为

$$h_b = G_t \cdot L_{\text{back}} + B_t, \quad (4)$$

式中: L_{back} 为天空背景辐射亮度。将(4)式与(3)式相减,可消去定标背景偏置 B_t 项。此时,面目标的红外辐射亮度变为

$$L(T_t) = \frac{h_t - h_b}{\tau_{\text{atm}} \cdot G_t} + \frac{L_{\text{back}} - L_{\text{path}}}{\tau_{\text{atm}}}. \quad (5)$$

(5)式等号右边均为已知量,其中, G_t 可通过事前/事后辐射定标获得;天空背景辐射亮度值 L_{back} 可通过大气传输计算软件获得; h_b 通过当前帧目标图像数据获得。

根据面目标辐射亮度新的计算公式[(5)式],理论上,由于消除了对环境温度较为敏感的定标背景偏置的影响,此时,面目标辐射亮度的计算结果不再受制于环境温度,其结果可信度将优于传统计算方法。

4 方法应用及结果分析

依托大口径地基红外测量系统,对某型飞机飞行过程中的中波、长波动态测量数据进行计算和分析。当飞机相对于测量设备侧向飞行时,选取飞机机头、机身和尾喷口3个特征部位进行计算,表1、2分别给出采用传统辐射亮度计算方法和本文方法计算得到的飞机红外辐射亮度结果对比情况。

表1 飞机中波红外辐射亮度计算结果

Table 1 Calculation results of middle-wave infrared radiance of aircraft

Calculation method	Gain	Bias	Atmos	Path	back	Nose	Fuselage	Jet nozzle
			pheric transmissivity	radiation	ground radiation	radiation / ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$)	radiation / ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$)	radiation / ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$)
Eq. (1)	423.124	2335	0.3504	0.264	—	-0.889	-1.990	-0.022
Eq. (5)	423.124	—	0.3504	0.264	0.2665	1.289	0.432	2.402

表2 飞机长波红外辐射亮度计算结果

Table 2 Calculation results of long-wave infrared radiance of aircraft

Calculation method	Gain	Bias	Atmos	Path	back	Nose	Fuselage	Jet nozzle
			pheric transmissivity	radiation	ground radiation	radiation / ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$)	radiation / ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$)	radiation / ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$)
Eq. (1)	55.794	3340	0.6156	6.3169	—	-0.188	0.686	6.451
Eq. (5)	55.794	—	0.6156	6.3169	6.5637	4.943	5.816	11.581

由表1和表2可以看出,采用传统计算模型,飞机上3个特征部位的中波辐射亮度值均为负值,飞机头部特征部位的长波辐射亮度值为负值,机身和侧向尾喷口的长波辐射亮度偏小。而采用本文方法,飞机头部中波辐射亮度为 $1.289 W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$,长波辐射亮度为 $4.943 W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$;机身中波辐射亮度为 $0.432 W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$,长波辐射亮度为 $5.816 W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$;尾喷口侧向辐射亮度值为 $2.402 W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$,长波辐射亮度为 $11.581 W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$ 。分析结果可知,这是由于该次红外特性测量过程持续时间较长,辐射定标安排在事后开展,定标时地面环境温度升高约为 $5^{\circ}C$,此时,中波红外的定标背景偏置值达到2335 ADU,已大于飞机机头和机体部位的灰度,因此会得出辐射亮度为负值的错误结果;长波红外的定标背景偏置虽然小于飞机机体的灰度,但计算结果已不能反映真实情况。由于本文方法消除了对环境温度依赖强的背景偏置的影响,因此得出的结果也更接近真实情况。

5 结论

受外场测试环境温度复杂多变的影响,采用传统的面目标辐射亮度计算方法通常会得出不准确甚至错误的结果。本研究基于外场大口径地基红外测量系统,通过大量实验数据深入分析了环境温度变化对动态目标辐射亮度测量结果的影响。在此基础上,提出了一种减小环境温度影响,提高动态面目标辐射亮度测量精度的新方法。该方法采用背景对消的原理消除了对环境温度依赖较大的背景偏置的影响,因而可有效提高目标红外辐射亮度的计算精度。对某型飞机红外测试动态数据进行处理,结果验证了新

方法的有效性,目前在外场航空目标红外特性数据处理中得到较好的应用。

参 考 文 献

- [1] Wang T. Study on high reliability detection method of infrared dim target in complex space environment [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
王涛. 复杂空间环境下红外弱小目标高可靠检测方法研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2017.
- [2] Huang Z G. Research on space target of ground-based infrared detection technology [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
黄志国. 空间目标地基红外探测技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2018.
- [3] 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.
- [4] Liu B. Research on the development of photoelectric stealth technology [J]. Shipboard Electronic Warfare, 2002, 25(6): 44-47.
刘波. 光电隐身技术发展研究[J]. 舰船电子对抗, 2002, 25(6): 44-47.
- [5] Jiang Y T, Wang Y. Technology and development of infrared stealthy [J]. Infrared Technology, 2003, 25(5): 7-9, 14.
蒋耀庭, 王跃. 红外隐身技术与发展[J]. 红外技术, 2003, 25(5): 7-9, 14.
- [6] Yang C Y, Zhang J P, Cao L H. 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. 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.
- [7] Li H. Research on key techniques for medium wave infrared target detection device [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- 李航. 中波红外目标探测装置关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2017.
- [8] 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, 何锋赞, 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.
- [9] Tian Q J. Research on internal stray radiation analysis suppression and measurement technology of infrared theodolite [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- 田棋杰. 红外经纬仪内部杂散辐射分析抑制与测量技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2018.
- [10] Chang S T. Research on infrared theodolite design and key technologies to improve the radiometry precision [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- 常松涛. 红外经纬仪结构设计及提高其辐射测量精度的关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2015.
- [11] Sun Z Y, Wang M, Chang S T. Effect and correction of environmental temperature on infrared radiation measurement precision[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(5): 522-527.
- 孙志远, 王旻, 常松涛. 环境温度对红外辐射测量精度的影响及修正[J]. 激光与红外, 2014, 44(5): 522-527.
- [12] Chang S T, Zhang Y Y, Sun Z Y, *et al.* Method to remove the effect of ambient temperature on radiometric calibration[J]. Applied Optics, 2014, 53 (27): 6274-6279.
- [13] Yu Y, Wang M, Chang S T, *et al.* Drift compensation of infrared imaging system using ambient temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1004002.
- 余毅, 王旻, 常松涛, 等. 根据环境温度进行红外成像系统漂移补偿[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1004002.
- [14] Liu Y Q, Liu X Y. Research on technology of ground-based infrared radiation feature measurement for space target [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34 (5): 0512003.
- 刘莹奇, 刘祥意. 空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512003.
- [15] 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.
- [16] Li X S, Ren J W, Zhang L G, *et al.* Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electric system 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.
- [17] Chang S T, Sun Z Y, Zhang Y Y, *et al.* Internal stray radiation measurement for cooled infrared imaging systems[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64 (5): 050702.
- 常松涛, 孙志远, 张尧禹, 等. 制冷型红外成像系统内部杂散辐射测量方法[J]. 物理学报, 2015, 64 (5): 050702.